

**II CONGRESO NACIONAL DE LA CANA DE AZÚCAR Y SUS DERIVADOS  
25 - 27 Mayo 2011, Guayaquil, Ecuador**

**MODELO DE PRONOSTICO DE RIEGO PARA LA COSTA PERUANA EN CULTIVARES  
DECAÑA DE AZÚCAR**

**A Vásquez V<sup>1</sup>**  
avasquezv1@hotmail.com,  
UNA LA MOLINA,

**M. Cañamero K.<sup>2</sup>**  
miguel\_kerla@la.molina.edu.pe,  
UNA LA MOLINA

**F. García A.<sup>3</sup>**  
fgarcia@agroparamonga.pe  
AIPSA

**R. Murga S.<sup>4</sup>**  
rmurga@agroparamonga.pe  
AIPSA

Palabras claves: Evapotranspiración, Estado energético, Cifra arany

**RESUMEN**

Los programas de riego son una importante herramienta para la sistematización de la administración del riego de los cultivos, en especial para los de periodo vegetativo largo. En el presente trabajo se implemento el programa de los estados de humedad en suelos de textura media a ligeramente fina. El modelo de la función hallado y utilizado permite cuantificar el consumo de agua para caña de azúcar y es:

$$E = \frac{1.17 * E_0}{1 + \phi^{1.5} / 4.8}$$

Los pronósticos de los niveles de humedad del suelo usando este modelo son bastante buenos, calculados en campos de Casa Grande, Paramonga y Cartavio, y ha sido validado en la industria azucarera de la costa del Perú, en variedades de caña de azúcar, con edades mayores o iguales a cuatro meses hasta la cosecha.

La herramienta informática PRONÓSTICO al tener incorporado este modelo permite pronosticar los riegos por estados energéticos del agua en el suelo a 3, 5 y 15 bares, así como calcular los respectivos módulos de riego y tiempos de aplicación. Para lo cual requiere como datos de entrada: porcentaje de saturación del agua en el suelo (Cifra Arany), conductividad eléctrica en la pasta de saturación del suelo (Cepas), evapotranspiración potencial (E<sub>0</sub>), eficiencia de aplicación del agua y fecha del ultimo riego. Además calcula la programación y calendario de riego, muestra espacialmente los mapas temáticos: orden de la programación del riego, cuarteles pendientes de riego y con solo seleccionar el campo nos transfiere toda la información necesaria para pronosticar el riego, vía la interfase map object. Actualmente esta en proceso de implementación en el valle de fortaleza.

---

1,2.- UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA, UNA LA MOLINA, Lima - Perú

3 .- DPTO DE AGRONOMIA, AGROINDUSTRIA PARAMONGA SA. Paramonga, Lima, -Perú

4 .- DPTO DE INGENIERIA AGRICOLA, AGROINDUSTRIA PARAMONGA SA. Paramonga, Lima, Perú

## I.- INTRODUCCION.-

La vida en la tierra depende de dos factores fundamentales y ellos son el agua y el clima. El agua junto con el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), constituyen los elementos esenciales para la formación de la Biomasa, mediante la fotosíntesis. El agua sirve como medio de transporte y disolución de los nutrientes que la planta necesita, crea y mantiene la turgencia de las células; así como es el termorregulador de las plantas.

En la costa peruana, el agua es el factor limitante; su irregular distribución en el año y el mal manejo en el riego han determinado que se efectúen aplicaciones excesivas sobre todo en época de abundancia, causando graves problemas de drenaje en la parte baja de los valles y como resultado de esto, de 722,000 ha evaluadas, 247,000 ha (34%) presentan problemas de drenaje o salinidad en diverso grado. La Industria Azucarera Peruana con aproximadamente 95,000 ha propias sembradas con caña de azúcar, presenta de 10,000 a 15,000 ha (11 a 14%) con problemas de drenaje; índice bastante bajo debido a las obras de drenaje que se han efectuado.

El aumento de las eficiencias en el manejo del agua de riego, se logra mejorando la infraestructura existente y despejando las interrogantes ¿Cuándo, con cuánto y cómo regar? Estas interrogantes se resuelven mediante estudios de consumo de agua por el cultivo, funciones de producción del agua y el conocimiento de la capacidad de almacenamiento e infiltración de los suelos, fundamentalmente.

Para la mayor parte del área cañera peruana, donde el agua es el factor limitante de la producción, un régimen de riego eficiente debe ser determinado por una mayor productividad media en términos de mayor índice de azúcar recuperable por unidad de volumen de agua aplicada ( $\text{t/m}^3$ ) y no el índice que se usa generalmente, azúcar recuperable por unidad de superficie ( $\text{t/ha}$ ).

El objetivo del presente trabajo es hallar un modelo matemático que permita cuantificar el consumo real diario de agua por la caña de azúcar e implementar una herramienta informática "KPRONOSTICO" que permita pronosticar los estados de humedad de los campos bajo cultivo, facilitando de este modo a los administradores, la toma de decisión en la priorización del riego de los campos, especialmente en las cuencas no reguladas.

La herramienta informática desarrolla el programa fuente en lenguaje Visual Basic 6

## II.- MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se condujo en 5 áreas experimentales de alrededor 15 ha cada una, ubicadas en las empresas azucareras de Paramonga (2), Cartavio (2) y Laredo (1). Todas las observaciones de campo se realizaron en el lapso de 3 años. Los suelos de las parcelas experimentales son de origen aluvial.

### 2.1 Trabajo de campo

#### A. Ubicación y muestreo de las áreas experimentales

En la selección de las áreas experimentales se tuvo en cuenta la ubicación apropiada para el riego, así como la uniformidad del suelo en textura, para lo cual se muestreo el suelo, determinándose conductividad eléctrica y porcentaje de saturación en la pasta. Las muestras alteradas fueron obtenidas con un barreno a las profundidades: (0-30, 30-60, 60-90 cm.) con una intensidad de un punto por hectárea.

Ubicada la parcela, se procedió a sembrar y aplicar el resto de labores culturales en igual forma con el resto del campo, hasta los 4 meses de edad del cultivo, fecha a partir de la cual los riegos se aplicaron al área experimental de acuerdo a las recomendaciones técnicas generadas por el ICIA. Así mismo, a partir de esta edad aproximadamente, se realizaron muestreos de suelos para la determinación del contenido de humedad los mismo que se realizaron cada 3 a 4 días, cuidando se efectuó un muestreo 2 días después del riego y 1 día antes del próximo, labor que se repitió hasta cerca de la cosecha. Alrededor de los 10 meses de edad de la caña, se abrió una calicata para la determinación de la densidad aparente, este muestreo se realizó con anillos volumétricos de  $247 \text{ cm}^3$  a tres profundidades y 4 repeticiones por profundidad. Las muestras fueron tomadas en el centro de cada intervalo de profundidad.

## 2.2 Trabajo de laboratorio

### A. Determinación del porcentaje saturación ( $K_a$ ) y conductividad eléctrica en pasta (CEPAS)

Ambas determinaciones se hicieron según los métodos clásicos según la publicación Diagnóstico y rehabilitación de Suelos Salinos Sódicos (10)

### B. Determinación del contenido de humedad

Para esta determinación del contenido de humedad se usó el método gravimétrico, con pesadas de aproximación de 0.5 gr., temperatura a 105 grados centígrados y durante 24 horas. Posteriormente se convirtió este contenido de humedad a humedad volumétrica.

### C. Determinación de la densidad aparente ( $d_a$ )

Para la determinación de la densidad aparente se dividió la masa del suelo seco a la estufa, entre el volumen de dicha masa, es decir al volumen del muestreado que era de  $247 \text{ cm}^3$ .

### D. Toma de información meteorológica

Cerca de cada una de las áreas experimentales existía una estación meteorológica, de donde se obtuvo la información sobre la evaporación del agua libre del tanque Clase "A".

## 2.3 Procesamiento de datos

### A. Determinación de la función de avance e infiltración

Para las determinaciones de las funciones de avance e infiltración en surcos, se efectuaron pruebas de campo según el método de FINKEL y NIR, las que consistían en:

- Instalación de medidores Chamberlain tanto la entrada como a la salida.
- Instalaciones de estacas graduadas cada 20m a lo largo del surco. Su instalación se realizó en el fondo.
- Anotar el tiempo en que el agua llegaba a las estacas.
- Tomar lecturas cada 5 minutos, del tirante del agua en todas las estacas antes mencionadas.
- Tomar lecturas en los medidores Chamberlain cada minuto.

El método de FINKEL y NIR, se basa en un balance de agua en el surco, para lo cual se requiere se conozca en cada momento:

- La cantidad de agua que ingresa (VI) y la cantidad de agua que sale (VS) del surco, y
- La cantidad que queda sobre la superficie (VR).

En base a lo cual se puede determinar en cada momento, la cantidad total de agua infiltrada hasta ese momento (LI), según la relación:

$$LI = VI - (VS + VR)$$

Con esta información de campo así obtenida y la elaboración de micro programas, se determino tanto la función de avance con la función de infiltración.

#### B. Determinación de la función de evapotranspiración

En base a los datos del contenido de humedad del suelo, obtenido con los muestreos efectuados a través de todo el periodo vegetativo de la caña, se hallaron ecuaciones que permitían cuantificar el descenso del contenido de humedad a través del tiempo, con lo cual se estimaron los contenidos diarios de humedad del suelo y consecuentemente su estado energético (PSI). Luego se obtuvieron los promedios armónicos de PSI (PSIA) debido a la relación inversamente proporcional entre las variables en estudio, cada 2, 3, 4 y 5 días, así como la evapotranspiración real (E) y potencial (E<sub>o</sub>) acumulada para dicho periodo, permitiendo estimarse la relación (E/E<sub>o</sub>), en base a lo cual se grafico para cada periodo la relación PSI versus (E/E<sub>o</sub>), observándose que la mejor relación se tenía con el intervalo de 3 días. Luego se procedió a determinar el modelo que describía dicha relación, mediante el método de convergencia por diferencias finitas o prueba y error.

#### C. Programación de riegos

En base al modelo de evapotranspiración hallado se elaboraron programas para calcular los factores de consumo de agua (relación entre la evapotranspiración real y potencial), tasa de evapotranspiración real, intervalo de riego y el estado energético del agua en el suelo, para posteriormente graficarse en papel semilogarítmico, obteniéndose nomogramas para tres diferentes tipos de suelo (arcilloso, franco y arenoso), tanto para factores de consumo de agua puntuales, así como para factores de consumo de agua promedios para cualquier intervalo de riego que se trabaje. Se elaboraron tablas que contenían tipo de suelo, estado energético del agua en el suelo, requerimientos de riego, condiciones de clima (un nivel de evapotranspiración potencial dado), y nivel de salinidad del suelo. Estas tablas permiten priorizar adecuadamente el riego de los campos, lo cual ayuda para los administradores de zona y encargados de agua de una empresa azucarera, mas aun al usar la herramienta informática KPRONOSTICO.

#### D. Confiabilidad de las predicciones

Para determinar el grado de ajuste de las predicciones del nivel de humedad del suelo se efectuaron muestreos periódicos de suelo, obteniéndose así información del contenido de humedad real y que comparado con el pronóstico para dicho periodo, se puede ver el grado de ajuste de las predicciones.

### III.- RESULTADOS Y DISCUSION

El objetivo principal del trabajo es encontrar un modelo matemático que permita cuantificar la tasa de evapotranspiración real de la caña, el cual sirva de base para implementar un modelo de programación de riego, apoyado en una herramienta informática KPRONOSTICO.

#### A. Muestreos básicos

Con el objeto de expresar la variabilidad encontrada en los suelos estudiados se presenta el valor promedio y su desviación estándar. Los valores presentados proceden de una determinación individual de las muestras correspondientes a cada punto muestreado.

Se adjuntan los datos correspondientes a la unidad experimental de Carretería Alta, Paramonga. Los campos muestreados en esta investigación son de textura media (Pucuche y Carretería Alta) a ligeramente fina (Monjas I y Luisiana), y presenta una variabilidad aceptable para trabajos de campo (CV= 25%). En cuanto al nivel de salinidad, también se ubica dentro del rango óptimo para el cultivo de la caña de azúcar. Los resultados de la densidad aparente son el promedio de 4 repeticiones por profundidad y con variabilidad aceptable.

#### B. Muestreos de humedad

Las determinaciones periódicas del contenido de humedad se hicieron mediante el método gravimétrico y son el promedio de 4 repeticiones por punto y por profundidad. En cuanto a la variabilidad de los resultados se puede decir que es aceptable y esta no supera el 25%.

Para el cálculo de las ecuaciones de descenso de humedad correspondiente al intervalo entre dos riegos consecutivos, se utilizó el promedio de 3 profundidades (0-30, 30-60, 60-90 cm.). El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de todas las ecuaciones halladas es bastante alto, lo cual da confiabilidad a las predicciones de los contenidos de humedad que se utilizaron para estimar los consumos reales de agua por la caña de azúcar (E) y el correspondiente estado energético del agua en el suelo. En cuanto a los contenidos de humedad promedio de 3 profundidades de muestreo, esto se hizo por practicidad, recomendación de EPPINK y HUSZ, pues entre otros se complicaría grandemente, encontrar modelos generales por profundidad, pues en el consumo de agua por profundidad intervienen otras variables tales como: variedades, distribución de raíces, tipo de suelo; etc. Además si se tiene en cuenta que con un programa de pronósticos de riego en caña de azúcar, lo que se busca es solo dar un elemento de juicio acerca del estado de humedad de los campos de una empresa de gran extensión bajo riego, en base a lo cual, tomar decisiones respecto a que área se debe priorizar en el riego.

#### C. Evaporación libre del tanque clase "A"

Se usaron datos meteorológicos de las estaciones del ICIA, consideradas representativas para los campos de los ensayos, por su proximidad (aproximadamente 2 Km. de distancia). Los meses más bajos de evaporación son Junio, Julio y Agosto ( 3.3 mm/día). En cuanto al uso de esta característica climática en modelos de evapotranspiración es bastante significativo, dado que se trata de un integrador de varias características climáticas y su medición es bastante fácil. Comparando los datos de las estaciones de la Empresa Cartavio y la de ICIA (ubicadas en el mismo valle), se puede observar que Cartavio tiene ligeramente una mayor tasa de evaporación, lo cual se debe fundamentalmente a las mayores corrientes de vientos, por su cercanía al mar

#### D. Variables consideradas en el análisis de regresión

La variable  $E / E_0$  que en el modelo constituye la variable dependiente y la variable estado energético promedio (promedio armónico) del agua en el suelo ( ) para dicho intervalo y que en el modelo constituye la variable independiente. El intervalo de tiempo que se usó en el cálculo de los estados energéticos promedio en tres días (  $t = 3$  días), por ser el más recomendable según pruebas efectuadas anteriormente.

#### E. Modelo de evapotranspiración hallado

El modelo de evapotranspiración hallado se presenta a continuación, pudiéndose observar que el coeficiente de determinación es bastante alto ( $R^2=0.7921$ ) y de alta significación estadística (99% de probabilidades). Se tiene un buen grado de ajuste.

Haciendo un análisis de las ecuaciones halladas por EPPINK (4) y comparándola con la hallada en el presente trabajo se puede decir que esta última ecuación es la tendencia intermedia a los reportados por el mencionado investigador. En comparación al modelo reportado por KINKAID y HEERMAN (en Vásquez (10)), usado en programas de predicción del contenido de humedad del suelo, se puede decir que este modelo permite una sobre estimación del consumo de agua por la caña de azúcar, además dicho modelo utiliza el factor de tensión (que en el modelo hallado en el presente trabajo está dado por el estado energético), el cual varía de 0 a 1 y no indica el estado fisiológico de la caña (grado de disponibilidad del agua hacia a la planta) que si se toma en cuenta en el modelo hallado en el presente trabajo.

$$E = \frac{1.17 * E_o}{1 + \phi^{1.5} / 4.8}$$

$$R^2=0.7921$$

Donde:

E = Evapotranspiración real (mm)

$E_o$  = evaporación libre de tanque clase "A" (mm)

= Estado energético del agua en el suelo

#### F. Modelo de programación de riegos

En cuanto a los resultados obtenidos en el presente trabajo representativos para tres tipos de suelo ( $K_a=22.5$ ,  $K_a=42.5$  y  $K_a=62.5$ ) y que puedan usarse para efectuar una adecuada programación de riegos se presentan bajo tres formas, como nomogramas, como tablas y a través de la herramienta informática KPRONOSTICO.

Este modelo trabajado con KPRONOSTICO, requiere que se le ingrese datos como: evapotranspiración potencial ( $E_o$ ), la conductividad eléctrica en la pasta de saturación del suelo (cepas), el porcentaje de saturación del agua en el suelo (cifra arany), profundidad radicular, eficiencia de riego y se encontrara intervalo de riego, su estado energético del agua en el suelo a esos días, el volumen requerido de agua por ha ( $m^3/ha$ ).

El mismo modelo trabajado con tablas y figuras, requiere que se ingrese la evapotranspiración potencial (E), el número de días transcurrido desde el último riego (INT) o el estado energético del agua en el suelo y se obtendrá la evapotranspiración real de la caña y el factor de consumo de agua.

#### G. Confiabilidad de las predicciones

En el cuadro adjunto se presentan datos de contenidos de humedad medido en el campo y estimado según los modelos hallados en el presente trabajo, donde se puede ver que las estimaciones se encuentran dentro de un rango aceptable de tolerancia, lo cual es de bastante significación práctica y

de seguridad en su aplicación. En el cálculo de las humedades promedio (datos de campo) se obtuvieron coeficientes de variabilidad menores de 20%.

### COMPARACION DE HUMEDADES MEDIDAS Y PRONOSTICADAS, SEGÚN MODELO HALLADO, CAMPO CHONCOP DE CASA GRANDE

| INTERVALO EN DIAS (ultimo riego) | ESTADO ENERGETICO (bares) | HUMEDAD PRONOSTICADA (% vol) | HUMEDAD MEDIDA (% vol) |
|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| 3                                | 0.61                      | 40.3                         | 40.7                   |
| 9                                | 0.69                      | 37.9                         | 39.3                   |
| 16                               | 0.91                      | 35.1                         | 36.7                   |
| 25                               | 1.51                      | 33.1                         | 32.1                   |
| 30                               | 2.29                      | 30.3                         | 31.8                   |
| 40                               | 4.34                      | 27.7                         | 31.9                   |
| 53                               | 7.38                      | 25.7                         | 29.6                   |
| 60                               | 8.98                      | 24.9                         | 25.9                   |
| 63                               | 9.49                      | 24.7                         | 24.3                   |
| 75                               | 11.83                     | 23.8                         | 24.4                   |
| 80                               | 12.87                     | 23.4                         | 24.4                   |
| 106                              | 17.53                     | 22.1                         | 22.9                   |
| 115                              | 19.18                     | 21.7                         | 22.6                   |

#### H. Herramienta Informática KPRONOSTICO

De acuerdo a todas las variables estudiadas y al modelo matemático obtenido, se procedió a programar el software, elaborando para ello diagramas de flujo y de bloques respectivamente. Se acondiciono la variable eficiencia de aplicación dentro de un mayor rango, para permitir al usuario seleccionar en forma amigable este valor, que debe ser información levantada de campo.

Se introdujo al programa un manejador de mapas temáticos, que permite seleccionar un determinado campo y mostrar la información de textura, variedad, área, conductividad eléctrica en la pasta del suelo, eficiencia de aplicación y la evapotranspiración del tanque, etc. Facilitando de esta manera en forma espacial el manejo de la información necesaria para el cálculo y programación de riego.

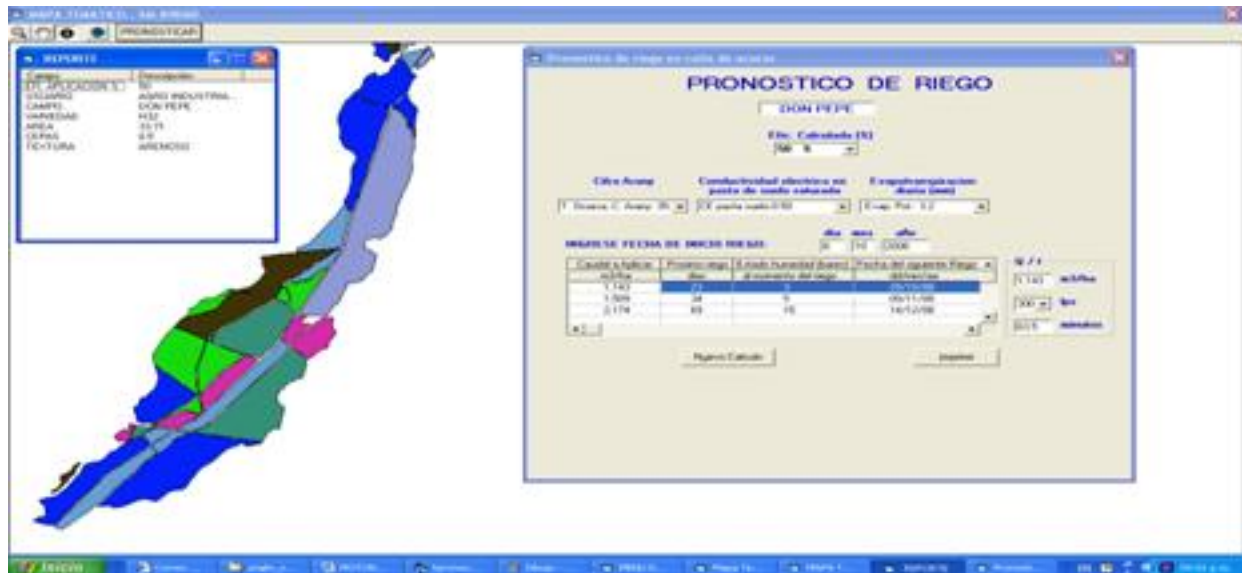
Toda esta información se plasmo en un programa fuente usando para ello el Visual Basic y Map Object.

#### H.1- MENU DE OPCIONES DE SOFTWARE KPRONOSTICO



Menú.- Donde se muestran las opciones PRONOSTICO DE RIEGO, PROGRAMACION, MANTENIMIENTO, REPORTES, APOYO TEMATICO, ACERCA DE Y SALIR. La opción PRONOSTICO DE RIEGO, muestra tres sub opciones dentro de la cual esta PRONOSTICO RIEGO CAÑA DE AZUCAR

## H.2- VENTANA DE CALCULOS Y RESULTADOS CON AYUDA DE MAPA TEMATICO



## IV.- CONCLUSIONES

- El modelo hallado presenta un coeficiente de determinación bastante alto ( $R^2=0.792$ ), una alta significación estadística y permite calcular la evapotranspiración real de la caña de azúcar.
- Los resultados de la programación de riegos que se obtienen con el modelo hallado y apoyada en la herramienta informática KPRONOSTICO, son de bastante aplicabilidad práctica; y se ajustan bien a los datos que se pueden observar a nivel de campo. Dichos resultados son aplicables a campos sin problemas de drenaje.
- Los resultados del presente trabajo, al igual que la herramienta informática son de utilidad en la Industria Azucarera Peruana.
- El modelo hallado, permite en forma confiable para suelos comprendidos entre francos arenosos y suelos francos planificar el riego en Caña de Azúcar para óptimos rendimientos.
- El software Kpronostico permite en forma práctica y clara hacer uso de los mapas temáticos para la visualización y capturar de la data necesaria para pronosticar los riegos.

## V.- RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer nuevas observaciones a nivel de campo en suelos arenosos y muy pesados ( $K_a < 25$  y  $K_s > 60$ ) para ajustar aun mejor el modelo. Este porcentaje de los mencionados suelos es bajo en la industria azucarera actual, por lo que podemos decir que constituyen casos particulares en el modelo general, pues los trabajos conducidos a nivel de campo deben arrojar resultados que puedan ser aplicados a la mayor área estudiada.
- Bajar el software KPRONOSTICO de la WEB de la Universidad Nacional Agraria La Molina y poner en práctica el modelo de pronóstico de riego.

## VI.- BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, A. G., 1973, Sugarcane physiology. Elsevier, Amsterdam. 752 p.
2. BAVER, L. D., 1956, Soil physics. 5ta Ed. John Wiley and Sons, New York. 489 p.
3. CANAMERO, M & LAGUNA T., 2003, Kgoteo Software para el diseño de sistemas de riego por goteo. 1ra Ed. CONCYTEC, Lima .125 p.
4. EPPINK, L.D., 1974, Relaciones agua-suelo-planta. Boletín Técnico ICIA 3(1):40-51p.
5. EPPINK, L.D., 1972, Las bases del Servicio de Control de Humedad y sus Aplicaciones Practicas. Boletín Técnico ICIA 1(2):1-55 p.
6. FUENTES, Y.J., 2003. Técnicas de Riego. 4ta Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 45-121 p.
7. GEAR, ROY D. et al. 1997. Irrigation scheduling with neutron probe. Journal of the irrigation and drainage division. A SCE, 103(IR3):291-298 p.
8. HALVORSON, M., 2002, Microsoft Visual Basic.Net, Editorial McGraw-Hill
9. HUSZ, G.S., 1977, Cuantificación del régimen de agua en el suelo para la optimización del riego. Proc. ISSSCT 16.
  
10. VASQUEZ, V.A. Y W. IGLESIAS L., 1978., Pautas para una programación del riego. Boletín técnico ICIA 7 (1-2):69-77.
11. VASQUEZ, V. A. Y A. HOEKSTRA, 1975. El servicio de Control de Humedad y sus Fases de Investigación. Boletín Técnico ICIA 4 (3-4):85-115.
12. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA, 1954., Diagnostico y Rehabilitación de Suelos Salinos Sódicos. Manual de Agricultura 60, Washington.