



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

SERVICIO DE RIEGO MEDIANTE INTERNET Y DISPOSITIVOS MÓVILES

GRACIANO JAVIER AGUADO RODRÍGUEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2013

La presente tesis titulada: **Servicio de riego mediante internet y dispositivos móviles**, realizada por el alumno: **Graciano Javier Aguado Rodríguez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS


CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR



DR. MARTINIANO CASTRO POPOCA

ASESOR



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR



DR. MARIO ALBERTO VAZQUEZ PEÑA

ASESOR



DRA. BERTHA PATRICIA ZAMORA MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el valioso apoyo económico que me brindó durante mis estudios.

Al Colegio de Postgraduados, por haberme aceptado para realizar estudios de postgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por haberme brindado estudios de licenciatura.

A los profesores de los diferentes cursos que llevé en Hidrociencias, por brindarme el conocimiento para poder llevar a cabo la investigación realizada.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco, por ser el apoyo moral, académico y administrativo, además de ser el guía en la investigación que se elaboró y haberle dedicado tiempo a culminar el proyecto.

Al Dr. Martiniano Castro Popoca por su valiosa contribución en el desarrollo de la investigación realizada.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por contribuir con su valiosa experiencia en la investigación desarrollada.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por brindar el apoyo estadístico para validar la investigación.

A la Dra. Bertha Patricia Zamora Morales por otorgar valioso tiempo en la investigación desarrollada.

DEDICATORIA

A mi madre, María Dolores Rodríguez, porque es un ejemplo vivo del esfuerzo, dedicación, superación continua y representa a las personas que tratan de ser mejores día a día.

A mi padre, Graciano Aguado Lara, una persona animada y con mucha curiosidad que está siempre dispuesto a navegar en la tormenta o asistir a algún sitio raro con tal de descubrir un nuevo sabor.

Al mis hermanos:

Edna Melissa Aguado Rodríguez, la revolucionaria.

Sebastián Benjamín Aguado Rodríguez, misterioso como los felinos.

Manuel Emilio Aguado Rodríguez, el confiado.

A mi Mech, una mujer divertida y curiosa, siempre en busca de cumplir su sueño.

A mis amistades con los que hemos ido al infierno (no es ningún bar) pero también vuelto y contado que hay ahí.

A mí mismo, por permitirme disfrutar el proceso de aprendizaje durante mi estancia en el Doctorado.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
II. OBJETIVO GENERAL	3
III. LITERATURA CITADA	4
CAPÍTULO I	8
SERVICIO DE RIEGO MEDIANTE INTERNET Y DISPOSITIVOS MÓVILES EN LA ZONA DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS	8
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. MATERIALES Y MÉTODOS	12
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4. CONCLUSIONES	24
5. LITERATURA CITADA	24
CAPÍTULO II	29
INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN TIEMPO REAL POR MEDIO DE LA LIBRERÍA AKIMA	29
RESUMEN	29
ABSTRACT	30

1. INTRODUCCIÓN.....	31
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
2.1. Información meteorológica	33
2.2. Base de datos.....	35
2.3. Software de interpolación	36
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4. CONCLUSIONES	43
5. LITERATURA CITADA.....	43
CAPÍTULO III.....	48
PREDICCIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS POR MEDIO DE MODELOS	
ARIMA.....	48
RESUMEN.....	48
ABSTRACT.....	49
1. INTRODUCCIÓN.....	50
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	51
2.1. Datos meteorológicos.....	53
2.2. Estimación de la predicción.....	54
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4. CONCLUSIONES	64
5. LITERATURA CITADA.....	64
CAPÍTULO IV.....	68
ALERTA Y PREDICCIÓN DE RIEGO MEDIANTE DISPOSITIVOS MÓVILES	
RESUMEN.....	68

ABSTRACT.....	69
1. INTRODUCCIÓN.....	70
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	71
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	81
4. CONCLUSIONES.....	83
5. LITERATURA CITADA.....	83
IV. CONCLUSIONES GENERALES.....	87

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I.

Cuadro 1. Estadísticas de la regresión entre el WVC medido con los sensores 10HS y el WVC estimado con el BHC.	23
---	----

CAPÍTULO II.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas consideradas en el estudio.....	34
Cuadro 2. Estadísticas de regresión de las estimaciones.	41

CAPÍTULO III.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas consideradas en el estudio.....	53
Cuadro 2. Valores del coeficiente de eficiencia de modelo de Nash-Sutcliffe para las variables meteorológicas de las tres EMAS en ambos periodos analizados.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I.

Figura 1. Modelo Entidad Relación de la base de datos MYDB.	14
Figura 2. Acceso al sistema.....	15
Figura 3. Datos requeridos para registro de parcela de un usuario de nivel dos.	16
Figura 4. Datos que puede editar el usuario nivel uno.....	16
Figura 5. Página de acceso a un usuario nivel dos.....	17
Figura 6. Funciones realizadas para calcular el balance hídrico climático a nivel horario.	19
Figura 7. Contenido volumétrico de agua en el suelo medido y estimado a las 00:00 horas de cada día analizado.....	22
Figura 8. Regresión del contenido volumétrico de agua en el suelo medido y estimado.....	23

CAPÍTULO II.

Figura 1. Ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).	35
Figura 2. Archivo de coordenadas de parcelas o EMAS.	37
Figura 3. Información meteorológica disponible de las EMAS, con su ubicación geográfica... 37	
Figura 4. Funciones que realiza la tarea programada para el cálculo de interpolación espacial. 38	
Figura 5. Temperatura estimada contra temperatura real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).....	39
Figura 6. Humedad relativa estimada contra humedad relativa real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).....	39
Figura 7. Evapotranspiración de referencia estimada contra evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman-Monteith para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).....	40

Figura 8. Radiación solar estimada contra radiación solar real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).	40
Figura 9. Velocidad del viento estimada contra velocidad del viento real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).	40

CAPÍTULO III.

Figura 1. Base de datos.	53
Figura 2. Archivo de texto con variables meteorológicas.....	55
Figura 3. Archivo generado con datos de la predicción estimada del programa “R Statistics 2.15.3” para la EMA Acolman y la variable meteorológica radiación solar (W/m^2).	56
Figura 4. Predicción y diagrama de dispersión de la temperatura para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).	58
Figura 5. Predicción y diagrama de dispersión de la temperatura para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).	58
Figura 6. Predicción y diagrama de dispersión de la radiación solar para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).	59
Figura 7. Predicción y diagrama de dispersión de la radiación solar para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).	59
Figura 8. Predicción y diagrama de dispersión de la evapotranspiración (calculada con la metodología de Allen (2006)), para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).	60
Figura 9. Predicción y diagrama de dispersión de la evapotranspiración (calculada con la metodología de Allen (2006)), para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).	60

Figura 10. Predicción y diagrama de dispersión de la humedad relativa para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).	61
Figura 11. Predicción y diagrama de dispersión de la humedad relativa para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).	61
Figura 12. Predicción y diagrama de dispersión de la velocidad del viento para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) para el primer periodo (Marzo).	62
Figura 13. Predicción y diagrama de dispersión de la velocidad del viento para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) para el segundo periodo (Junio).	62

CAPÍTULO IV.

Figura 1. Tablas de datos del sistema de alertas por vía celular.	73
Figura 2. Servicio de alertas de humedad de suelo en las parcelas.	79
Figura 3. Servicio de consulta con respuestas automáticas vía teléfono celular para conocer las horas con humedad fácilmente aprovechable disponibles en una parcela.	81
Figura 4. Mensaje recibido por el sistema de alertas indicando el número de parcela y la lámina de riego para obtener la humedad a capacidad de campo en el suelo (visualizado con el software Nokia PC Suite).	81
Figura 5. Mensaje enviado al sistema de consulta con respuestas automáticas indicando el nombre de quien envía el mensaje, el número de parcela y la palabra grupo separados por coma (visualizado con el software Nokia PC Suite).	82
Figura 6. Mensaje recibido por el sistema de consulta con respuestas automáticas indicando la cantidad de horas con humedad fácilmente aprovechable y la lámina de riego requerida para obtener humedad a capacidad de campo en el suelo (visualizado con el software Nokia PC Suite).	82

SERVICIO DE RIEGO MEDIANTE INTERNET Y DISPOSITIVOS MÓVILES

Graciano Javier Aguado Rodríguez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2013

RESUMEN

Hoy en día existe la tecnología para realizar actividades de manera automática y en tiempo real en diversos campos de la investigación. Entre las aplicaciones más importantes en agricultura destaca la automatización del riego, determinación del momento del riego y cálculo de la lámina de riego necesaria para abastecer al suelo de alguna parcela y llevarlo a tener humedad a capacidad de campo. Por ello en esta investigación se planteó elaborar un sistema integrado que sea capaz de estimar el Contenido Volumétrico de Agua en el Suelo (WVC) de varias parcelas mediante el cálculo de un Balance Hídrico Climático (BHC) a nivel horario con el método de Allen (2006). Adicionalmente, en caso de tener disponibilidad de una red de estaciones meteorológicas, se elaboró una aplicación que realiza interpolación espacial a nivel horario para estimar las variables meteorológicas en las diferentes parcelas en donde se realiza el BHC. Cabe mencionar que después de lo anterior se elaboró una aplicación que realiza la predicción del número de horas con Humedad Fácilmente Aprovechable (HFA) que tiene el suelo de las diferentes parcelas para que el productor encargado de alguna parcela pueda planear adecuadamente el momento del próximo riego. Finalmente se elaboró una aplicación para enviar alertas de riego y consulta de horas con HFA en el suelo vía teléfono celular mediante el uso del Servicio de Mensajes Cortos (SMS) para mantener informado al encargado de alguna parcela. Se encontró con esta investigación que si es posible conocer en todo momento (cada hora) el WVC de cualquier parcela y además el SMS es confiable para mantener informado a los encargados de las parcelas sobre el estado de humedad del suelo.

Palabras clave: contenido volumétrico de agua en el suelo, teléfono celular, variables meteorológicas, predicción, interpolación espacial.

IRRIGATION SERVICE THROUGH INTERNET AND MOBILE DEVICES

Graciano Javier Aguado Rodríguez, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2013

ABSTRACT

Today exists the technology to automate in real-time and in various fields of research. Among the most important applications in agriculture highlights the automation of irrigation, irrigation moment estimation and calculation of the irrigation depth needed to supply the soil in a plot and bring it to have moisture at field capacity. Therefore, in this research it was developed an integrated system that is able to estimate the volumetric water content in the soil of several plots by calculating the hourly climatic water balance (BHC) with the method of Allen (2006). Additionally, in case of availability of a network of weather stations, it was developed an application that performs spatial interpolation to estimate the hourly meteorological variables in the different plots where BHC is performed. It is noteworthy that after the above it was developed an application that makes prediction of the number of hours with soil moisture easily available that contains the different plots for the producer in charge of a plot can plan properly the time of the next irrigation. Finally, we developed an application to send alerts irrigation and to consult hours with soil moisture easily available via cell phone by using Short Message Service (SMS) to keep informed the user of any parcel. It was found in this research that it is possible to know at all times (hourly) volumetric water content in the soil of any plot and also the SMS is reliable to keep users informed of the plots soil moisture status.

Keywords: volumetric water content in the soil, cell phone, meteorological variables, prediction, spatial interpolation.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México existe un grave problema de sobreexplotación de acuíferos. Ochenta de los 188 acuíferos más importantes que abastecen el 66% del agua que se utiliza en el país y en los que se capta el 79% de la recarga de agua subterránea se encuentran sobreexplotados (Ávila *et al.*, 2005). La actividad agrícola es por sí sola la que más agua consume, con 77.8% del total; el restante 22% se distribuye de la siguiente manera: 11.5% el sector público, 2.2% la industria y 8.5% el sector pecuario (CNA, 2003). Las pérdidas en la actividad de riego son muy altas, sobre todo en el proceso de extracción: 35% se desperdicia por evaporación o por fallas durante la conducción. También existen desperdicios y mal aprovechamiento en donde se emplea el riego por inundación sin control y además ocasiona salinización en los suelos (Sainz y Becerra, 2003). Además, la escasez de agua para riego en México será un problema mayor en los años venideros, por lo que el uso racional del agua es fundamental para mejorar el ingreso de los productores y proteger al ambiente (Hernández *et al.*, 2001).

Cabe mencionar que debido a lo anterior, se han propuesto investigaciones para definir la cantidad y momento del riego en las parcelas apoyándose con tecnología avanzada que puede ayudar a estimar elementos climáticos y factores edáficos. Allen (1998) propuso un método indirecto para estimar el Balance Hídrico Climático en el suelo (BHC), Águila (2003), utilizó datos de suelo cultivo y elementos meteorológicos para determinar el riego en tiempo real mediante un sistema automatizado. La limitante para aplicar métodos indirectos para calcular el BHC es que los datos meteorológicos por lo general no están fácilmente disponibles y son a menudo difíciles y caros de adquirir (Yao *et al.*, 2013). Por ello se han desarrollado estrategias para estimar datos meteorológicos en donde no los hay por medio del uso de métodos de

interpolación espacial. Hay que tener en cuenta que algunos métodos de interpolación son bastante sofisticados, cosa que los hace difíciles de aplicar operativamente (Chen *et al.*, 2010). Daly (2006) afirmó que no existe un solo método de interpolación espacial que puede funcionar bien en todas partes, sin embargo, Renka y Brown (1999) concluyeron que uno de los mejores algoritmos de interpolación espacial para un conjunto de nodos denso o disperso es el Algoritmo 761 y se le han realizado mejoras (De Tisi y Valtulina, 2000), y se encuentra incluido en la librería *akima* (Akima *et al.*, 2013) del paquete de cómputo estadístico R Statistics 2.15.3 (Dalgaard, 2008).

Es importante añadir que otra limitante muy importante en la agricultura, es la planeación del riego. Para resolver esto se han desarrollado programas de cómputo para planear el riego como el CROPWAT, calcula la evapotranspiración de referencia y los requerimientos de agua de los cultivos y simula el uso del agua por los cultivos bajo diferentes condiciones de clima, cultivos y suelos (Arteaga *et al.*, 2011). Adicionalmente se cuenta con otras herramientas tales como las aplicaciones de predicción del tiempo a medio plazo y estacional del clima (Vitart *et al.* 2012). Los algoritmos de predicción automáticas más populares son con base en el suavizado exponencial o modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) (Hyndman and Khandakar, 2008). Con los modelos ARIMA se han realizado varias investigaciones, tales como la demanda de agua en las próximas 24 horas en un sistema de distribución de agua para riego (Pulido, 2002), predicción de la lluvia del monzón en la India (Chattopadhyay y Chattopadhyay, 2010; Narayanan *et al.*, 2013), entre otros. Es importante indicar que el programa de cómputo R Statistics 2.15.3 (Dalgaard, 2008) puede realizar la estimación de los modelos ARIMA por medio de la librería 'forecast' (Hyndman *et al.*, 2013).

Es conveniente indicar que no siempre se puede tener acceso a una computadora, sin embargo, es deseable mantener informado al agricultor en todo momento sobre el estado de humedad del suelo de su parcela. No obstante, lo anterior se puede resolver utilizando el Servicio de Mensajes Cortos (SMS) de los teléfonos celulares, mediante los cuales, se pueden enviar alertas y consultas de manera automática. Algunos investigadores como Huo *et al.* (2012), Xie *et al.* (2013), Rahali *et al.* (2011), entre otros, han utilizado el SMS de los teléfonos celulares para realizar diferentes proyectos de investigación y han encontrado el SMS adecuado para su uso en la investigación y aplicación.

Por lo anterior, en la presente investigación se integraron las tecnologías de internet para visualizar el estado de humedad de suelo de las parcelas, métodos: de cálculo de BHC para estimar la humedad del suelo de las parcelas, de interpolación espacial para estimar variables meteorológicas en cualquier punto deseado, de predicción para estimar el estado de humedad de suelo en la parcela en el futuro y el SMS de los teléfonos celulares para alertar y ofrecer consultas a los usuarios sobre el estado de humedad de suelo de su parcela.

II. OBJETIVO GENERAL

- Dar recomendaciones del requerimiento de agua a las diferentes unidades (cultivo parcela) del área de influencia del Colegio de Postgraduados mediante dispositivos móviles y utilizando una red de estaciones meteorológicas automáticas.

III. LITERATURA CITADA

Águila M., F. 2003. Entwicklung eines vollautomatischen Bewässerungsregelungs systems für den Freilandgemüsebau. Verlag Grauer, Beuren - Stuttgart, Alemania. ISBN 3-86186-434-7. 143 p.

Akima, H., A. Gebhardt, T. Petzoldt, and M. Maechler. 2013. Akima: Interpolation of irregularly spaced data. R package version 0.5-9. <http://CRAN.R-project.org/package=akima>. Accessed January 2013.

Allen, R. G.; Pereira, L. S. and Raes, D. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization (FAO), Irrigation and Drainage, Paper No. 56. p. 321.

Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization (FAO), Vol. 56.

Arteaga Ramírez, R., Ángeles Montiel, V., & Vázquez Peña, M. A. 2011. Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(2), 179-195.

Ávila, S., Piña, C. M., Jaramillo, L., & Cruz, A. L. M. 2005. Un análisis del subsidio a la tarifa 09. Gaceta ecológica, (75), 65-76.

Chattopadhyay, S., & Chattopadhyay, G. 2010. Univariate modelling of summer-monsoon rainfall time series: comparison between ARIMA and ARNN. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(2), 100-107.

Chen, D. L., T. H. Ou, L. Gong, C.-Y. Xu, W. J. Li, C.-H. Ho, and W. H. Qian. 2010. Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951–2005. *Advances in Atmospheric Sciences* 27(6): 1221–1232.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2003. *Estadísticas del agua en México*, México: Comisión Nacional del Agua.

Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R. Second Edition*. Springer Science Business Media, LLC. New York, NY, USA. 364p.

Daly, C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology* 26: 707–721.

De Tisi, F. and A. Valtulina. 2000. Remark on algorithm 761: scattered-data surface fitting that has the accuracy of a cubic polynomial. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 26(1): 46-48.

Hernández, P. P., Méndez, L. R., Barra, J. D. E., Pimentel, L. R., Huerta, H. V., & Morales, J. C. 2001. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia*, 35(6), 577-588.

Huo, Z. P., Wei, Z. Y., & Tang, Y. P. 2012. A Remote Control System Based on Short Messaging Service for Intelligent Agricultural Irrigation. *Applied Mechanics and Materials*, 190, 1104-1108.

Hyndman R. J., Athanasopoulos G., Razbash S., Schmidt D., Zhou Z., Khan Y., Bergmeir C. 2013. Forecasting functions for time series and linear models. R package version 4.06. <http://cran.r-project.org/web/packages/forecast>. Accessed June 2013.

Hyndman, R.J. and Khandakar, Y. 2008. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26(3).

Narayanan, P., Basistha, A., Sarkar, S., & Kamna, S. 2013. Trend analysis and ARIMA modelling of pre-monsoon rainfall data for western India. *Comptes Rendus Geoscience*.

Pulido C., I.; Roldán C., J.; López L., R. & Gutiérrez E., J. C. 2002. Técnicas de predicción a corto plazo de la demanda de agua. Aplicación al uso agrícola. *Ingeniería del agua* 9 (3).

Rahali, A., Guerbaoui, M., Ed-dahhak, A., El Afou, Y., Tannouche, A., Lachhab, A., & Bouchikhi, B. 2011. Development of a data acquisition and greenhouse control system based on GSM. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8), 297-306.

Renka, R. J., & R. Brown. 1999. Algorithm 792: accuracy test of ACM algorithms for interpolation of scattered data in the plane. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 25(1): 78-94.

Sainz, J., & Becerra, M. 2003. Los conflictos por el agua en México. *Gaceta Ecológica*, (67), 61-68.

Vitart, F., Robertson, A. W., & Anderson, D. L. 2012. Proyecto de predicción subestacional a estacional: tendiendo un puente entre el tiempo y el clima. *Boletín de la OMM*, 61(2), 23.

Xie, S. Y., Peng, H., Bao, A. H., Qiu, H. L., & Chen, C. 2013. The Application Research on Remote Monitoring and Controlling System in Irrigation Pumping Station. *Applied Mechanics and Materials*, 278, 1658-1663.

Yao, X., B. Fu, Y. Lü, F. Sun, S. Wang, and M. Liu. 2013. Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment. *PLoS ONE* 8(1):1-13.

CAPÍTULO I.

SERVICIO DE RIEGO MEDIANTE INTERNET Y DISPOSITIVOS MÓVILES EN LA ZONA DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

¹*Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.* ²*Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.* ³*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.*

RESUMEN

En la actualidad se dispone de herramientas para conocer en tiempo real los requerimientos de riego de las plantas. El objetivo de esta investigación fue crear un sistema para dar recomendaciones de necesidades de agua a las diferentes unidades (cultivo parcela) del área de influencia del Colegio de Postgraduados mediante internet y dispositivos móviles. El estudio se llevó a cabo en las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo y se desarrolló en diferentes fases. La primera consistió en conectar una estación meteorológica Campbells con un servidor e instalar las aplicaciones necesarias para obtener mediciones de los elementos meteorológicos y almacenarlos en una base de datos en MySQL. Posteriormente se creó un sitio web cuyo objetivo es obtener datos necesarios para realizar balances hídricos. Los datos se almacenaron en tablas de datos contenidas en el gestor de base de datos MySQL (Kofler, 2005). La última interface consistió en implementar el servicio de mensajería por medio de un celular en el momento que se requiera el riego. Los resultados mostraron que se puede tener un sistema automatizado que informe constantemente el estado de humedad en la parcela al usuario.

Palabras clave: Balance hídrico, sitio web, tiempo real.

IRRIGATION SERVICE THROUGH INTERNET AND MOBILE DEVICES IN THE AREA OF THE COLEGIO DE POSTGRADUADOS

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

ABSTRACT

Actually, there are many tools for real-time information about irrigation requirements in the plants. The objective of this research was to create a system for water needs recommendations to the different units of the area of influence of the Colegio de Postgraduados through internet and mobile devices. The study was performed on the area of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo and developed in different phases. The first one was to connect the weather station to the server and install the necessary applications to obtain measurements from the elements and store them in a MySQL database. Subsequently, a website was created, and its goal is to obtain data needed to perform water balances. The data were stored in datatables in the MySQL software (Kofler, 2005). The last interface was created to implement the messaging service with a cell phone when irrigation is required. The results showed that you can have an automated system that is constantly informing to the user the state of moisture in the plot.

Keywords: Water balance, website, real time.

1. INTRODUCCIÓN

El riego abastece a la planta el agua necesaria para su crecimiento y desarrollo. Cabe mencionar que es de vital importancia cuidar el recurso agua ya que se estima que la eficiencia en el uso del agua de riego, es aproximadamente del 38% en el mundo y en el año 2030 mejorará hasta llegar a un promedio del 42%, con ayuda de la tecnología y mejor administración del riego (UN, 2003). Es por esto que es necesario hacer más eficiente el manejo del recurso agua tanto para satisfacer las necesidades humanas como las de los cultivos. Palacios y Exebio (1989) señalan que el riego es tan importante, que en algunos distritos de riego del suroeste de los Estados Unidos de América, técnicos del gobierno federal y estatal asesoran a los usuarios y les indican cuando deben regar. En la actualidad se cuenta con varias herramientas, entre ellas, el uso de sistemas de riego, y la automatización. Con estas, se puede conocer el momento del riego de acuerdo a las necesidades de la plantas para mantenerlas con nivel de hidratación adecuado y con la menor cantidad de uso del recurso agua y así evitar una deficiencia hídrica que podría afectar la productividad de los cultivos (Calvache *et al.*, 1997). Para definir el momento del riego se dispone de mediciones de elementos climáticos (temperatura, radiación solar, precipitación, entre otras) y factores edáficos (textura del suelo, humedad del suelo entre otras). Con ellos, el sistema puede conocer el momento ideal en el que se requiere aplicar el riego y en tiempo real ejecutarlo. Algunos investigadores como Allen (1998) han propuesto metodologías para automatizar el riego mediante funciones que modelan el comportamiento de la planta. Adicionalmente, entre las herramientas con las que se cuenta para encontrar mediciones de las variables para determinar momentos de riego, se tienen entre otras, estación meteorológica, indica el estado del tiempo en todo momento ya que mide variables meteorológicas y las envía a cualquier dispositivo en el que se puede procesar la información (computadora); software de

programación, con el que se indica a la computadora las operaciones necesarias para tomar decisiones; servicio de internet, al que se le pueden subir datos y hacer uso de ellos desde cualquier ubicación en donde se cuente con una computadora; celular, con esta herramienta se conecta a cada usuario e informarle lo que está ocurriendo en su parcela en tiempo real. Cabe mencionar que en algunos lugares se han creado redes de estaciones meteorológicas para ayudar a los agricultores a utilizar de manera adecuada sus recursos hidráulicos. El AZMET (Arizona Meteorological Network), opera en el sur y centro de Arizona y cuenta actualmente con 27 estaciones meteorológicas automatizadas.

Por otra parte, también se han realizado estudios para optimizar el uso del agua. Bralts *et al.* (1986) elaboraron un programa de cómputo llamado SCS-Scheduler, para automatizar el riego con un Datalogger y controles de encendido y apagado de dispositivos. Wessels *et al.* (1995) elaboraron un sistema que controlara el riego por medio de una computadora, que almacena datos meteorológicos, calculó la evapotranspiración y controló el nivel de salinidad en el agua. Al igual que los anteriores, Xin *et al.*, (1995) realizaron un sistema para el manejo de riego en tiempo real enfocado a la protección contra heladas y control de fertilización en cítricos. En otra investigación se desarrolló un programa de cómputo llamado AUTRI ver. 1.0, tiene las opciones de determinar el riego por estimación de balance hídrico o mediante mediciones de electrotensiómetro para determinar el momento del riego (Moreno *et al.*, 1996). Cabe mencionar que Águila (2003), utilizó datos de suelo cultivo y elementos meteorológicos para determinar el riego en tiempo real mediante un sistema automatizado. Lugo *et al.* (2011) mostró un prototipo funcional, con base en la integración de tres tecnologías, computación, comunicaciones y electrónica para automatizar el control del riego para sistemas cerrados o abiertos.

Por lo anterior, se planteó esta investigación con el objetivo principal de conocer la cantidad de agua en tiempo real en cultivos que son regados por el método de gravedad y a cielo abierto. Se planteó la investigación debido a que el uso racional del agua de riego y de los fertilizantes es fundamental para mejorar el ingreso de los productores y proteger el ambiente (Rosano *et al.*, 2001). Cabe mencionar que en México se tiene una gran área de riego por gravedad. No obstante, se utiliza agua demás por lo regular.

Finalmente, con este trabajo se tiene como objetivo brindar información para indicar la cantidad y el momento del riego en tiempo real a cada parcela por medio del servicio de internet y dispositivos móviles, y así hacer más eficiente el uso del agua y al mismo tiempo manteniendo en condiciones adecuadas la humedad del suelo para el mejor desarrollo de las plantas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en una parcela del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, ubicada en una latitud norte de 19°27', longitud oeste de 98°54' y altitud de 2240 msnm.

Para la elaboración del proyecto de investigación se requirió un dispositivo móvil (teléfono celular) marca Nokia modelo C3-00, una estación meteorológica automática (EMA) de marca Campbell SCI para obtener datos de elementos climáticos, tres sensores de humedad de suelo 10HS para medir contenido volumétrico de agua en el suelo (Decagon, 2008) y una computadora con el sistema operativo Windows 7 con procesador de 2.2 GHz y 2 GB de memoria RAM.

Los sensores de humedad de suelo 10HS se instalaron en las profundidades 5-15cm, 15-25cm y 25 a 35 cm y los datos se almacenaron en el DataLogger CR1000 de la EMA. Es necesario indicar que se colocaron a esas profundidades debido a que se estimó el promedio de contenido volumétrico de agua en la capa de los primeros 40 cm de profundidad del suelo, para ello, se

tomaron mediciones cada 10 minutos de cada sensor y se estimó el promedio a nivel horario. Posteriormente se realizó la estimación diaria del contenido volumétrico de agua en el suelo con los promedios horarios.

La EMA utilizada funciona por medio de un Datalogger CR1000, es un dispositivo electrónico que procesa y guarda los datos resultantes de la medición de los sensores de los elementos climáticos (Campbell, 2000) y se conecta a la red de internet del Colegio de Postgraduados mediante el conector de red NL115, tiene el papel de funcionar como interface de comunicación entre la estación meteorológica y la computadora (Campbell, 2006). La EMA está ubicada a 10 metros de la parcela de estudio.

En la computadora se instalaron los programas de cómputo: MySQL Server es un gestor de bases de datos para almacenar información (Korhonen *et al.*, 2008); MySQL Conector Net 6.3.5 que es un conector del programa Microsoft Visual Studio 2010 con MySQL Server (Kofler, 2005); Microsoft Visual Studio 2010 que es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones Web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles (Randolph *et al.*, 2010); LoggerNet 3.4.1 es un software que sirve para comunicar a la computadora con el Data Logger CR1000 (Campbell, 2007) de cualquier estación meteorológica automática (EMA); Tera Term 4.71 se utilizó para realizar pruebas de comunicación entre computadora y dispositivos móviles.

Una vez instalado el software necesario en la computadora, se creó una base de datos llamada MYDB en el programa MySQL Server (Figura 1). El Modelo Entidad Relación incluye las tablas de datos: Suelo, incluye las variables de suelo cantidad de arcilla (%), cantidad de limo (%), cantidad de arena (%), contenido de materia orgánica (%) y densidad aparente de suelo (g/cm^3); Cultivo, que incluye datos como nombre de cultivo, duración del cultivo en días (desde siembra

a cosecha), función del coeficiente de cultivo, función de la profundidad de la raíz y función del abatimiento permisible en la humedad del suelo; Usuario, que indica datos de nombre de usuario, dirección de correo electrónico, número de celular, nombre de identificación personal, contraseña; Parcela, indica nombre de la parcela, coordenadas que delimitan a la parcela, día juliano de plantación, pago de servicio y verificador que indica si parcela está dada de alta; Estación, contiene datos de latitud, longitud y altitud; Elementos climáticos horarios, en donde se almacenan los datos de evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm), velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación (W/m^2), temperatura media ($^{\circ}C$), y humedad relativa (%).

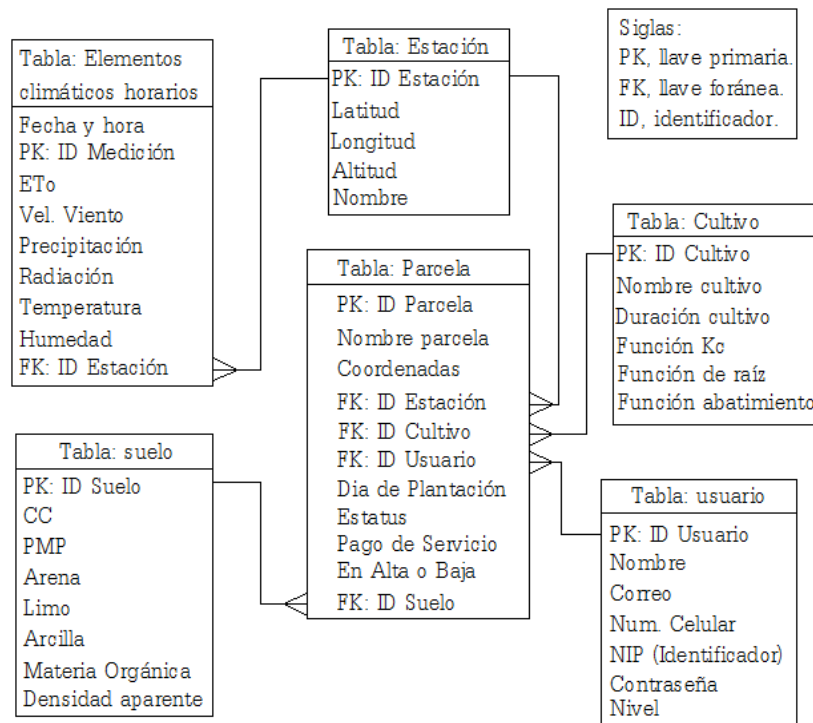
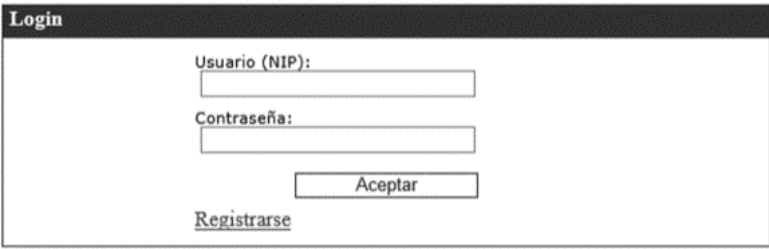


Figura 1. Modelo Entidad Relación de la base de datos MYDB.

Posteriormente se creó en Visual Studio 2010 un sitio web para ingresar y extraer a la información de la base de datos MYDB. El sitio web se elaboró con el fin de crear una interfase donde el usuario pueda ver el estado de su parcela en tiempo real y el administrador pudiera interactuar con las parcelas que desee, para ello se utilizó el programa Google MapsTM, esto,

debido a que los servicios de Google Maps™ pueden superar limitaciones cartográficas mediante el acceso a través de internet, a la cartografía y a las estructuras de la red de carreteras/calles así como a importantes datos reales relacionados con carreteras y restricciones de tráfico (Santos *et al.*, 2011). Se obtuvieron las herramientas precisas para obtener el funcionamiento adecuado de las ventanas de Google Maps en el sitio web creado además de las funciones necesarias para obtener coordenadas de parcelas para almacenarlas en la base de datos en MySQL. El sitio web está compuesto por cuatro páginas, cumplen diferentes funciones y se utilizaron para alimentar a las tablas de datos en MySQL. Las páginas se describen a continuación.

Página de acceso. Se creó una página para que los usuarios tuvieran acceso al sistema mediante el uso de un identificador de usuario y una contraseña. Desde esta se puede tener acceso a la página de registro mediante un enlace (Figura 2).



The image shows a web form for user login. The form has a dark header with the word "Login" in white. Below the header, there are two text input fields. The first is labeled "Usuario (NIP):" and the second is labeled "Contraseña:". Below the password field is a button labeled "Aceptar". At the bottom left of the form, there is a link labeled "Registrarse".

Figura 2. Acceso al sistema.

Página de registro: Se elaboró para que los usuarios que tuvieran una parcela en el área, se dieran de alta, mediante la introducción de los datos mostrados en la Figura 3.

DATOS DE USUARIO	
Nombre:	<input type="text"/>
Mail:	<input type="text"/>
Numero Celular:	<input type="text"/>
NIP:	<input type="text"/>
Contraseña:	<input type="text"/>

DATOS DE LA PARCELA Y CULTIVO

Parcela a dar de alta	Cultivo	Dia de plantación
6 ▾	Brécol (Brócoli) ▾	<input type="text"/>

CARACTERISTICAS DEL SUELO

Densidad Aparente (g/cm3)	Materia Orgánica (%)	Arcilla (%)	Arena (%)	Limo (%)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

DATOS DEL ULTIMO RIEGO

Dia de riego	Lámina aplicada (cm)	Hora de aplicación(entre 0 y 24)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="checkbox"/> Avisar via celular necesidad de riego.		

NOTA: Todos los campos son obligatorios para realizar el proceso de alta con éxito!!! ..

Figura 3. Datos requeridos para registro de parcela de un usuario de nivel dos.

Página de usuario nivel uno (administrador): Se creó para que el administrador del sistema tuviera la capacidad de editar, crear o eliminar parcelas (Figura 4).

Seleccionar Parcela: ▾

Clave Parcela	Nombre Parcela	ID Usuario	ID Cultivo	ID Suelo	ID Estación	Coordenadas	Dia Juliano de plantación	Estatus	Servicio Pagado	Estado de Alta (S/N)	Modify	Delete
1	1A	3	57	2	1	[new GLatLng(19.46811714155979, -98.89605581760406),new GLatLng(19.46784655338506, -98.89504194259643),new GLatLng(19.467075248165038, -98.895323574543),new GLatLng(19.467350895370035, -98.89629989862442),new GLatLng(19.46811714155979, -98.89605581760406)]	173	A	S	S	Edit	Delete
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="button" value="Add"/>	

Figura 4. Datos que puede editar el usuario nivel uno.

Página de usuario nivel dos (encargado de la parcela): Se creó para que el usuario pueda consultar los datos de balance hídrico actual en su parcela y se colocó la opción de dar de alta

otras parcelas (Figura 5). En este apartado es necesario mencionar que el sistema de control del riego es abierto debido a que el usuario es el que toma la decisión de ejecutar el riego (Zazueta, 1993).

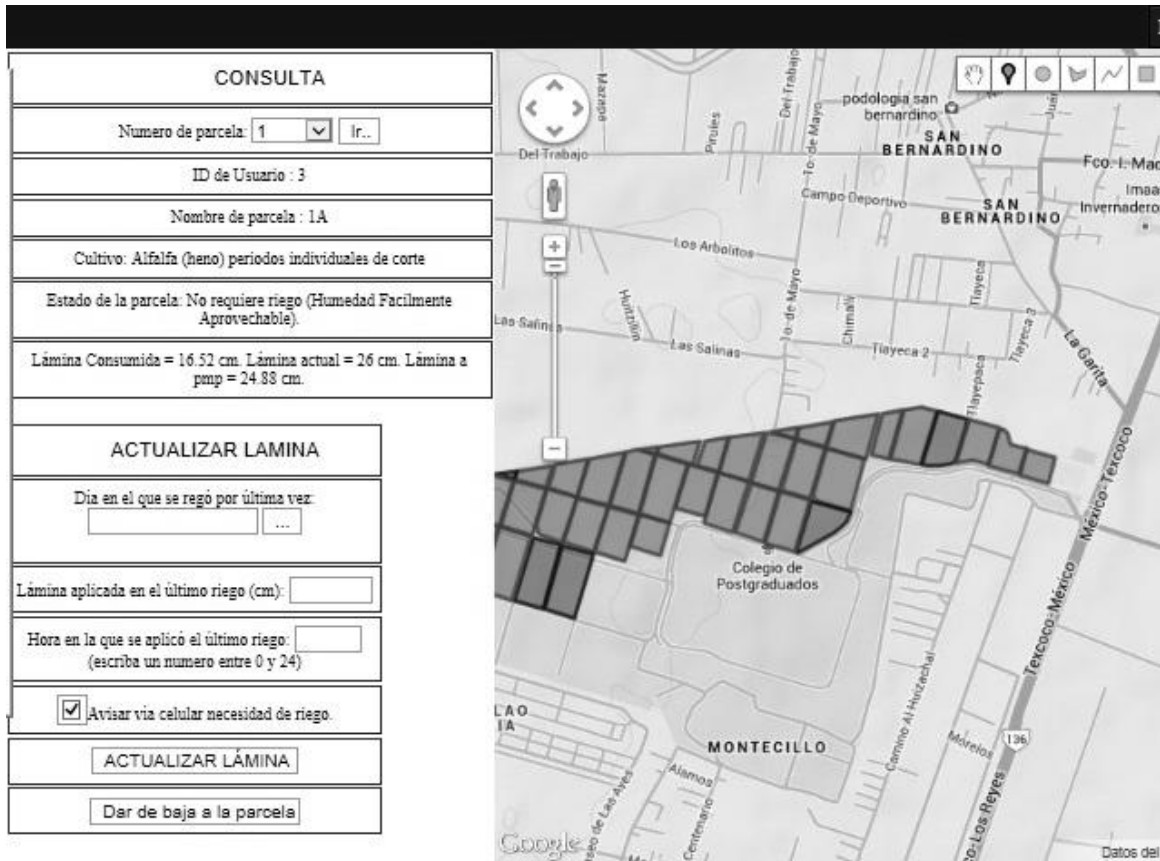


Figura 5. Página de acceso a un usuario nivel dos.

Después de lo anterior se elaboró una aplicación que calcula el balance hídrico climático (BHC) a nivel parcela y a nivel horario. Las funciones que se realizan se muestran en la Figura 6. Para calcular el balance hídrico se utilizó la metodología propuesta por Castro *et al.* (2008), sin embargo la evapotranspiración del cultivo (ET_C) fue estimada con el método de Penman-Monteith a nivel horario (Allen, 2006) debido a que autores como Hatfield (1990) aseguran que los sistemas de medición de evapotranspiración proporcionan datos de mayor precisión en intervalos cortos de tiempo. Cabe mencionar que el DataLogger CR1000 puede calcular la

evapotranspiración de referencia mediante la ecuación estandarizada de la evapotranspiración de referencia de la American Society of Civil Engineers (Allen *et al.*, 2005), no obstante, este último dato no se utilizó. De acuerdo con Allen (2006), el balance diario del agua en la zona radicular del suelo, expresado en términos de agotamiento al final del día, es:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i$$

Donde

$D_{r,i}$ agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final del día i [mm],

$D_{r,i-1}$ agotamiento de humedad en la zona radicular al final del día anterior, $i-1$ [mm],

P_i precipitación en el día i [mm],

RO_i escurrimiento superficial en el día i [mm],

I_i lamina neta de riego en el día i que infiltra en el suelo [mm],

CR_i ascenso capilar proveniente del nivel de agua subterránea en el día i [mm],

$ET_{c,i}$ evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

DP_i pérdidas de agua de la zona radicular por percolación profunda en el día i [mm].

Sin embargo, el programa que calcula el BHC a nivel horario tomó la misma ecuación, pero en lugar de utilizar un intervalo de tiempo por día, lo hizo por hora.

En cuanto a la actividad siguiente se elaboró un proyecto en Visual Studio 2010 para enviar mensajes de texto a usuarios que estén dados de alta en el sistema. La interface se creó por medio del envío de comandos AT al dispositivo celular. Cabe mencionar que el control del teléfono móvil se llevó a cabo mediante el conjunto de comandos AT especificados en la normativa GSM, no obstante, los comandos pueden variar dependiendo del fabricante de la terminal (Sallent, 2003).

La función principal de envío de mensajes verifica si el usuario o encargado de la parcela desea que se le avise vía celular, a continuación se verifica si ya se ha abatido la humedad fácilmente aprovechable en la parcela y si esto ocurrió, se verifica si ya se ha enviado un mensaje de necesidad de riego, en caso de no haberlo enviado, se crea un texto que contiene la humedad fácilmente aprovechable (mm) y la lámina consumida (mm) en la parcela, para que el usuario conozca la cantidad de agua que debe aplicar y decida cuando aplicar el riego.

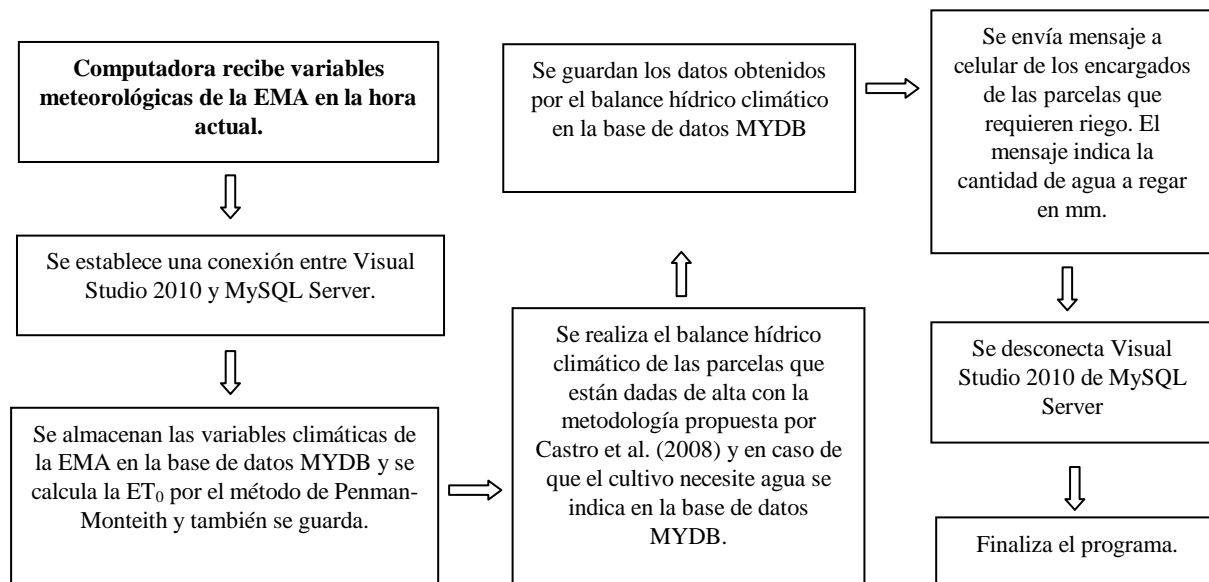


Figura 6. Funciones realizadas para calcular el balance hídrico climático a nivel horario.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema se puso a prueba durante 24 días del 23 de junio a las 0:00 horas y el 17 de julio de 2013 a las 0:00 horas, recolectando los datos a nivel horario de velocidad del viento (m/s) a 2 m de altura, precipitación (mm), radiación (W/m^2), temperatura media ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), evapotranspiración de referencia (mm) y el promedio de contenido volumétrico de agua en el suelo en los primeros cuarenta centímetros de profundidad (m^3/m^3). Las variables meteorológicas se almacenaron en la base de datos MYDB.

El cultivo de la parcela fue alfalfa (con cuatro años de establecimiento, por lo que no se cubría totalmente la superficie del suelo) con una vida de 13 días después del último corte. Se muestreo el suelo para definir la profundidad con mayor densidad radicular que fue hasta los 40 cm de profundidad, por ello el BHC se realizó únicamente en esa profundidad así mismo el monitoreo de la humedad. De previos análisis de suelos realizados en la parcela se conoce que el promedio de contenido de arena es de 61%, de limo 17%, de arcilla 22%, de materia orgánica 1% y la densidad aparente de 1.31 g/cm^3 en los 40 cm de profundidad, además la capacidad de campo (CC) es $0.2507 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y el punto de marchitez permanente (PMP) es $0.1462 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Para iniciar el balance se considero que el contenido volumétrico de agua en el suelo (WVC) medido con los sensores 10HS a las 23:00 horas del 22 de Junio del 2013 fue de $0.221 \text{ m}^3/\text{m}^3$; debido a esto, al primer BHC (calculado en la hora 00:00 del 23 de Junio del 2013) se le asignó la misma cantidad de WVC señalada por el sensor de la hora anterior.

No obstante, es imprescindible mencionar que el BHC se calculó en milímetros, por lo que fue necesario convertir los $0.221 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a milímetros. Para ello, se sabe que el contenido de agua a CC es de 100.28mm y el contenido inicial indicado por el sensor de humedad en milímetros fue de 88.4mm, dentro los 40 cm de profundidad en el suelo. Por lo que el agotamiento de humedad en la zona radicular al final de la hora fue de 11.9mm ($100.28 \text{ mm} - 88.4 \text{ mm}$). Posteriormente, ya con las condiciones iniciales definidas se inició la estimación del BHC para todas las horas comprendidas en el periodo estudiado.

Es importante añadir que el BHC estimado obtuvo el agotamiento de humedad en la zona radicular del suelo al final de cada hora en milímetros y los sensores de humedad en m^3/m^3 , por lo que fue necesario convertir el agotamiento de milímetros a m^3/m^3 . Para hacer esto, a los 100.28mm de capacidad de campo se les restó el agotamiento horario y el resultado se dividió

por 400mm (profundidad del suelo). Con las operaciones anteriores se obtuvo el BHC en m^3/m^3 y se logró comparar con el WVC indicado por los sensores 10HS.

Antes de realizar la comparación entre los datos, se debe indicar que el WVC del suelo registrado por los sensores 10HS fue revisado y si la medición superaba a la humedad CC, el WVC se fijaba a lo equivalente al contenido de humedad a CC. Posteriormente las mediciones de los sensores de la humedad en el suelo se ponderaron por la profundidad del volumen de influencia del sensor. Para realizar esto, a la medición de WVC indicada por el sensor ubicado entre 0 y 15 cm, se le multiplicó por 15, a la medición indicada por el sensor ubicado de 15 a 25 cm se le multiplicó por 10 y a la medición indicada por el sensor ubicado entre 25 y 35 cm se le multiplicó por 10, los resultados se sumaron y el total se dividió por 35.

Para mostrar la información obtenida de WVC y BHC se indica a nivel diario, para ellos en el BHC se cierra e inicia a las 00:00 horas de cada día; de igual manera para la lectura de los sensores (Figura 7).

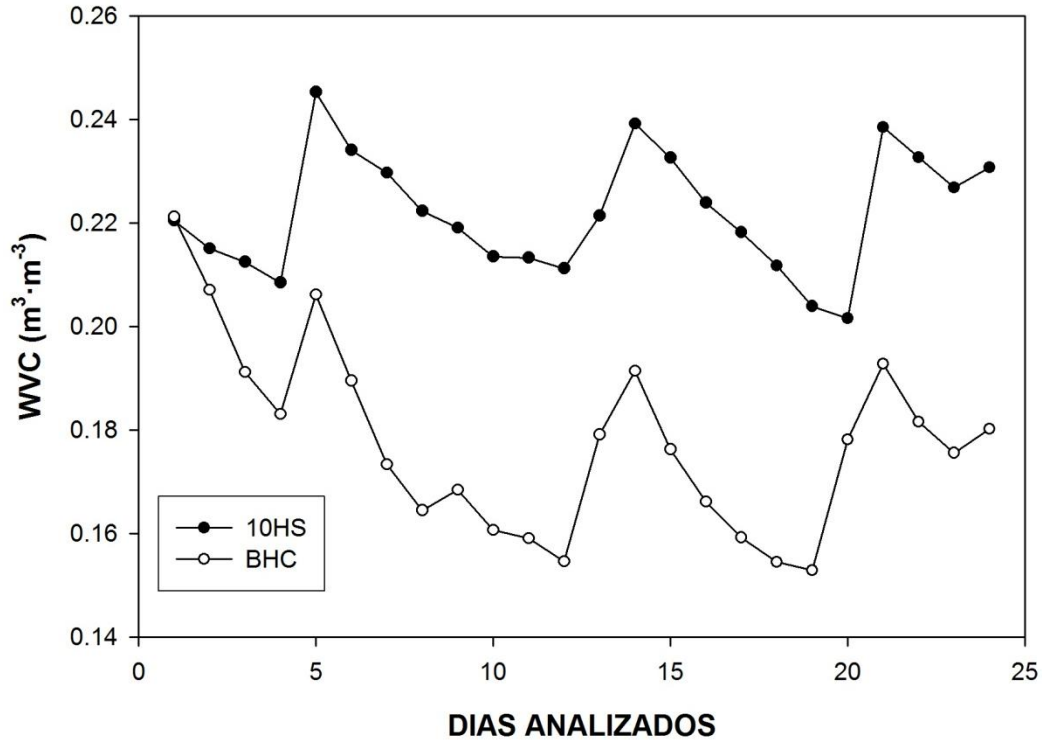


Figura 7. Contenido volumétrico de agua en el suelo medido y estimado a las 00:00 horas de cada día analizado.

En la Figura 7 se observa que el WVC estimado con el BHC tiene un comportamiento similar al medido con los sensores 10HS, sin embargo, el WVC estimado con el BHC indica que la humedad del suelo se estabilizó en los primeros cuatro días, por lo que al realizar una regresión lineal entre ambos, podría producirse un gran error. Por lo anterior, se planteó realizar el análisis de regresión únicamente para el periodo comprendido entre las fechas 27 de junio de 2013 y el 17 de julio de 2013 y se le estimó el coeficiente de determinación y un modelo de regresión lineal de la forma $y = a + b \cdot x$, en donde “x” es el WVC medido por los sensores 10HS, “a” y “b” constantes y “y” es el WVC estimado por el BHC (Figura 8).

Adicionalmente se debe indicar que el día 11 de Julio del 2013 a las 23:00 horas se registró una precipitación de 3.5 mm y en el día 12 de Julio del 2013 a las 00:00 horas se registró una precipitación de 3.8mm. Cabe mencionar que el BHC estimado contempla la precipitación inmediatamente después de presentarse en el cálculo del agotamiento en la humedad del suelo

correspondiente a las 00:00 horas, no obstante, el día 12 de Julio de 2013 a las 0:00 horas en particular, los sensores de humedad del suelo aún no habían registrado el cambio en la humedad debido a la lenta velocidad de infiltración; por tal motivo, ese día no se consideró en la regresión.

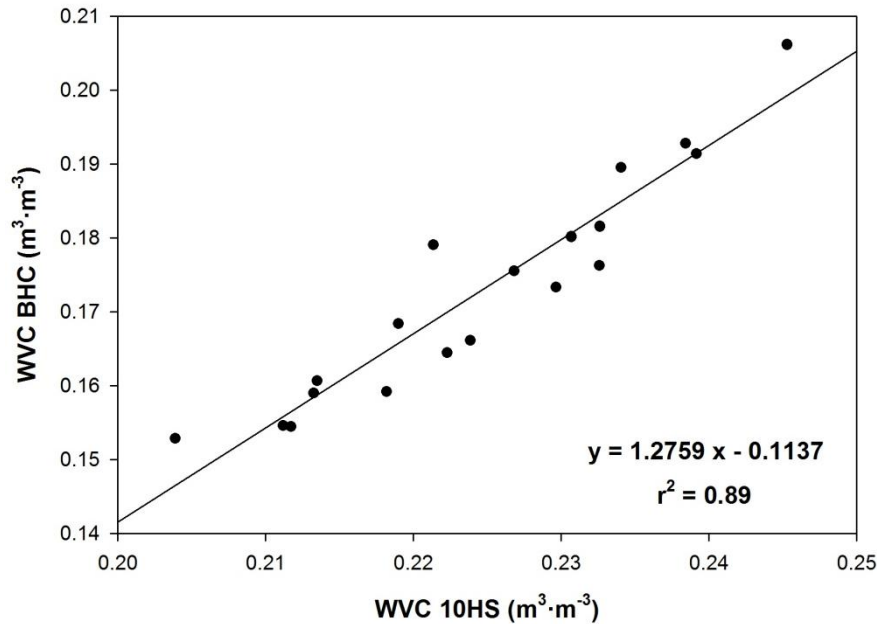


Figura 8. Regresión del contenido volumétrico de agua en el suelo medido y estimado.

Para verificar si existe relación lineal entre el WVC medido con los sensores de humedad 10HS y el WVC estimado con el BHC, se realizó el análisis de varianza de la significación de la regresión (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadísticas de la regresión entre el WVC medido con los sensores 10HS y el WVC estimado con el BHC.

R ² ajustado	F ₀	t ₀ de a (ordenada)	t ₀ de b (pendiente)	$\sqrt{MS_E}$ *	g. l. regresión	g. l. residuos
0.89	148.06	-4.82	12.16	0.00495	1	17

* Raíz cuadrada del cuadrado medio del error de los residuales.

Del Cuadro 1 se verifica que F₀ equivale a 148.06 y F_{0.05,1,17} equivale a 4.45; por lo tanto F₀ es mayor que F_{0.05,1,17}, y así se confirma que existe una relación de tipo lineal entre los datos

mencionados. Después de lo anterior se verificaron los coeficientes de la ecuación de regresión y se encontró que el coeficiente “a” es estadísticamente diferente de cero debido a que su valor $|t_0| > t_{0,025,17}$, ya que $t_{0,025,17}$ equivale a 2.11. Adicionalmente el coeficiente “b” es diferente de cero debido a que su valor $|t_0| > t_{0,025,17}$, por lo tanto se puede inferir que el WVC medido con los sensores de humedad 10HS es 1.27 veces mayor que el WVC estimado con el BHC.

4. CONCLUSIONES

El consumo horario de agua en el suelo estimado con la metodología del BHC sobreestima el medido, sin embargo, hay una relación lineal muy alta entre los datos estimados y los datos de humedad medidos, por lo que es posible integrar un sistema de servicio de riego mediante dispositivos móviles al conjuntar las tecnologías de información y comunicación. La información meteorológica, de las unidades: cultivo-suelo-productor y el balance hídrico, todo en línea, contribuyen a la toma de decisiones oportunas con el fin de solicitar el riego.

Se recomienda hacer un sistema integral de desarrollo es decir crear redes de estaciones para dar recomendaciones dentro del área de influencia de la red; desarrollar las estaciones automáticas, con la integración de las TIC.

5. LITERATURA CITADA

Águila M., F. 2003. Entwicklung eines vollautomatischen Bewässerungsregelungs systems für den Freilandgemüsebau. Verlag Grauer, Beuren - Stuttgart, Alemania. ISBN 3-86186-434-7. 143 p.

Allen, R. G.; Pereira, L. S. and Raes, D. 1998. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization (FAO), Irrigation and Drainage, Paper No. 56. p. 321.

Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization (FAO), Vol. 56.

Allen, R. G.; Walter, I. A.; Elliot, R. L.; Howell, T. A.; Itenfisu, D.; Jensen, M. E. and Snyder, R. L. 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. American Society of Civil Engineers. USA. 56 p.

Bralts, V. F.; Driscoll, M. A. and Kelly, S. F. 1986. Microcomputer based irrigation management and control system. ASAE, Paper No.86-1223. St. Joseph, MI. USA.

Calvache, M.; Reichard, K. y Bacchi, O. 1997. Efecto de épocas de deficiencia hídrica en evapotranspiración actual del cultivo. Congreso Brasileiro de agrometeorología. p. 668-670.

Campbell Scientific, Inc. 2000. CR1000 measurement and control system operator's manual. Electronic Version. Logan, Utah. USA.

Campbell Scientific, Inc. 2006. NL115 Ethernet and CompactFlash Module Instruction Manual. Electronic Version. Logan, Utah. USA.

Campbell Scientific, Inc. 2007. LoggerNet User's Manual. Version 3.4.1. Electronic Version. Logan, Utah. USA.

Castro P., M; Águila M., F. M.; Quevedo N., A.; Kleisinger, S.; Tijerina C., L. y Mejía S., E. 2008. Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura Técnica en México (México)*. 34:459-470.

Decagon Devices Inc. 2008. 10HS Soil Moisture Sensor Operator's Manual. Versión 1.0. Electronic Versión. Pullman, WA. USA.

Hatfield, J.L. 1990. Methods of estimating evapotranspiration. *Irrigation of agricultural crops*. ASA. monograph n° 30, pp. 436 - 467.

Kofler, M. 2005. *The Definitive Guide to MySQL 5*. David Kramer. Third edition. APRESS. New York, NY, USA. 172p.

Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J. R., Valle Paniagua, D. H. D., Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. 2011. Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(5), 659-672.

Moreno A., S., L. Tijerina Ch., R. Acosta H., V.M. Ruiz C., F.S. Zazueta R., y G. Crespo P. 1996. Automatización de un sistema de riego localizado, aplicado a una plantación de durazno. *Agrociencia*, Vol. 33, 2: 191 – 197.

Palacios V., E. y Exebio G., A. 1989. Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos de Riego. Segunda Reimpresión Corregida. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. México.

Randolph, N., D. Gardner, M. Minutillo, and C. Anderson. 2010. Professional Visual Studio 2010. Wrox. Wiley Publishing, Inc, Indianápolis, Indiana. 1177 p.

Rosano M., L.; Rendón P., L.; Pacheco H., P.; Etchevers B., J. D.; Chávez M., J. y Vaquera H., H. 2001. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia (México)* Vol. 35: pp. 577-588.

Sallent R., O. y Valenzuela G. J. L. 2003. Principios de comunicaciones móviles. Primera Edición. Edicions UPC. Barcelona, España. p. 23

Santos, L., J. Coutinho-Rodrigues, and C. H. Antunes. 2011. A web spatial decision support system for vehicle routing using Google Maps. *Decision Support Systems* 51(1): 1-9.

UN (United Nations). 2003. Water for people, water for life. Executive Summary of the UN World Water Development Report. Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Paris. France.

Wessels, W. P.J., W.H. Steyn and J.H. Moolman. 1995. Automatic microirrigation and salt injection system for research and commercial applications. Proceeding of the Fifth International Microirrigation Congress. Orlando Fl., USA. ASAE. Pp: 116 – 122.

Xin, J. N., F. S. Zazueta., A. G. Smajstrla and T. A. Wheaton. 1995. Real time expert system for citrus microirrigation management. Proceeding of the Fifth International Microirrigation Congress. Orlando Fl., USA. ASAE. Pp: 787 – 791.

Zazueta, F. S. 1993. Irrigation System Controllers. SS-AGE-32 Agric. Eng., Institute of Food and Agricultural Sciences. Univ. of Florida, Gainesville, FL, USA 14 p.

CAPÍTULO II.
**INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE VARIABLES METEOROLÓGICAS EN TIEMPO
REAL POR MEDIO DE LA LIBRERÍA AKIMA**

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹,
Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

¹*Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.* ²*Departamento de Irrigación, Universidad
Autónoma Chapingo.* ³*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.*

RESUMEN

El uso de las variables meteorológicas es muy diverso en: aplicaciones de agricultura, pronóstico del tiempo, inundaciones, entre otras. Sin embargo una limitante es que no se cuenta con la disponibilidad espacio-temporal de datos y mucho menos en tiempo real. Por lo que es necesario crear estrategias para obtenerlos, por ello se planteó el objetivo de obtener las variables meteorológicas de temperatura, humedad relativa, evapotranspiración de referencia, radiación solar y velocidad del viento en cualquier lugar mediante una tarea programada agregada en el sistema operativo Windows 7[®] Ultimate para realizar la interpolación espacial por medio de la librería Akima del software R con una interacción semi-automática con el paquete de cómputo Microsoft Visual Studio 2010. Si se integra dicha información en casi tiempo real, se puede hacer la interpolación espacial y temporal en forma simultánea. Para ello se realizó la estimación de temperatura, humedad relativa, evapotranspiración de referencia y radiación solar a nivel horario en tres estaciones meteorológicas automáticas del Servicio Meteorológico Nacional a partir de una red de 10 estaciones circundantes, donde se obtuvieron coeficientes de determinación por arriba de 0.95 entre los datos estimados y los reales para algunas variables meteorológicas, por lo que es posible interpolar datos y almacenarlos a nivel horario y en tiempo real.

Palabras clave: Interpolación espacial akima, temperatura, humedad relativa, evapotranspiración de referencia, tiempo real.

**SPATIAL INTERPOLATION OF METEOROLOGICAL VARIABLES IN REAL TIME
THROUGH THE LIBRARY AKIMA**

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹,
Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

ABSTRACT

The use of meteorological variables is very diverse and is used in agricultural applications, weather, floods, and others. However, a limitation is that there is no space-time availability of data and less real time. So it is necessary to create strategies to get them, so the objective was to obtain the meteorological variables of temperature, relative humidity, reference evapotranspiration, solar radiation and wind speed anywhere via a scheduled task added in the Windows 7 Ultimate[®] operating system using spatial interpolation by the Akima software with a semi-automatic interaction with the computer package Microsoft Visual Studio 2010. If you integrate this information in near real time, you can make spatial and temporal interpolation simultaneously. This was achieved by estimating temperature, relative humidity, reference evapotranspiration and the hourly solar radiation on three automatic weather stations of the National Weather Service from a network of 10 stations in the neighborhood where coefficients of determination were above 0.95 between estimated and actual data for some weather variables, so data can be interpolated and stored on the hourly and in real time.

Keywords: Spatial interpolation, temperature, relative humidity, reference evapotranspiration, real time.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el conocimiento de las variables meteorológicas en determinadas zonas geográficas es elemental para el uso sustentable de los recursos naturales (Principi *et al.*, 2011). La disponibilidad de información climática de calidad y espacialmente distribuida es importante para el desarrollo de investigación en distintas disciplinas como la Hidrología, Agronomía, Climatología y Ecología (Leal *et al.*, 2010). Los científicos por lo general necesitan datos precisos y espacialmente continuos a través de una región con el fin de hacer interpretaciones justificadas, pero estos datos por lo general no están fácilmente disponibles y son a menudo difíciles y caros de adquirir (Yao *et al.*, 2013). Adicionalmente, las fuentes de datos de alta calidad son de vital importancia para los científicos, ingenieros y encargados de tomar decisiones por igual (Estévez *et al.*, 2011). Hoy en día se cuenta con la tecnología para realizar mediciones a nivel horario mediante el uso de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), que miden con exactitud la radiación solar, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, presión atmosférica, temperatura del aire y, humedad relativa. En los últimos años, el uso de las EMAS ha experimentado un incremento significativo, especialmente en el ámbito agrícola e hidrológico (Gattinoni *et al.*, 2011). No obstante, se carece de una EMA en cada lugar en donde se realizan las investigaciones. Por ello, se han diseñado métodos para obtener las variables meteorológicas en los lugares deseados mediante el uso de interpolación espacial. Hay que tener en cuenta que algunos métodos de interpolación son bastante sofisticados, cosa que los hace difíciles de aplicar operativamente (Chen *et al.*, 2010). Daly (2006) afirmó que no existe un solo método que puede funcionar bien en todas partes. Para apoyar a una comunidad más amplia de usuarios no especializados, se han hecho varios esfuerzos para proporcionar superficies reticulares de datos sobre el clima, las herramientas

basadas en Internet que visualizan el cambio climático proyectado, y los paquetes de software para consultar grandes bases de datos climáticos (Wang *et al.*, 2012), no obstante, esta información generalmente no se proporciona en tiempo real. Adicionalmente hay algunos programas de cómputo que se han utilizado en algunas investigaciones, como en la de Wagner *et al.* (2012) en donde todas las interpolaciones y análisis geoestadístico se llevaron a cabo por medio del software estadístico R 2.13.0, de la misma manera Liu *et al.* (2012) realizó diferentes métodos de interpolación espacial y análisis con el R 2.12.1 (R Development Core Team, 2011). Otro programa para interpolar conocido es el programa de cómputo ARcGis 9.2 con la extensión estadística ANALYST y considera métodos de interpolación tales como “ponderación inversa de la distancia (IDW)”, “interpolación del polinomio global (GPI)”, “función de base radial (RBF)” y “método kriging (K)”, (ESRI, 2006).

Debido a que se han realizado un sinnúmero de métodos de interpolación espacial, se han elaborado investigaciones para corroborar su precisión. Una de las investigaciones se realizó por Renka y Brown (1999), concluyen que uno de los mejores algoritmos para un conjunto de nodos denso o disperso es el Algoritmo 761 y se le han realizado mejoras (De Tisi y Valtulina, 2000). Por esto, el propósito de esta investigación fue elaborar un software que permitió generar datos meteorológicos a nivel horario en tiempo real y en cualquier punto requerido a partir de información de cualquier conjunto de Estaciones Meteorológicas Automáticas cercanas mediante una tarea programada (agregada en el sistema operativo Windows ® 7 Ultimate) que utiliza el Algoritmo 761, el cual está contenido en el programa de cómputo R Statistics 2.15.3.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el procesamiento de datos se utilizó una computadora con el sistema operativo Windows 7 con procesador de 2.2 GHz y 2 GB de memoria RAM. Donde se integraron diferentes programas: MySQL Server es un gestor de bases de datos para almacenar información (Korhonen et al., 2008); MySQL Conector Net 6.3.5 que es un conector del programa Microsoft Visual Studio 2010 con MySQL Server (Kofler, 2005); Microsoft Visual Studio 2010 que es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones Web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles (Randolph *et al.*, 2010); R Statistics 2.15.3, un paquete de cómputo estadístico (Dalgaard, 2008); rcom y rscproxy (conectores del programa R Statistics 2.15.3 con Microsoft Visual Studio 2010). Cabe mencionar que para realizar la interpolación espacial se utilizó el método de interpolación de Akima con la función `interp` de la librería `akima` y la opción `linear` igual a falso, de R Statistics (Akima *et al.*, 2013).

2.1. Información meteorológica

Para comprobar el buen funcionamiento del programa de cómputo elaborado para realizar interpolación espacial de variables meteorológicas, se obtuvieron datos de 13 estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (Figura 1 y Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas consideradas en el estudio

Nombre	Longitud (grados, minutos, Segundos)	Longitud	Altitud (m)
SN. M. Atlamajac, México	98°54'42"	19°38'05"	2200
Ecoguardas, DF	99°12'14"	19°16'17"	2200
ENCB. II del IPN, DF	99°08'43"	19°29'55"	2240
IMTA, Morelos	99°09'34"	18°53'02"	1355
Ixtapaluca, México	98°52'40"	19°19'52"	2272
Ixta-Popo, México	98°38'35"	19°05'44"	3682
M. Ávila Camacho, México	98°45'20"	19°19'13"	2958
Presa Madin, México	99°16'05"	19°31'28"	2364
Tepeatloxtoc, México	98°49'29"	19°34'09"	2320
Tezontle, DF	99°05'59"	19°23'07"	2358
Acolman, México	98°54'42"	19°38'05"	2269
C. Biolog. IPN, DF	99°04'36"	19°26'25"	2075
Chapingo, México	98°53'19"	19°29'39"	2260

Cabe mencionar que se eligieron esas estaciones ya que se presentaron datos continuos a nivel horario en el periodo comprendido entre el 08-Marzo-2013 a las 00:00 horas y el 20-Marzo-2013 a las 18:00 horas. No obstante, no se obtuvieron los datos completos para el 17 de Marzo de 2013 a las 18:00 horas y el 18 de Marzo de 2013 a las 18:00 y 19:00 horas, por lo que estos datos no se incluyeron en los cálculos.

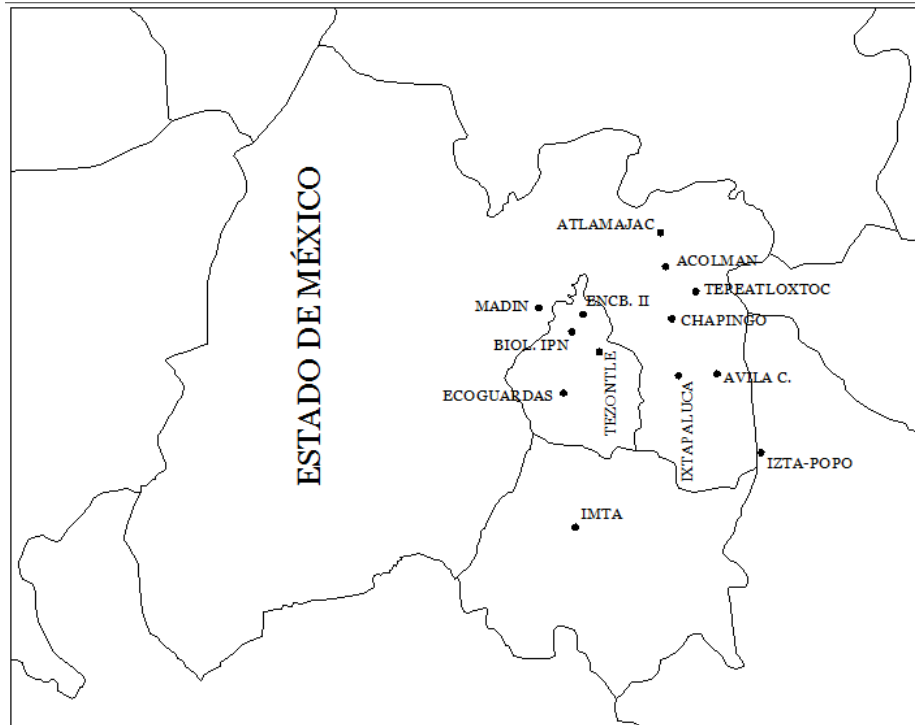


Figura 1. Ubicación de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).

2.2. Base de datos

Se elaboró una base de datos en el programa MySQL Server para almacenar la información obtenida de las EMAS y para almacenar los datos interpolados, las distintas tablas que se elaboraron son las siguientes:

- La tabla “estación”, fue destinada para guardar información sobre la ubicación y nombre de las estaciones meteorológicas que se deben incluir en el cálculo de la interpolación espacial. Los datos que contiene esta tabla son: identificador de estación, latitud, longitud, altitud y nombre. La llave primaria es el identificador de estación.
- Otra es la tabla llamada “elemhoraria”, cuyo objetivo es guardar la información de los datos meteorológicos a nivel horario de las EMAS deseadas. Los datos que se almacenan en esta tabla son: fecha y hora, evapotranspiración (cm), velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), temperatura media ($^{\circ}C$), humedad relativa

(%) y, un identificador de estación de la cual provienen los datos. La llave primaria es la unión de los datos de fecha e identificador de estación.

- Finalmente se creó una tabla para almacenar los datos que se hayan interpolado y se le llamó “elementospaciales”. Los datos que contiene esta tabla son: identificador de parcela, fecha y hora, evapotranspiración (cm), velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), temperatura media ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), latitud y longitud. La llave primaria de esta tabla es el identificador de parcela junto con la fecha y hora.

2.3. Software de interpolación

El programa de cómputo que se elaboró, utiliza diferentes funciones para llevar a cabo la interpolación de las diferentes variables meteorológicas. La primera función tiene el objetivo de adquirir datos meteorológicos de las EMAS, es decir recupera la información de archivos con formato de texto con extensión “.txt” que contienen datos meteorológicos a nivel horario de distintas EMAS y los organiza por fecha y el identificador de la Estación; los datos obtenidos se guardan en la tabla “elemhoraria”. Adicionalmente, el programa calcula la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith (Allen, 2006) y la guarda en la misma tabla.

La segunda función genera un archivo de texto con coordenadas en donde se desean interpolar las variables meteorológicas. Para evaluar el método de interpolación se seleccionaron tres EMAS con el fin de comparar los datos interpolados con los observados, que fueron Acolman, C. Biolog. IPN. y Chapingo. Así se integro el archivo de texto que se generó, y contiene la información siguiente: identificador de parcela o EMA, Latitud y Longitud. Los datos de ubicación de parcela o EMA están separados por un espacio en blanco, y se separan por un salto de línea entre cada parcela o EMA (Figura 2).

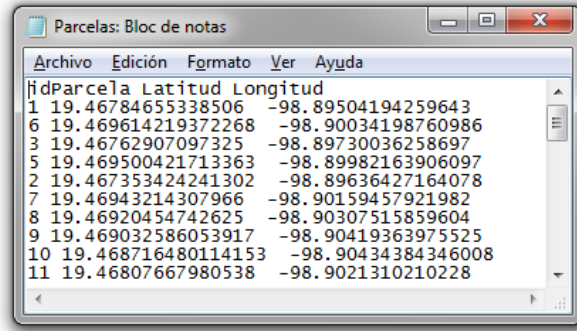


Figura 2. Archivo de coordenadas de parcelas o EMAS.

La siguiente función genera un archivo de texto con datos de la información meteorológica con las coordenadas de las Estaciones Meteorológicas Automáticas. El archivo de texto que se genera contiene la siguiente información separada por un espacio en blanco: evapotranspiración, velocidad del viento, precipitación, radiación solar, temperatura media, humedad relativa, latitud y longitud. Los datos se separan por un salto de línea entre cada estación meteorológica (Figura 3).

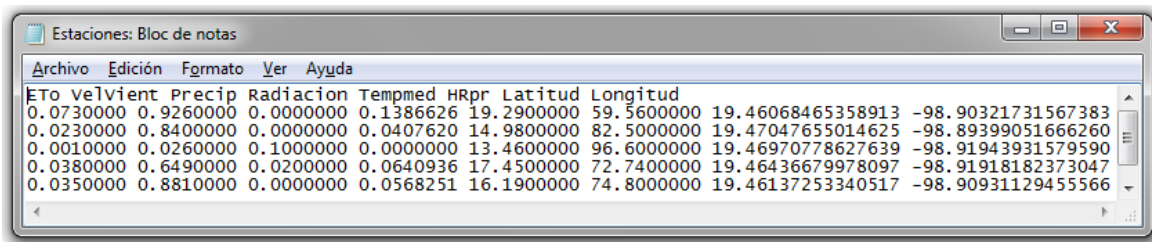


Figura 3. Información meteorológica disponible de las EMAS, con su ubicación geográfica.

La cuarta función se encarga de realizar la interpolación espacial; como primer paso establece una conexión entre el programa “R Statistics 2.15.3” con el programa Microsoft Visual Studio 2010; el lenguaje de programación fue C#. Posteriormente se le indica al programa “R Statistics 2.15.3” que haga la interpolación espacial usando la función `interpp` de la librería `akima` (Akima *et al.*, 2013), indicándole la opción `linear` igual a `falso`, a partir de la información de los

archivos, que se indican en la Figura 2 y Figura 3; los resultados obtenidos con el programa “R Statistics 2.15.3” se guardan en la tabla “elementospaciales” en formato de texto.

Finalmente se agregó el software generado a una tarea programada en Windows ® 7 Ultimate para ejecutar cada hora la interpolación espacial y temporal a nivel horario para las variables de temperatura y humedad relativa, para el periodo comprendido entre el 08-Marzo-2013 a las 00:00 horas y el 20-Marzo-2013 a las 23:00 horas. Se utilizaron las variables meteorológicas de las EMAS Atlamajac, Tepeatloxtoc, Ávila C., Izta-Popo, Ixtapaluca, IMTA, Ecoguardas, ENCB. II, MADIN y Tezontle como datos conocidos y con éstos se calcularon las variables meteorológicas de las EMAS Acolman, Biol. IPN y Chapingo. El proceso de interpolación espacial y temporal se realizó a los tres minutos después de cada hora (Figura 4).

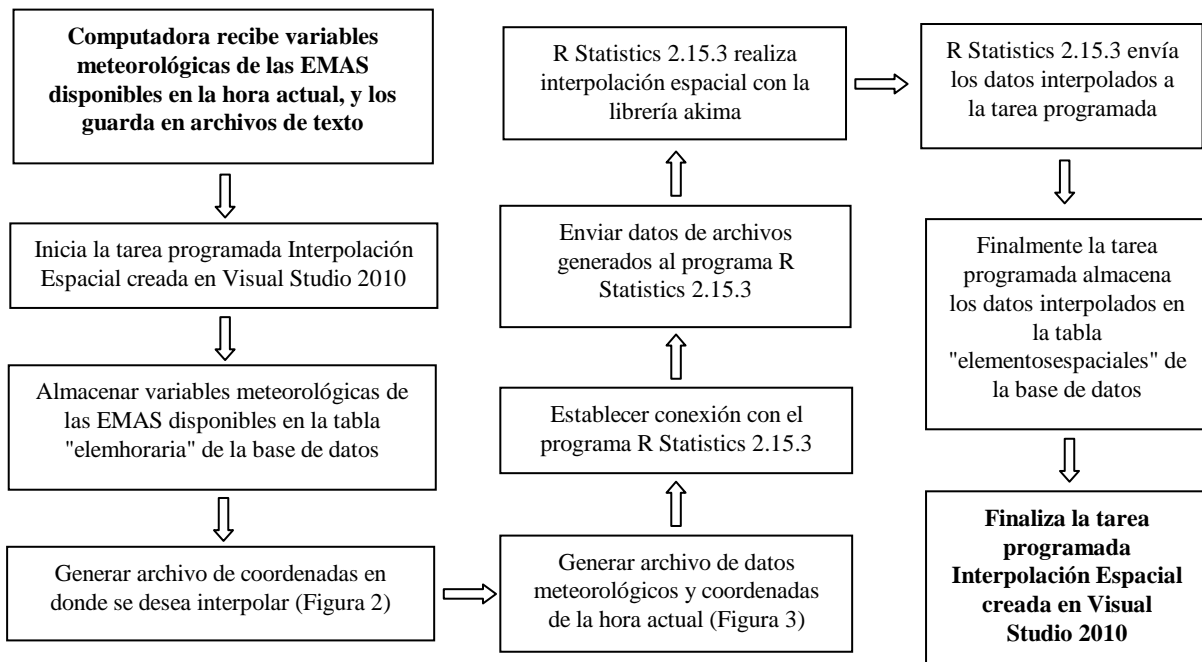


Figura 4. Funciones que realiza la tarea programada para el cálculo de interpolación espacial.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se estimaron 304 datos para cada una de las variables: temperatura, humedad relativa, evapotranspiración de referencia, radiación solar y velocidad del viento, con un total de 1520

datos por EMA. Dicha información estimada se graficó (junto con la línea 1:1) con los datos reales para cada EMA de cada hora, y se determinó el coeficiente de determinación y un modelo de regresión lineal de la forma $y = a + b \cdot x$, en donde “x” es la variable meteorológica estimada, “a” y “b” constantes y “y” es la variable meteorológica real. En las figuras de la 5 a 9 se observan los coeficientes de determinación y funciones de regresión lineal de las variables: temperatura, humedad relativa, evapotranspiración de referencia, radiación solar y velocidad de viento para las EMAS analizadas.

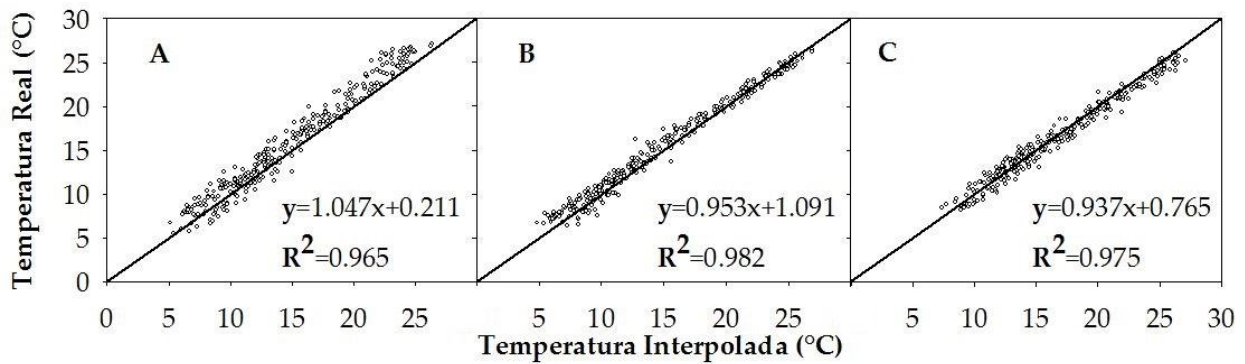


Figura 5. Temperatura estimada contra temperatura real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).

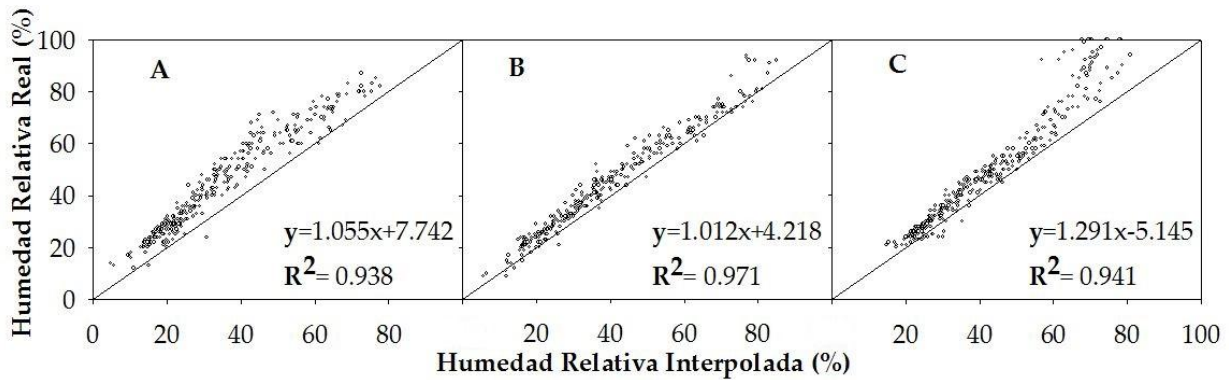


Figura 6. Humedad relativa estimada contra humedad relativa real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).

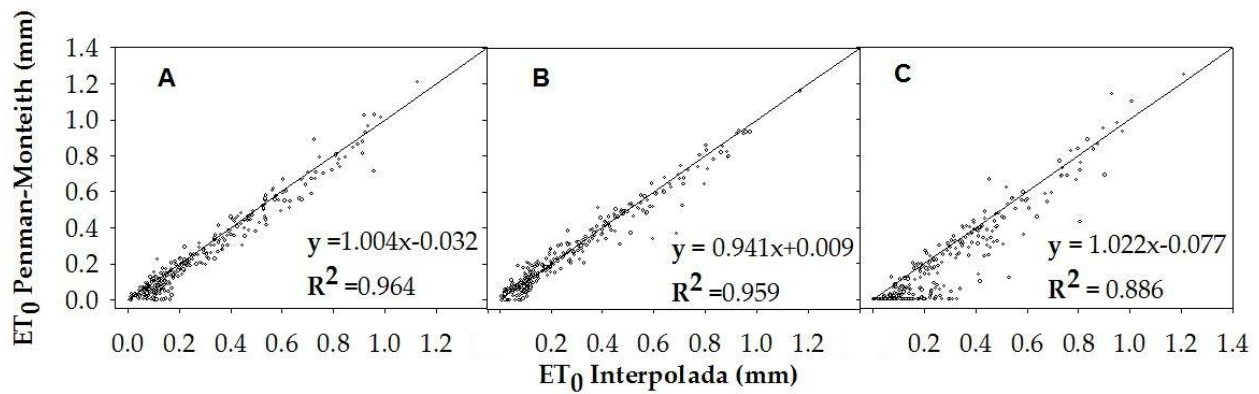


Figura 7. Evapotranspiración de referencia estimada contra evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman-Monteith para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).

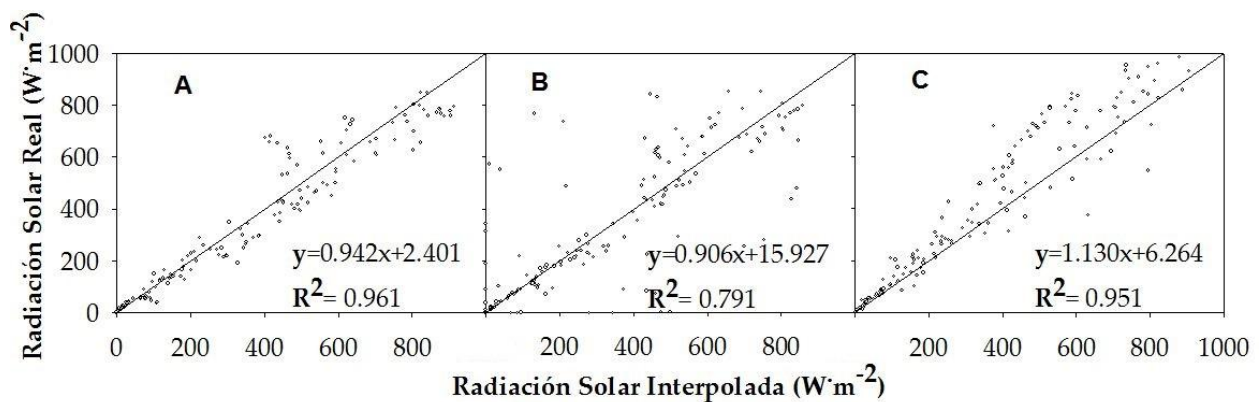


Figura 8. Radiación solar estimada contra radiación solar real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).

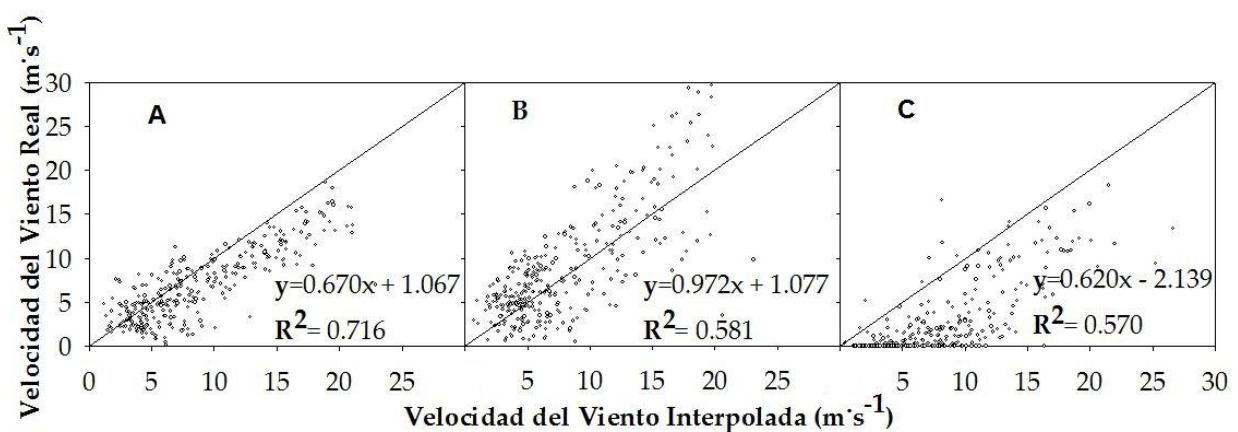


Figura 9. Velocidad del viento estimada contra velocidad del viento real para las EMAS Chapingo (A), Acolman (B) y, Biol. IPN (C).

Además de hacer el ajuste de regresión lineal a los datos, se les realizó la prueba de significación de la regresión para verificar si existe relación lineal (Cuadro 2). Se comprobó que al menos uno de los coeficientes de las regresiones realizadas es distinto de cero en todos los casos ya que $F_{0.05,1,302}$ (3.84) es menor que F_0 . Como siguiente paso se comprobó que la pendiente de las regresiones fuera estadísticamente igual a 1, mayor que 0.95 y menor que 1.05. Para realizarlo se probaron las hipótesis nulas (H_0) y los resultados se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Estadísticas de regresión de las estimaciones.

	R^2 (ajustada)	F_0	a (ordenada)	b (pendiente)	** $\sqrt{CM_E}$	H_0 : b=1	IC 95% para 'b'***
Chapingo							
Temperatura	0.965	8224.08	0.211	1.047	1.104		1.024≤b≤1.07
Humedad relativa	0.938	4584.34	7.742	1.055	4.728		1.024≤b≤1.085
ET ₀	0.964	7977.66	-0.032	1.004	0.047	*	0.982≤b≤1.026
Radiación	0.961	7489.11	2.401	0.942	50.706		0.92≤b≤0.963
Velocidad – viento	0.716	761.86	1.067	0.670	2.127		0.622≤b≤0.718
Acolman							
Temperatura	0.982	16711.91	1.091	0.953	0.756		0.939≤b≤0.968
Humedad relativa	0.971	10265.85	4.218	1.012	3.287	*	0.992≤b≤1.031
ET ₀	0.959	7086.00	0.009	0.941	0.047		0.919≤b≤0.963
Radiación	0.791	1145.67	15.927	0.906	117.692		0.854≤b≤0.959
Velocidad – viento	0.581	419.32	1.077	0.972	3.976	*	0.879≤b≤1.065
Biol. IPN							
Temperatura	0.975	11855.66	0.765	0.937	0.759		0.92≤b≤0.954
Humedad relativa	0.941	4778.75	-5.145	1.291	5.370		1.254≤b≤1.327
ET ₀	0.886	2351.05	-0.077	1.022	0.083	*	0.98≤b≤1.063
Radiación	0.951	5827.61	6.264	1.130	64.822		1.101≤b≤1.159
Velocidad – viento	0.570	400.26	-2.139	0.620	2.660		0.559≤b≤0.681

* Se acepta la hipótesis nula con un alfa de 0.05 y 302 grados de libertad.

** Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

*** Intervalo de confianza de 95% para el parámetro b.

En el Cuadro 2 y Figuras 5,6 y 7 se observa que las variables temperatura, humedad relativa y ET₀ tienen la menor variabilidad, valor de pendiente es más cercano a 1 y coeficiente de determinación más cercano a 1. Para la radiación, se tienen valores de pendiente cercanos a 1,

sin embargo se tuvieron datos más dispersos que las variables anteriores (Figura 8). La velocidad del viento presentó la R^2 ajustada más pequeña en todos los casos y los datos más dispersos que las demás variables analizadas.

Es importante remarcar que la distribución espacial de las EMAS es irregular, por lo que algunas de las 10 EMAS (utilizadas para la interpolación espacial) están más cercanas a alguna de las 3 EMAS en donde se estimaron las variables meteorológicas, por ello se encontraron diferentes precisiones a la hora de estimar los datos.

De las tres EMAS estimadas, la EMA con datos más aproximados y con menor variabilidad fue Acolman, seguida de Biol. IPN y finalmente Chapingo para las variables de temperatura y humedad relativa. En cuanto a la evapotranspiración de referencia, la EMA Chapingo y Acolman tuvieron las estimaciones más cercanas a la realidad y con poca variabilidad (Cuadro 2), mientras que la EMA Biol. IPN obtuvo una menor aproximación. En la estimación de la radiación solar y velocidad del viento se presentaron datos muy dispersos que no se aproximaron a los valores reales para ninguna de las tres EMAS, indica que no se puede predecir el valor de éstas con el método de akima (Akima *et al.*, 2013).

Existen otros algoritmos que pueden incluir variables meteorológicas adicionales para la interpolación y pueden ser más precisos. Tal es el caso de Stahl *et al.* (2006), los cuales demostraron que los modelos (utilizados en su investigación) para realizar interpolación, se desempeñaron mejor con mayor densidad de estaciones y los errores en la predicción también dependieron de la elevación y el mes. No obstante, en este trabajo únicamente se tuvieron datos disponibles de coordenadas geográficas y datos meteorológicos, por lo que no fue posible incluir un método que incluya elevación para disminuir el error en la estimación. Otro motivo por el cual se utilizó el método mejorado de akima (Akima *et al.*, 2013), fue el hecho de que

generalmente son terrenos planos grandes las tierras destinadas a la producción de cultivos que utilizan sistemas de riego por gravedad.

4. CONCLUSIONES

La aplicación elaborada que calcula la interpolación de variables climáticas tiene la capacidad de ejecutarse a nivel horario y tomar datos de cualquier estación meteorológica automática para interpolar datos en donde se desea, por lo que con ésta se pueden interpolar variables meteorológicas en tiempo real (cada hora).

Las variables meteorológicas con una interpolación estimada más aproximada a los valores reales, con el método de interpolación espacial de akima (con la opción linear igual a falso) son la temperatura, seguida por la humedad relativa, la evapotranspiración de referencia, la radiación solar y, la velocidad del viento a nivel horario en el periodo analizado. Es necesario indicar que la velocidad del viento presentó la dispersión más alta de todas las variables meteorológicas analizadas, los coeficientes de determinación más pequeños y las pendientes (en la prueba de significación de la regresión de datos interpolados y datos reales) más lejanas al valor 1.

5. LITERATURA CITADA

Akima, H., A. Gebhardt, T. Petzoldt, and M. Maechler. 2013. Akima: Interpolation of irregularly spaced data. R package version 0.5-9. <http://CRAN.R-project.org/package=akima>. Accessed January 2013.

Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Vol. 56.

Chen, D. L., T. H. Ou, L. Gong, C.-Y. Xu, W. J. Li, C.-H. Ho, and W. H. Qian. 2010. Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951–2005. *Advances in Atmospheric Sciences* 27(6): 1221–1232.

Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R. Second Edition*. Springer Science Business Media, LLC. New York, NY, USA. 364p.

Daly, C. 2006. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology* 26: 707–721.

De Tisi, F. and A. Valtulina. 2000. Remark on algorithm 761: scattered-data surface fitting that has the accuracy of a cubic polynomial. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 26(1): 46-48.

ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2006. *ArcGis 9.2, Geoestatistical analyst tutorial*. New York, NY, USA.

Estévez, J., P. Gavilán, and J. V. Giráldez. 2011. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. *Journal of Hydrology* 402(1): 144-154.

Gattinoni, N., T. Boca, C. Rebella, y C. Di Bella. 2011. Comparación entre observaciones meteorológicas obtenidas de estaciones convencionales automáticas a partir de la estimación de parámetros estadísticos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 37(1): 75-85.

Kofler, M. 2005. *The Definitive Guide to MySQL 5*. David Kramer. Third edition. APRESS. New York, NY, USA. 172p.

Korhonen, K., Donadini, F., Riisager, P., and Pesonen, L. J. 2008. GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(4): 1-14.

Leal-Nares, O. A., M. E. Mendoza, y E. Carranza G. 2010. Análisis y modelamiento espacial de información climática en la cuenca de Cuitzeo, México. *Investigaciones Geográficas* 72: 49-67.

Liu, Z. P., M. A. Shao, and Y. Q. Wang. 2012. Large-scale spatial interpolation of soil pH across the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*.

Principi, M., R. Manno, C. Bortis, M. Escobar, C. Urani, D. Díaz, G. Lucero, y F. Peris. 2011. Diseño Construcción y Desarrollo de una Estación Meteorológica con Comunicación por Radioenlace y Posicionamiento Global. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 15:09.57-09.64

R Development Core Team. 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Ver. 2.13.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

Randolph, N., D. Gardner, M. Minutillo, and C. Anderson. 2010. Professional Visual Studio 2010. Wrox. Wiley Publishing, Inc, Indianapolis, Indiana. 1177 p.

Renka, R. J., & R. Brown. 1999. Algorithm 792: accuracy test of ACM algorithms for interpolation of scattered data in the plane. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS) 25(1): 78-94.

Stahl, K., R. D. Moore, J. A. Floyer, M. G. Asplin, and I. G. McKendry. 2006. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. Agricultural and Forest Meteorology, 139(3), 224-236.

Wagner, P. D., P. Fiener, F. Wilken, S. Kumar, and K. Schneider. 2012. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. Journal of Hydrology 464-465: 388-400.

Wang, T., A. Hamann, D. L. Spittlehouse and T.Q. Murdock. 2012. ClimateWNA-High-resolution spatial climate data for western North America. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 51(1): 16-29.

Yao, X., B. Fu, Y. Lü, F. Sun, S. Wang, and M. Liu. 2013. Comparison of Four Spatial Interpolation Methods for Estimating Soil Moisture in a Complex Terrain Catchment. PLoS ONE 8(1):1-13.

CAPÍTULO III. PREDICCIÓN DE VARIABLES METEOROLÓGICAS POR MEDIO DE MODELOS ARIMA

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹,
Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³
*¹Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. ²Departamento de Irrigación, Universidad
Autónoma Chapingo. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.*

RESUMEN

En la actualidad, la predicción de las variables meteorológicas se aplica a varias áreas, por ejemplo en la agricultura o en aquellas que involucran planear o tomar decisiones en el presente y así prevenir el futuro esperado. El objetivo del presente trabajo fue estimar la predicción de la temperatura, radiación solar, evapotranspiración de referencia, humedad relativa y velocidad del viento cada dos horas hasta un máximo de 48 horas siguientes, por medio de los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA). Para esto se integró la librería ‘forecast’ del programa R Statistics 2.15.3 en una aplicación que se desarrolló en Visual Studio, que se activa como una tarea programada en tiempo real a partir de la información de los 10 días previos. Se evaluaron dos periodos de predicción, uno en el mes de Marzo y otro en el mes de Junio. Los resultados indicaron que las predicciones de las variables meteorológicas (temperatura, radiación, evapotranspiración de referencia y humedad relativa) encontradas en el periodo de Junio en los siguientes dos días son mejores que las obtenidas en el periodo de Marzo y se encontró que en ambos periodos la media de los datos observados de la variable meteorológica velocidad del viento es mejor que la predicción obtenida con los modelos.

Palabras clave: Pronóstico, R Statistcs, tiempo real.

METEOROLOGICAL VARIABLES PREDICTION THROUGH ARIMA MODELS

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

ABSTRACT

At the present time, the prediction of meteorological variables is applied to various areas, for example in agriculture, among others, but primarily those involving planning or making decisions in the present and prevent future expected. The aim of this study was to estimate the prediction of temperature, solar radiation, reference evapotranspiration, relative humidity and wind speed every two hours to a maximum of 48 hours, by means of the autoregressive integrated moving average (ARIMA) models. It was joined the library 'forecast' from Statistics program R 2.15.3 on an application that was developed in Visual Studio, which is activated as a scheduled task in real time with the information of the previous 10 days. We assessed two periods, one in the month of March and another in June. The results indicated that the predictions of meteorological variables (temperature, radiation, reference evapotranspiration and relative humidity) found in the period of June in the next two days are better than those obtained in the period of March and it was found that in the two periods the average of the observed data of the meteorological variable wind speed are better than those obtained with the models.

Keywords: Forecasting, R Statistics, real time.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han alcanzado grandes progresos en el desarrollo y las aplicaciones de la predicción del tiempo a medio plazo y la predicción estacional del clima (Vitart *et al.* 2012). Los algoritmos de predicción automáticas más populares son con base en el suavizado exponencial o modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) (Hyndman and Khandakar, 2008). Box y Jenkins (1976) desarrollaron la metodología clásica que emplea las series de tiempo para generar modelos como el autoregresivo de media móvil (ARMA) o también el modelo ARIMA para obtener predicciones. Los modelos antes mencionados han sido utilizados en el pasado para obtener predicciones a nivel horario en velocidad del viento (Kavasseri *et al.*, 2009). Torres *et al.* (2005) usaron el modelo ARMA y el modelo de persistencia para predecir el promedio horario de velocidad del viento y encontraron que el modelo de ARMA tuvo menos errores después de la predicción de 10h. Kamal y Jafri (1997) usaron un modelo ARMA para predecir la velocidad del viento y concluyeron que los valores de predicción de varianza y velocidad del viento con un intervalo de confianza de 95% pueden ser aceptables para periodos cortos y largos de predicción. Cadenas y Rivera (2007) utilizaron los modelos ARIMA y redes neuronales artificiales (ANN) para aplicarlos en la velocidad del viento en La Venta, Oaxaca, México y encontraron que los modelos ARIMA presentaron un mejor ajuste y predicción en el caso de estudio en particular.

Además del viento, se han hecho estudios para predecir otras variables meteorológicas mediante modelos ARIMA.

Karl *et al.* (1999) realizó una investigación para encontrar evidencia de aumento en la tasa de calentamiento global usando la serie de tiempo de la temperatura media global indicada por

Quayle et al. (2000), por medio del análisis de valores mensuales de temperatura y apoyándose con modelos ARMA.

Reikard (2009) hizo una investigación dirigida a predecir la radiación solar en intervalos de tiempo cortos, que van de 5 minutos hasta varias horas aunque los datos exhibieron variabilidad no lineal debido a la nubosidad, en casi todas las pruebas, se obtuvieron los mejores resultados usando los modelos ARIMA. Pulido (2002) propuso la estimación de la demanda de agua en las próximas 24 horas en un sistema de distribución de agua para riego apoyándose en modelos ARIMA y otros modelos. Chattopadhyay y Chattopadhyay (2010) realizaron una investigación para predecir la lluvia del monzón de verano en la India e identificaron un modelo ARIMA como adecuado, no obstante, el modelo de redes neuronales autorregresivas (ARNN) tuvieron mejores predicciones. Narayanan *et al.* (2013) utilizó modelos ARIMA para predecir las lluvias antes del monzón en el oeste de la India.

Es esencial indicar que esto demuestra que la predicción de las variables meteorológicas es muy importante en la vida actual y es aplicable en un sinnúmero de investigaciones, principalmente para aquellas que involucran planear o tomar decisiones a futuro.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue elaborar un programa de cómputo que indique la predicción en tiempo real (cada dos horas) de algunas variables meteorológicas utilizando modelos ARIMA. Así mismo se pretende identificar a las variables meteorológicas que tienen mejor aproximación en la predicción a los valores reales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar esta investigación se utilizó una computadora con procesador de 2.2 GHz, 2 GB de memoria RAM y sistema operativo Windows 7.

Adicionalmente fue necesario instalar en la computadora el programa de cómputo MySQL Server, es un gestor de bases de datos para almacenar información (Korhonen *et al.*, 2008); MySQL Conector Net 6.3.5 que es un conector del programa Microsoft Visual Studio 2010 con MySQL Server (Kofler, 2005); Microsoft Visual Studio 2010 que es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones Web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles (Randolph *et al.*, 2010); R Statistics 2.15.3, un paquete de cómputo estadístico (Dalgaard, 2008); librerías ‘rcom’ y ‘rscproxy’ del programa R Statistics 2.15.3 (conectores del programa R Statistics 2.15.3 con Microsoft Visual Studio 2010); y la librería ‘forecast’ del programa R Statistics 2.15.3, se utilizó para realizar la estimación y predicción de los modelos ARIMA.

Se elaboró una base de datos que se integra de dos tablas de datos en el programa MySQL Server para almacenar información meteorológica (Figura 1). La primera se denominó ‘estación’ y fue destinada para guardar información de estaciones meteorológicas tal como identificador de estación, latitud, longitud, altitud y nombre; la llave primaria es el identificador de estación. La segunda se denominó ‘elemhoraria’, que tuvo el objetivo de almacenar la información de los datos meteorológicos a nivel horario de estaciones meteorológicas; los datos que se almacenan en esta tabla son: fecha y hora, evapotranspiración (mm), velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), temperatura media ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), y un identificador de estación de la cual provienen los datos; la llave primaria es la unión de los datos de fecha e identificador de estación.

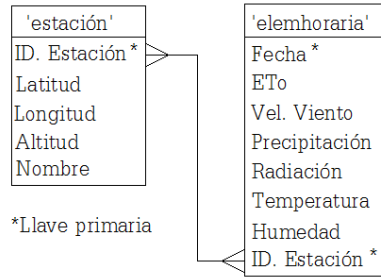


Figura 1. Base de datos.

En la Figura 1 se puede ver que una estación puede tener muchos registros a nivel horario y muchas estaciones pueden tener datos meteorológicos para una hora en particular.

2.1. Datos meteorológicos

Para comprobar la bondad predictiva de los modelos ARIMA, se utilizaron datos de tres estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) del Servicio Meteorológico Nacional (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas consideradas en el estudio.

Nombre	Longitud	Longitud	Altitud (m)
	(grados, minutos, segundos)		
ENCB. II del IPN	99°08'43"	19°29'55"	2240
Acolman, México	98°54'42"	19°38'05"	2269
Chapingo, México	98°53'19"	19°29'39"	2260

Se eligieron las EMAS indicadas en el Cuadro 1 ya que presentaron datos continuos a nivel horario de distintas variables meteorológicas en dos periodos. El primer periodo está comprendido entre las fechas 10 de Marzo de 2013 a las 3:00 horas y el 21 de marzo de 2013 a las 1:00 horas; el segundo está comprendido entre las fechas 14 de Junio de 2013 a las 6:00 horas y 27 de Junio de 2013 a las 2:00 horas. Las variables meteorológicas obtenidas de las EMAS fueron: velocidad del viento (m/s), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), temperatura

media (°C), humedad relativa (%). Adicionalmente, se calculó la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith (Allen, 2006) con los datos anteriores.

2.2. Estimación de la predicción

Se desarrollo una aplicación ejecutable (.exe) con el software Microsoft Visual Studio 2010, que realiza diferentes funciones para llevar a cabo la predicción de las variables meteorológicas. La primera función recolecta datos de archivos de texto con extensión ‘.txt’ que contienen datos meteorológicos a nivel horario de distintas EMAS y los organiza por fecha y por identificador de EMA; los datos obtenidos se guardan en la tabla de datos ‘elemhoraria’. Esta función también calcula la evapotranspiración de referencia por el método de Penman Monteith (Allen, 2006) que la almacena en la misma tabla de datos.

La segunda función generar las series de tiempo de cada EMA y de cada variable meteorológica. Para ello se crea un archivo de texto con extensión ‘.txt’ que guarda la información de cinco variables meteorológicas para cada EMA (Cuadro 1). Dicho archivo tiene ocho columnas por cada fila, donde la primera fila contiene los nombres de las variables meteorológicas, sin embargo, únicamente se analizaron cinco variables que están en la primera columna que contiene la velocidad del viento en m/s, en la tercera que contiene la temperatura en °C, la cuarta que contiene a la humedad relativa en %, la séptima que contiene la radiación solar en W/m^2 y la octava contiene la evapotranspiración de referencia (dato calculado) en mm.

Es necesario indicar que en la tabla de datos ‘elemhoraria’ se tienen variables meteorológicas a nivel horario, sin embargo, estas se filtraron para guardar las mediciones ya sea únicamente de horas pares o bien, únicamente de horas nones en el archivo (Figura 2).

Para el primer periodo las variables meteorológicas de la hora 3:00 del 10 de Marzo de 2013 se almacenaron primero, seguido de los datos de la hora 5:00 del 10 de Marzo de 2013 y los últimos

datos guardados corresponden a la hora 1:00 del 19 de Marzo del 2013. Esto indica que la serie de tiempo generada para el primer periodo contiene 108 datos equivalentes a 9 días (por variable meteorológica).

Para el segundo periodo las variables meteorológicas de la hora 6:00 del 14 de Junio del 2013 se guardaron primero, seguido de los datos de la hora 8:00 de 14 de Junio del 2013 y los últimos datos guardados corresponden a la hora 22:00 del 23 de Junio del 2013. Por esto la serie de tiempo contiene 117 datos para cada variable meteorológica. Es necesario indicar que la máxima cantidad de datos que se toman en cuenta para generar la serie de tiempo se estableció en 117, es decir, abarca 9 días y 18 horas.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
VELS	VELR	TEMP	HR	PB	PREC	RADSOL	ETO	
1.11	5.6	16.6	84	780.2	0	0	0	
1.62	5.4	15.9	88	780.2	0	0	0	
3.72	9.2	15.2	91	780.2	0	0	0	
5.75	12.5	15	89	779.8	0	0	0.0083859	
1.59	9.4	14.7	90	779.6	0	0	0	
3.45	6.9	14	93	779.3	0	0	0	
3.26	7.2	13.9	94	779.2	0	0	0	
3.61	7.1	13.9	94	779.3	0	0	0	
4.56	8.9	13.5	95	779.7	0	14.5	0.0262741	
3.9	9.4	14.4	95	780.2	0	119	0.0653146	
2.33	9.4	16.6	86	780.5	0	299.5	0.1688914	

Figura 2. Archivo de texto con variables meteorológicas.

La tercera función se encarga de realizar la predicción; como primer paso se establece una conexión entre el programa “R Statistics 2.15.3” con el programa Microsoft Visual Studio 2010; el lenguaje de programación fue C#. Posteriormente se le indica al programa “R Statistics 2.15.3” que haga el ajuste de los datos a un modelo ARIMA usando la función `auto.arima` de la librería `forecast` (Hyndman *et al.*, 2013) a partir de la información del archivo indicado en la Figura 2; después de lo anterior, ya con el modelo ARIMA estimado automáticamente se le indica al programa “R Statistics 2.15.3” que haga la predicción de los 24 elementos siguientes en la serie de tiempo. En caso de que no haya ajuste a ningún ARIMA, el programa disminuye la

cantidad de datos en la serie hasta encontrar un ajuste, no obstante la cantidad de datos mínima para ajustar el modelo se estableció en 96 datos.

La última función consiste en guardar las predicciones obtenidas con el programa “R Statistics 2.15.3”. Para hacer lo anterior, se crean archivos de texto con extensión ‘.txt’ y en estos se almacenan las predicciones obtenidas; el nombre del archivo es la unión del nombre de la EMA, el nombre de la variable y la palabra PRED al final (para indicar que es predicción). En la Figura 3 se muestra el archivo generado de la estación Acolman para la variable radiación solar.

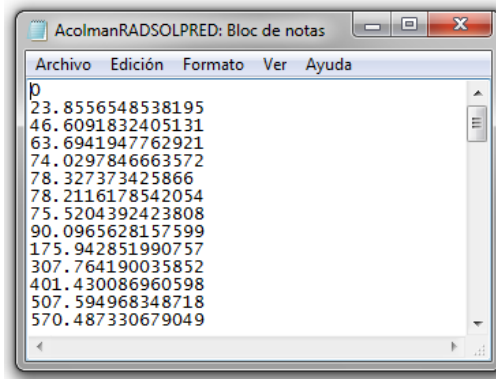


Figura 3. Archivo generado con datos de la predicción estimada del programa “R Statistics 2.15.3” para la EMA Acolman y la variable meteorológica radiación solar (W/m^2).

Es importante indicar que en el archivo texto generado por la predicción (Figura 3), en la primera línea se tiene la predicción de la variable dos horas después de terminar la serie de tiempo, es decir, para el segundo periodo, el primer dato corresponde a la hora 0:00 del 24 de Junio del 2013 debido a que la serie de tiempo termina el 23 de Junio del 2013 a las 22:00 horas. Finalmente se agregó el software generado a una tarea programada en Windows[®] 7 Ultimate para estimar cada dos horas la predicción temporal de las variables meteorológicas, para tenerla actualizada en tiempo real.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluó la precisión de la predicción en los dos periodos. Inicialmente se evaluó el primer periodo, que está ubicado en el mes de Marzo y comprende del 10 de Marzo de 2013 a las 3:00 horas hasta el 21 de Marzo de 2013 a las 1:00 horas; de este periodo, los datos entre las fechas 10 de Marzo de 2013 a las 3:00 horas hasta el 19 de Marzo de 2013 a las 1:00 horas fueron utilizados para generar la serie de tiempo y los datos contenidos entre las fechas 19 de Marzo de 2013 a las 3:00 al 21 de Marzo de 2013 a las 1:00 horas fueron utilizados para compararlos con los datos estimados con el modelo de predicción. Posteriormente se evaluó la precisión de la predicción en el segundo periodo que está comprendido entre las fechas 14 de Junio de 2013 a las 6:00 horas y 25 de Junio de 2013 a las 22:00 horas. Del periodo anterior, los datos contenidos entre las fechas 14 de Junio de 2013 a las 6:00 horas y el 23 de Junio de 2013 a las 22:00 horas se utilizaron para generar la serie de tiempo. Así mismo los datos incluidos entre las fechas 24 de Junio de 2013 a las 0:00 horas y el 25 de Junio de 2013 a las 22:00 horas se usaron para compararlos con los datos de las predicciones estimadas con el programa “R Statistics 2.15.3”.

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la temperatura en las tres EMAS analizadas para el primer periodo.

Cabe aclarar que se realizó la predicción para 24 tiempos hacia adelante, por lo que la primer predicción en el periodo de Marzo corresponde a la estimación de datos meteorológicos de la fecha 19 de Marzo de 2013 a las 3:00 horas, la segunda predicción corresponde a la fecha 19 de Marzo de 2013 a las 5:00 horas y la predicción número 24 corresponde a la fecha 21 de Marzo de 2013 a la 1:00 hora. De igual manera, la primer predicción en el periodo del mes de Junio corresponde a los datos estimados para la fecha 24 de Junio de 2013 a las 0:00 horas, la segunda

predicción corresponde a la fecha 24 de Junio de 2013 a las 2:00 horas y la predicción número 24 corresponde a la fecha 25 de Junio de 2013 a las 22:00 horas.

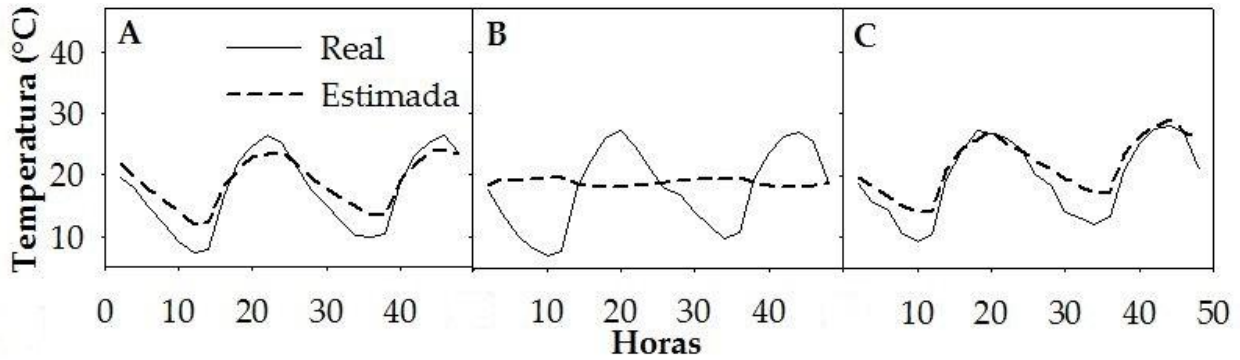


Figura 4. Predicción y diagrama de dispersión de la temperatura para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la temperatura en las tres EMAS analizadas para el segundo periodo.

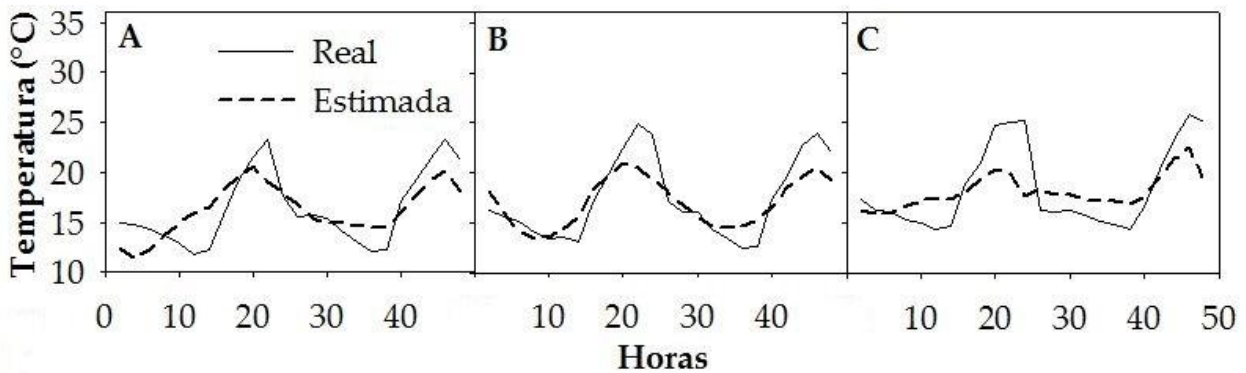


Figura 5. Predicción y diagrama de dispersión de la temperatura para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la radiación solar en las tres EMAS para el primer periodo.

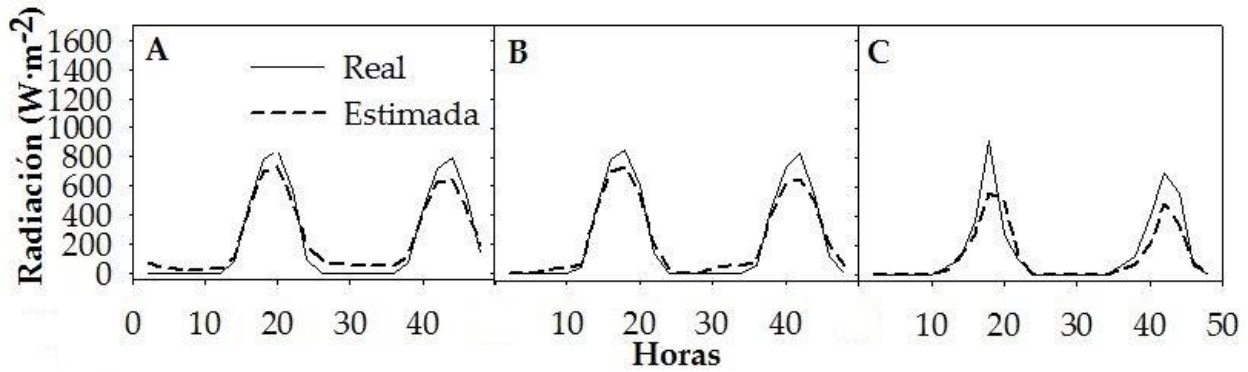


Figura 6. Predicción y diagrama de dispersión de la radiación solar para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la radiación solar en las tres EMAS para el segundo periodo.

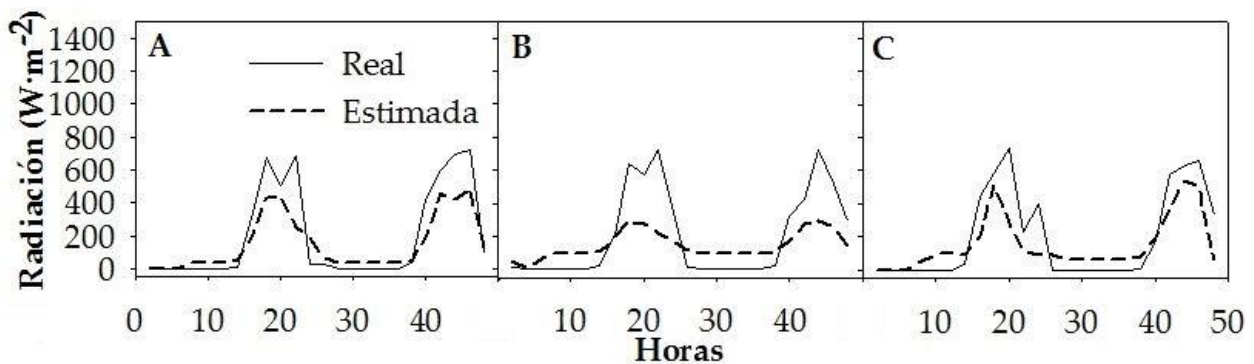


Figura 7. Predicción y diagrama de dispersión de la radiación solar para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman Monteith (Allen, 2006) en las tres EMAS que se consideraron para el primer periodo.

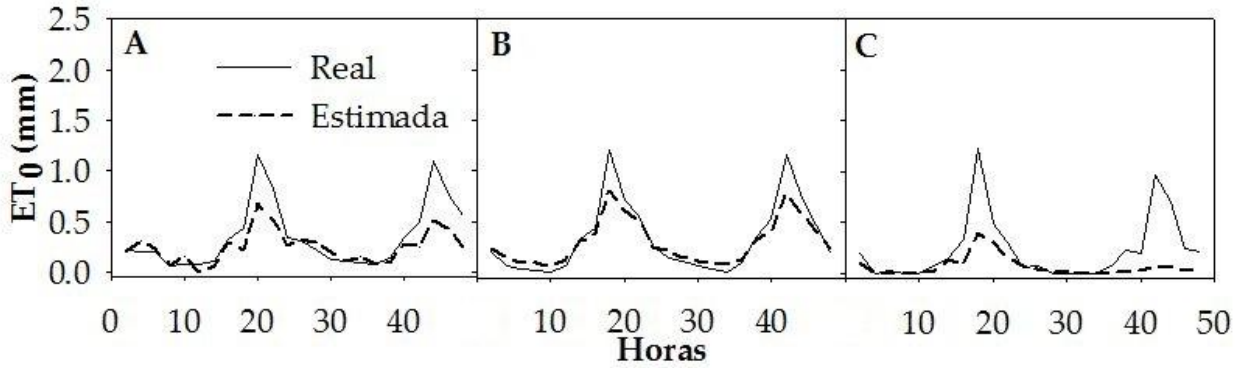


Figura 8. Predicción y diagrama de dispersión de la evapotranspiración (calculada con la metodología de Allen (2006)), para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman Monteith (Allen, 2006) en las tres EMAS que se consideraron para el segundo periodo.

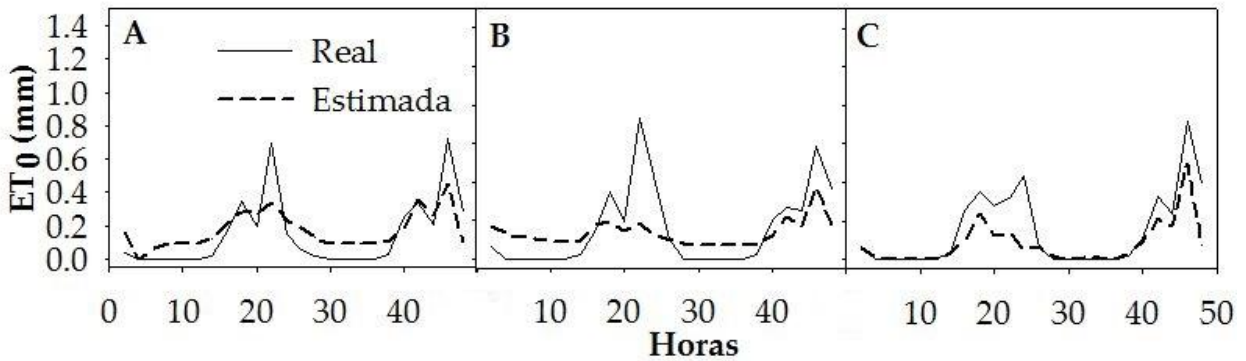


Figura 9. Predicción y diagrama de dispersión de la evapotranspiración (calculada con la metodología de Allen (2006)), para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).

En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la humedad relativa en las tres EMAS analizadas para el primer periodo.

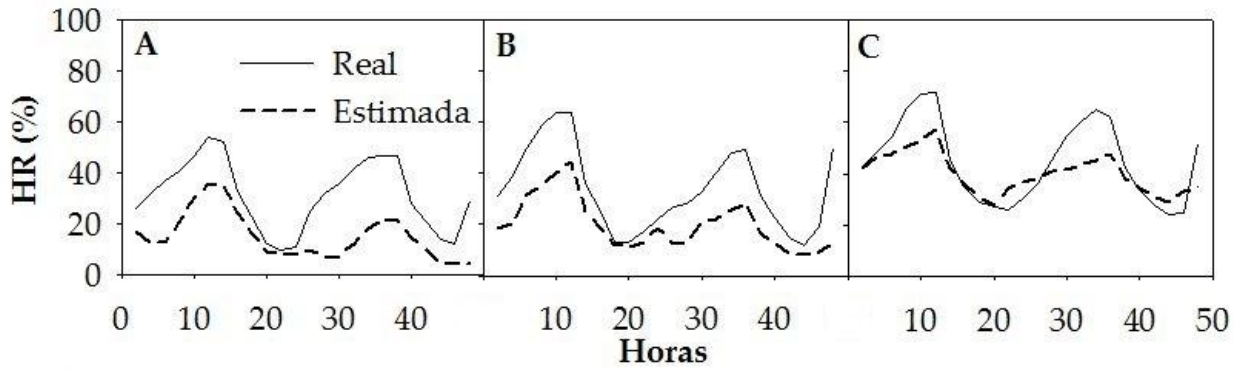


Figura 10. Predicción y diagrama de dispersión de la humedad relativa para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el primer periodo (Marzo).

En la Figura 11 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la humedad relativa en las tres EMAS analizadas para el segundo periodo.

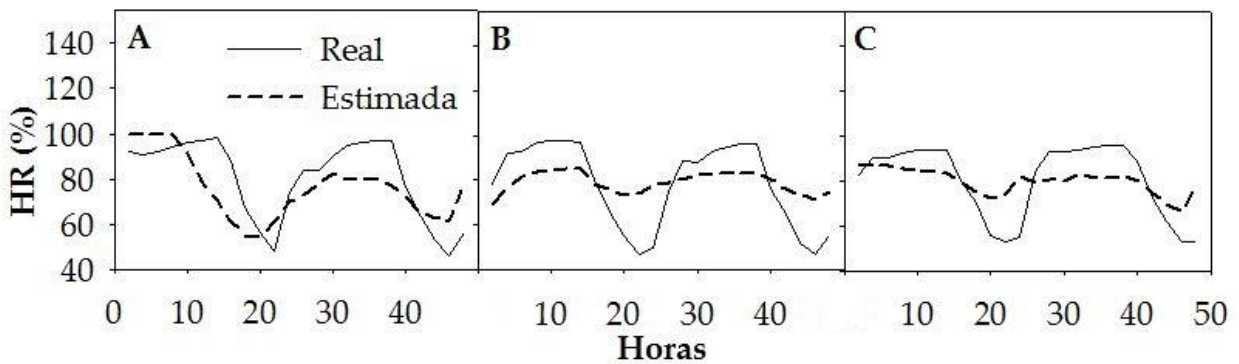


Figura 11. Predicción y diagrama de dispersión de la humedad relativa para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) en el segundo periodo (Junio).

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la velocidad del viento en las tres EMAS analizadas en el primer periodo.

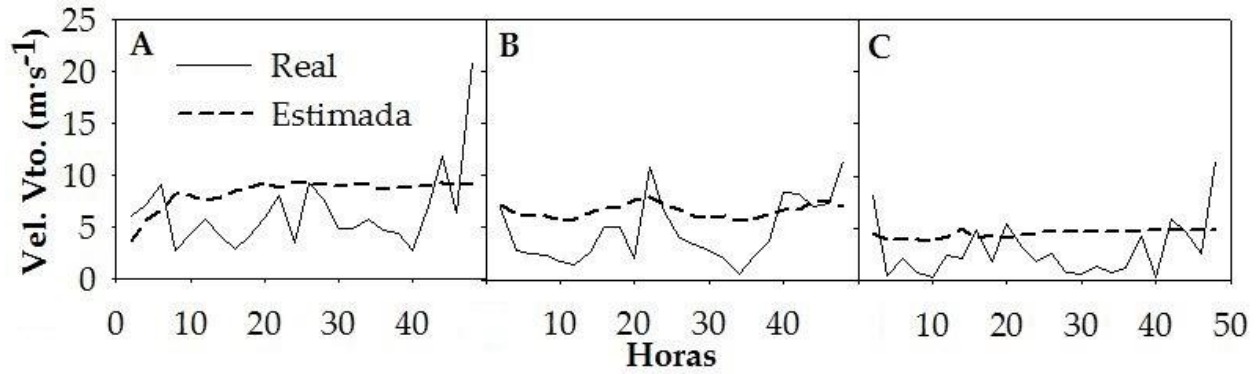


Figura 12. Predicción y diagrama de dispersión de la velocidad del viento para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) para el primer periodo (Marzo).

En la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos de predicción para la velocidad del viento en las tres EMAS analizadas en el segundo periodo.

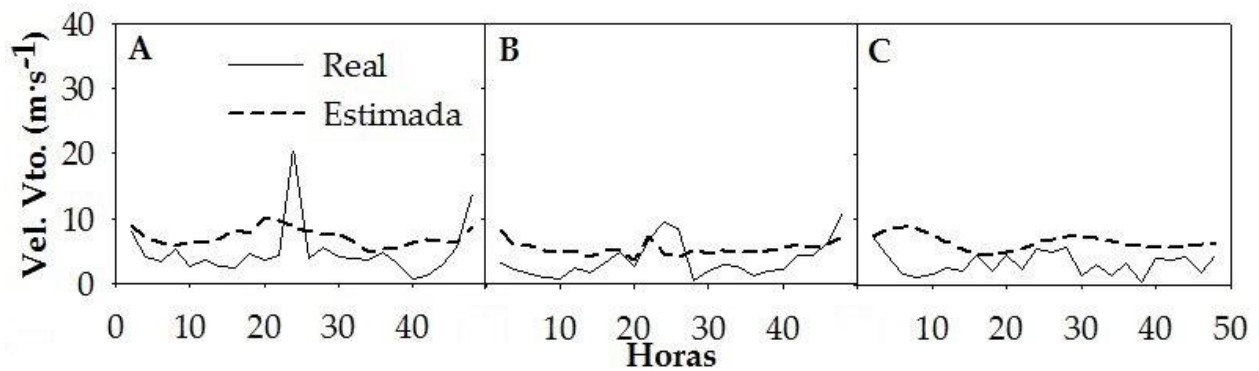


Figura 13. Predicción y diagrama de dispersión de la velocidad del viento para la EMA Acolman (A), Chapingo (B) y ENCB. II del IPN (C) para el segundo periodo (Junio).

Para evaluar la bondad de ajuste de los modelos se utilizó el coeficiente de eficiencia de modelo de Nash-Sutcliffe. Estos coeficientes se calcularon con la función NSE de la librería hydroGOF (Zambrano, 2013), del programa de cómputo 'R Statistics 2.15.3'. En el Cuadro 2 se muestran los valores del NSE para las variables meteorológicas de los dos periodos analizados.

Cuadro 2. Valores del coeficiente de eficiencia de modelo de Nash-Sutcliffe para las variables meteorológicas de las tres EMAS en ambos periodos analizados.

	ENCB II. IPN	CHAPINGO	ACOLMAN
PRIMER PERIODO (MARZO)			
Temperatura	0.75	-0.20	0.79
Radiación solar	0.78	0.96	0.95
ETr ^a	0.07	0.86	0.56
Humedad relativa	0.57	-0.01	-0.88
Vel. Vto.	-0.31	-0.19	-0.35
SEGUNDO PERIODO (JUNIO)			
Temperatura	0.75	0.73	0.57
Radiación solar	0.65	0.43	0.73
ETr ^a	0.53	0.37	0.61
Humedad relativa	0.38	0.34	0.37
Vel. Vto.	-0.31	-0.30	-0.15

^aEtr, evapotranspiración de referencia.

Con los valores del coeficiente de eficiencia de modelo de Nash-Sutcliffe (NSEC) obtenidos en el primer periodo (Cuadro 2), se encontraron aproximaciones mejores que la media de los datos observados para; las variables meteorológicas temperatura, radiación solar y humedad relativa en la EMA ENCB II. IPN; radiación solar y evapotranspiración en la EMA Chapingo y; temperatura, radiación y evapotranspiración de referencia en la EMA Acolman.

Las variables meteorológicas temperatura, radiación solar, evapotranspiración de referencia y humedad relativa en el segundo periodo mostraron aproximaciones mejores que la media de los datos observados en las tres estaciones meteorológicas.

Cabe mencionar que con respecto a la velocidad del viento, se encontró que la media de los datos observados predice mejor que el modelo en ambos periodos.

Con lo anterior, se puede observar que en el primer periodo, la predicción de los modelos fue mejor para la radiación solar en las tres estaciones meteorológicas, sin embargo esto no ocurrió

para las demás variables meteorológicas, en cambio en el segundo periodo, las variables meteorológicas analizadas (excepto velocidad del viento) mostraron un mejor ajuste del modelo que la media de los datos observados en todas las EMAS.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de computadora que estima la predicción de variables meteorológicas tiene la capacidad de ejecutarse en tiempo real (cada dos horas), y estimar predicciones de las variables meteorológicas temperatura, radiación solar, evapotranspiración de referencia, humedad relativa, y velocidad del viento dos días hacia delante.

De acuerdo con las series de tiempo analizadas, las predicciones encontradas en el periodo de Junio en los siguientes dos días es mejor que la obtenida en el periodo de Marzo, no obstante, las predicciones obtenidas con los modelos de la variable radiación solar son mejores en el periodo de Marzo.

Adicionalmente se concluye que las predicciones de las variables temperatura, radiación, evapotranspiración de referencia y humedad relativa se pueden obtener con aproximaciones mejores que la media de los datos observados en el periodo de Junio.

La media de los datos observados en el caso de la velocidad del viento predice mejor que las predicciones de los modelos en ambos periodos.

5. LITERATURA CITADA

Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO Vol. 56.

Box, G. E. and Jenkins, G. M. 1976. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Revised Ed., Holden-Day, San Francisco.

Cadenas, E., & Rivera, W. 2007. Wind speed forecasting in the south coast of Oaxaca, Mexico. *Renewable energy*, 32(12), 2116-2128.

Chattopadhyay, S., & Chattopadhyay, G. 2010. Univariate modelling of summer-monsoon rainfall time series: comparison between ARIMA and ARNN. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(2), 100-107.

Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R. Second Edition.* Springer Science Business Media, LLC. New York, NY, USA. 364p.

Hyndman, R.J. and Khandakar, Y. 2008. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26(3).

Hyndman R. J., Athanasopoulos G., Razbash S., Schmidt D., Zhou Z., Khan Y., Bergmeir C. 2013. Forecasting functions for time series and linear models. R package version 4.06. <http://cran.r-project.org/web/packages/forecast>. Accessed June 2013.

Kamal, L., & Jafri, Y. Z. 1997. Time series models to simulate and forecast hourly averaged wind speed in Quetta, Pakistan. *Solar Energy*, 61(1): 23-32.

Karl, T. R., Knight, R. W., & Baker, B. 2000. The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: Evidence for an increase in the rate of global warming?. *Geophysical Research Letters*, 27(5):719-722.

Kavasseri, R. G., & Seetharaman, K. 2009. Day-ahead wind speed forecasting using f-ARIMA models. *Renewable Energy*, 34(5):1388-1393.

Kofler, M. 2005. *The Definitive Guide to MySQL 5*. David Kramer. Third edition. Apress. New York, NY, USA. 172p.

Korhonen, K., Donadini, F., Riisager, P., and Pesonen, L. J. 2008. GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9(4): 1-14.

Narayanan, P., Basistha, A., Sarkar, S., & Kamna, S. 2013. Trend analysis and ARIMA modelling of pre-monsoon rainfall data for western India. *Comptes Rendus Geoscience*.

Pulido C., I.; Roldán C., J.; López L., R. & Gutiérrez E., J. C. 2002. Técnicas de predicción a corto plazo de la demanda de agua. Aplicación al uso agrícola. *Ingeniería del agua*, 2002, vol. 9, núm. 3.

Quayle, R. G., Peterson, T. C., Basist, A. N., & Godfrey, C. S. 1999. An operational near-real-time global temperature index. *Geophysical research letters*, 26(3), 333-335.

Randolph, N., D. Gardner, M. Minutillo, and C. Anderson. 2010. Professional Visual Studio 2010. Wrox. Wiley Publishing, Inc, Indianápolis, Indiana. 1177 p.

Reikard, G. 2009. Predicting solar radiation at high resolutions: A comparison of time series forecasts. *Solar Energy*, 83(3):342-349.

Torres, J. L., Garcia, A., De Blas, M., & De Francisco, A. 2005. Forecast of hourly average wind speed with ARMA models in Navarre (Spain). *Solar Energy*, 79(1): 65-77.

Vitart, F., Robertson, A. W., & Anderson, D. L. 2012. Proyecto de predicción subestacional a estacional: tendiendo un puente entre el tiempo y el clima. *Boletín de la OMM*, 61(2), 23.

Zambrano B., M. 2013. hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series, r package version 0.3-2. URL <http://CRAN.R-project.org/package=hydroGOF>. Accessed August 2013.

CAPÍTULO IV.

ALERTA Y PREDICCIÓN DE RIEGO MEDIANTE DISPOSITIVOS MÓVILES

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

¹*Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.* ²*Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.* ³*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.*

RESUMEN

En la actualidad ha crecido el uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC's) tanto en México como a nivel Mundial para abastecer las necesidades en el ámbito agrícola. Entre los usos más importantes de las TIC's en la agricultura destacan el control a distancia de dispositivos agrícolas para el riego y abastecer de información tanto a agricultores como a sistemas de cómputo para procesar la información para la toma de decisiones con respecto al momento del riego. Lo anterior surgió debido a la necesidad de conocer el momento del riego y la cantidad necesaria para abastecer de agua al suelo de diferentes parcelas ya que en un sinnúmero de ocasiones, por desconocer este dato, se riega de manera constante y sin medida, provocando con ello un uso excesivo del agua. Cabe mencionar que en el Colegio de Postgraduados se han realizado programas de cómputo para obtener el contenido volumétrico de agua en el suelo basado en el balance hídrico climático, interpolación espacial de variables meteorológicas, predicción de variables meteorológicas y páginas web para monitorear en tiempo real el contenido volumétrico de agua en el suelo. Por ello, en este trabajo se planteó conjuntar esas tecnologías desarrolladas para elaborar un sistema de alertas y respuestas automáticas para mantener informado a los productores. Se concluyó que el servicio de mensajes cortos (SMS) es un servicio confiable para mantener informados a los agricultores y apoyarlos en la toma de decisiones respecto a la humedad de su parcela.

Palabras clave: contenido volumétrico de agua en el suelo, teléfono celular, variables meteorológicas.

ALERT AND IRRIGATION PREDICTION THROUGH MOBILE DEVICES

Graciano Javier Aguado Rodríguez¹, Abel Quevedo Nolasco¹, Martiniano Castro Popoca¹, Ramón Arteaga Ramírez², Mario Alberto Vázquez Peña², Bertha Patricia Zamora Morales³

ABSTRACT

Today has grown the use of information technology and communication (ICT), both in Mexico and Worldwide to meet the needs in the agricultural sector. Among the most important uses of ICT's in agriculture include remote control devices for agricultural irrigation and supplying information to both farmers and computer systems to process the information for decision-making regarding the timing of irrigation. This arose due to the need to know the time of irrigation and the amount needed to supply water to the ground from different plots because in a number of occasions, by ignoring this fact, it is watered constantly and without measure, provoking this excessive use of water. Note that in the Colegio de Postgraduados have made computer programs for volumetric water content in the soil water balance based on climate, spatial interpolation of meteorological variables, prediction of meteorological variables and websites to monitor in real time the volumetric water content in the soil. Therefore, in this work was developed to combine these technologies to develop a system of alerts and automatic responses to keep producers informed. It was concluded that the short message service (SMS) is a reliable service to keep informed and support farmers in making decisions regarding the moisture from their plots.

Keywords: volumetric water content in the soil, cell phone, meteorological variables.

1. INTRODUCCIÓN

Es importante indicar que el uso del teléfono celular en la actualidad se ha expandido a varias áreas del conocimiento y una de ellas es la agricultura. En el ámbito agrícola uno de los usos más importantes que se le ha dado al teléfono celular es el control a distancia de dispositivos agrícolas y para solicitar y brindar información con buenos resultados. Maddipatla *et al.* (2012) implementaron un sistema de control a distancia de motores con teléfonos celulares en el campo agrícola y concluyó que un agricultor es capaz de utilizarlo desde cualquier distancia y así tener un mejor manejo del agua. Arefin *et al.* (2012) implementaron un sistema de riego automatizado y utilizaron un sofisticado sistema de monitoreo con base en servicio de mensajes cortos (SMS). De igual manera Huo *et al.* (2012) realizaron un sistema de control remoto para desempeñar el control del riego con base en SMS y concluyeron que su sistema es adecuado para grandes aplicaciones y grandes áreas. Xie *et al.* (2013) elaboraron un sistema para controlar vía remota (con el SMS) motores y bombas de sistemas de riego y adicionalmente para proteger los equipos en caso de presentarse anomalías y sus resultados mostraron que el control de sus sistema puede ser operado constantemente y de manera fiable. Vishwakarma y Choudhary (2011) plantearon el objetivo de elaborar un sistema inalámbrico que puede controlar 8 dispositivos por medio del envío de mensajes cortos específicos utilizando el SMS de un teléfono celular y concluyeron que su controlador es extremadamente manejable en lugares donde se tiene que controlar el encendido y apagado de dispositivos pero no hay conexión vía cable disponible. Rahali *et al.* (2011) elaboraron un sistema para controlar los parámetros climáticos por medio del SMS en un invernadero y concluyeron que los agricultores pueden hacer uso de esta tecnología para controlar sus invernaderos en la distancia. Xue *et al.* (2010) elaboraron un sistema de control automático para riego en huertas, el cual, implementa el envío y recepción de mensajes de

manera eficiente por medio de comandos AT. Lugo *et al.* (2011) mostró un prototipo funcional, con base en la integración de tres tecnologías: computación, comunicaciones y electrónica para automatizar el control del riego para sistemas cerrados o abiertos.

Debido a que se han encontrado buenos resultados en el manejo del servicio de mensajes cortos (SMS) y la necesidad de conocer el momento y cantidad de riego para tener a los cultivos en condiciones adecuadas para su crecimiento. Así el objetivo de esta investigación fue el desarrollo de un sistema prototipo que envía alertas a los usuarios de alguna parcela en el momento en el cual se agote la humedad fácilmente aprovechable (HFA) y así solicitar el riego, otra opción es la consulta del estado hídrico en el suelo (EHS) dentro del HFA de una parcela por parte del agricultor, donde el sistema por vía celular envía de manera automática el nivel del EHS así como una estimación sobre la cantidad de horas en que la parcela no tendrá estrés hídrico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se requirió dos dispositivos móviles (teléfono celular) uno marca Nokia modelo C3-00 (con su propio sistema operativo), y otro marca LG-GT540f (con sistema operativo Android 1.5), una estación meteorológica automática (EMA) marca Campbell SCI y un Servidor HP con el sistema operativo Windows 7 con procesador Xeon de 2.2 GHz y 2 GB de memoria RAM. En el servidor se le instalaron diferentes programas de cómputo; uno fue MySQL Server, es un gestor de bases de datos para almacenar información (Korhonen et al., 2008); MySQL Conector Net 6.3.5 que es un conector del programa Microsoft Visual Studio 2010 con MySQL Server (Kofler, 2005); Microsoft Visual Studio 2010 que es un conjunto completo de herramientas de desarrollo para la generación de aplicaciones Web ASP.NET, Servicios Web XML, aplicaciones de escritorio y aplicaciones móviles (Randolph *et al.*, 2010); R Statistics 2.15.3, un paquete de

cómputo estadístico (Dalgaard, 2008); rcom y rscproxy (conectores del programa R Statistics 2.15.3 con Microsoft Visual Studio 2010); librería akima de R Statistics (Akima *et al.*, 2013) para realizar interpolación espacial; librería ‘forecast’ del programa R Statistics 2.15.3, se utilizó para realizar la estimación y predicción de los modelos ARIMA (Hyndman and Khandakar, 2008); LoggerNet 3.4.1, es un software que sirve para comunicar al servidor con el Data Logger CR1000 (Campbell, 2007) de cualquier estación meteorológica automática (EMA); Tera Term 4.71, se utilizó para realizar pruebas de comunicación entre el servidor y dispositivos móviles; Android SDK para emular y establecer librerías de código para desarrollar programas para celulares con sistema operativo Android en cualquier versión (Developers, 2011); Eclipse para desarrollar aplicaciones para celular con sistema operativo Android (cualquier versión) utilizando las librerías de Android SDK (Girónes, 2011); PC Suite Nokia versión 7.1.180.94; y la máquina virtual de Java.

En trabajos previos realizados (en proceso de publicar) en el Colegio de Postgraduados se desarrollaron aplicaciones para realizar interpolación espacial en tiempo real; cálculo de balance hídrico climático en tiempo real para conocer el contenido volumétrico de agua en el suelo (WVC); predicción de variables climáticas en tiempo real por medio de modelos ARIMA; y un sitio web para la visualización del estado de humedad de suelo de diferentes parcelas en tiempo real. Por ello, en este trabajo se conjuntaron las aplicaciones anteriores para conocer en cualquier momento y en cualquier ubicación deseada el WVC de diferentes parcelas por medio de dispositivos móviles (celular). Para hacer lo anterior se agregaron las bases de datos requeridas para lograr la ejecución adecuada de las aplicaciones en el servidor.

El modelo de entidad relación de toda la información que se integro en el sistema se indica en la Figura 1, en forma de tablas de datos que se crearon para lograr la integración.

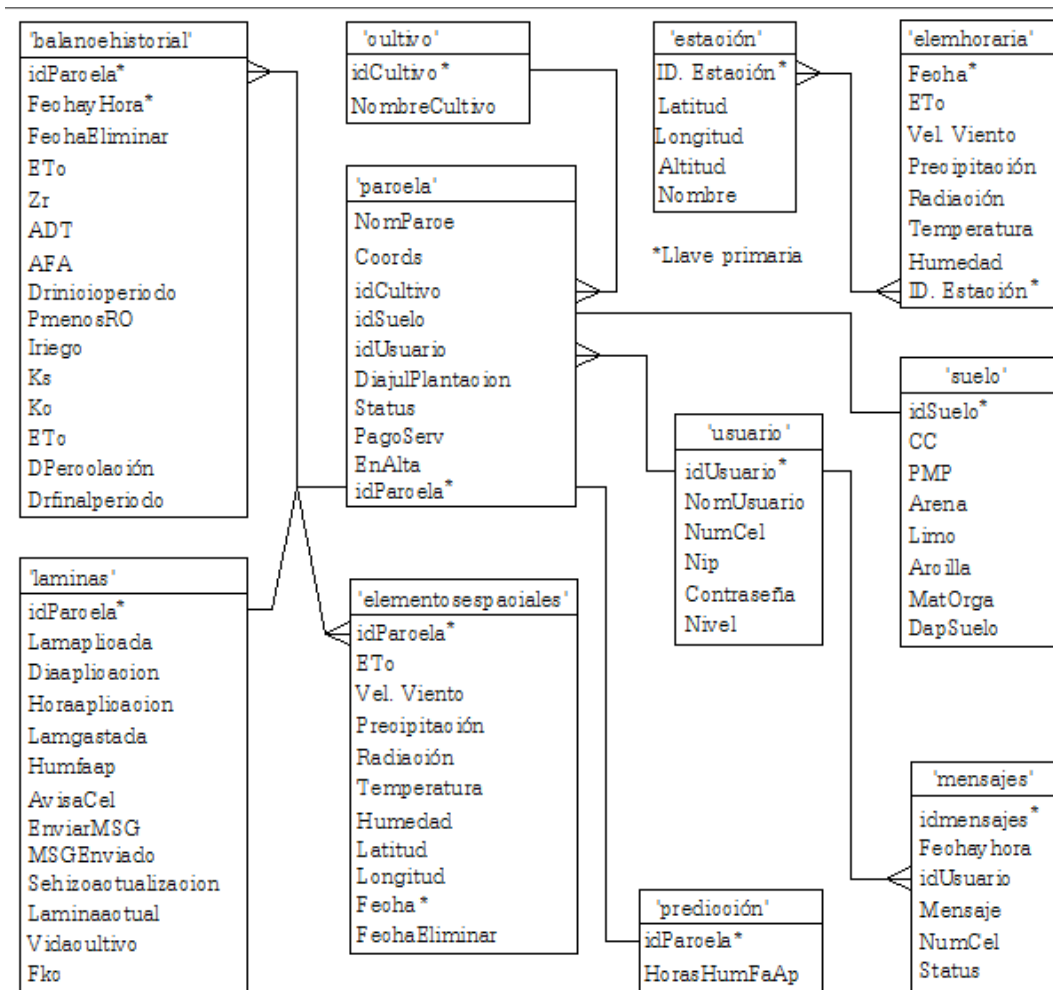


Figura 1. Tablas de datos del sistema de alertas por vía celular.

A continuación se hace una descripción de cada una de las tablas que se vincularon con los programas que se desarrollaron. En la tabla de datos 'parcela' se guardan los datos de nombre de parcela (NomParce), coordenadas del polígono que dibuja la parcela (Coords), identificador del cultivo que contiene la parcela (idCultivo), identificador del suelo que contiene la parcela (idSuelo), identificador del usuario encargado de la parcela (idUsuario), día juliano en el que se sembró el cultivo (DiajulPlantacion), nivel de humedad que contiene la parcela (Status), indicador de pago de servicio (PagoServ), indicador de alta o baja de parcela (EnAlta) y, el identificador de la parcela (idParcela). En la tabla de datos 'cultivo' se guardan datos de

identificador del cultivo (idCultivo) y nombre de cultivo (NombreCultivo); en la tabla de datos 'suelo' se almacena un identificador de suelo (idSuelo), contenido volumétrico de agua a capacidad de campo en m^3/m^3 (CC), contenido volumétrico a punto de marchitez permanente m^3/m^3 (PMP), contenido de arena en % (Arena), contenido de limo en % (Limo), contenido de arcilla en % (Arcilla), contenido de materia orgánica en % (MarOrga) y, densidad aparente de suelo en g/cm^3 (DapSue). La tabla 'usuario' contiene datos de identificador de usuario (idUserario), nombre de usuario (NomUsuario), número de celular (NumCel), nombre para acceder al sistema (Nip), contraseña para acceder al sistema (Contraseña), nivel del usuario (Nivel); la tabla de datos 'predicción' contiene un identificador de parcela (idParcela) y las horas de humedad fácilmente aprovechable que contiene la parcela (HorasHumFaAp); la tabla mensajes contiene datos de identificador de mensaje (idmensaje), fecha y hora de registro de mensaje (Fechayhora), identificador de usuario al que se le envió el mensaje (idUserario), cuerpo del mensaje enviado (Mensaje), número de celular al que se envió el mensaje (NumCel) y, estatus de envío de mensaje (Status). La tabla 'balancehistorial' indica los datos de identificador de parcela que se le hizo el balance hídrico climático (idParcela), fecha y hora a la que se realizó el balance hídrico climático (FechayHora), fecha en que se eliminarán los datos (FechaEliminar), evapotranspiración de referencia en mm (ET_0), profundidad de raíces en cm (Z_r), agua disponible total en el suelo en m^3/m^3 (ADT), agua fácilmente aprovechable en m^3/m^3 (AFA), lámina de agotamiento de agua al inicio del la hora en mm (Dinicioperiodo), precipitación menos escurrimiento en mm (PmenosRO), riego en mm (Iriego), coeficiente de estrés hídrico (K_s), coeficiente del cultivo (K_c), evapotranspiración del cultivo en mm (ET_c), lámina de agua percolada en mm (DPercolación) y, lámina de agotamiento al final de la hora analizada en mm (Drfinalperiodo). La tabla 'láminas' contiene datos de identificador de parcela de la cual

proviene la lámina (idParcela), riego aplicado en mm (Lamaplicada), día de aplicación del riego (Diaaplicación), hora de aplicación del riego (Horaaplicacion), lámina total agotada en la parcela en mm (Lamgastada), total de humedad fácilmente aprovechable en mm (Humfaap), indicador de autorización del usuario para enviarle mensaje (AvisaCel), indicador de necesidad de envío de mensaje debido a falta de agua en la parcela (EnviarMSG), confirmación de envío de mensaje (MSGEnviado), indicador de actualización del riego (Sehizoactualización), lámina de agua disponible en el suelo en mm (Laminaactual), vida actual del cultivo en días (Vidacultivo), coeficiente actual del cultivo (Fkc). La tabla 'elementosespaciales' contiene un identificador de parcela a la que corresponden los datos meteorológicos (idParcela), evapotranspiración de referencia en mm (ET_0), velocidad del viento en m/s (Vel. Viento), precipitación en mm (Precipitación), radiación solar en W/m^2 (Radiación), temperatura en °C (Temperatura), humedad relativa en % (Humedad), latitud de ubicación de la parcela (Latitud), longitud de ubicación de la parcela (Longitud), fecha a la que pertenecen los datos meteorológicos (Fecha) y, fecha en la que se pueden eliminar los datos (FechaEliminar). La tabla de datos 'estación' contiene datos de identificador de estación meteorológica (ID. Estación), latitud de ubicación de la estación meteorológica (Latitud), longitud de ubicación de la estación meteorológica (Longitud), altitud en la que se encuentra la estación meteorológica (Altitud), y nombre con el que se conoce a la estación meteorológica (Nombre). La tabla de datos 'elemhoraria' contiene datos de fecha y hora a la que pertenecen los datos (Fecha), evapotranspiración de referencia en mm (ET_0), velocidad del viento en m/s (Vel. Viento), precipitación en mm (Precipitación), radiación solar en W/m^2 (Radiación), temperatura en °C (Temperatura), humedad relativa en % (Humedad) y, un identificador de la estación a la que pertenecen los datos meteorológicos (ID. Estación).

Cabe mencionar que se definieron así las tablas debido a que esa organización permite separar los datos para tener un mejor procesamiento de la información. Primero se definió que una parcela puede tener únicamente un cultivo, pero un cultivo puede estar en muchas parcelas; una parcela puede tener un análisis de suelo, y un análisis de suelo pertenece a una sola parcela; una parcela debe tener únicamente un encargado o usuario, pero un usuario puede ser encargado de muchas parcelas; una parcela puede tener muchas mediciones de datos meteorológicos (elementos espaciales), pero la medición de una fecha y hora en conjunto con una parcela le pertenecen únicamente a una parcela en particular; una parcela puede tener una predicción, y una predicción le pertenece a una sola parcela; una parcela puede tener muchos balances hídricos climáticos, pero el balance hídrico climático para una parcela y hora en particular le pertenecen a una sola parcela; un mensaje se le envía únicamente a un usuario, pero un usuario puede recibir muchos mensajes; una estación meteorológica puede tener muchas mediciones meteorológicas a nivel horario, pero la medición de datos meteorológicos para una fecha y hora y estación en particular le pertenecen únicamente a una estación meteorológica.

Después de haber instalado las tablas de datos, se estableció la conexión con la EMA Campbells. Para realizar la conexión se utilizó la aplicación EZSetup del programa Logger Net, en ésta se eligió la opción crear un nuevo Datalogger CR1000 y se eligió la opción conectar vía dirección IP. La dirección IP que se le asignó a la EMA es 10.0.6.142, cabe mencionar que esta IP es fija para que todo el tiempo la EMA tuviera la misma dirección y contacto con el Servidor. Dicha aplicación se configuró la toma de datos que se recolectaron a un minuto después de cada hora. Con lo anterior se asegura que los datos horarios se guarden en el servidor en la siguiente ruta y archivo 'C:\Campbellsci\LoggerNet\CR1000_Horaria.dat'. Cabe mencionar que el programa

Logger Net 3.4.1 tiene la capacidad de recoger datos de varias EMAS y guardarlos en el servidor en tiempo real conectándose a ellas con sus respectivas direcciones IP.

El siguiente paso fue instalar el programa que elabora el análisis espacial (PAE), es una interpolación de la información meteorológica u otra variable de interés, que sirve para conocer en todo momento los valores de alguna variable en cualquier parcela, donde dicha información para interpolar se obtuvo de diferentes EMAS. Antes de instalar el programa de análisis espacial se creó una carpeta llamada 'DiaJuliano' y una llamada 'Mensajes' en el directorio 'C' del Servidor. Posteriormente se copió la aplicación ejecutable del PAE al servidor y con éste se elaboró una tarea programada en la opción 'Programar Tarea' del Panel de Control del sistema operativo Microsoft Windows 7TM. Esta tarea programada se configuró para ejecutarla al minuto dos de cada hora.

Una vez instalado el PAE se procedió a instalar el programa que calcula el balance hídrico climático (BHC). A este programa se le elaboraron los procedimientos para realizar un balance hídrico de acuerdo con la metodología de Allen (2006) debido a que autores como Hatfield (1990) aseguran que los sistemas de medición de evapotranspiración proporcionan datos de mayor precisión en intervalos cortos de tiempo. De igual manera, el programa ejecutable para el cálculo del BHC se asoció a una tarea programada en el servidor para ejecutarse a los cinco minutos después de cada hora.

Posteriormente, después de probar el buen funcionamiento del programa que realiza el cálculo del Balance Hídrico Climático se procedió a instalar la página web en el servidor para observar en tiempo real el estado de humedad de las diferentes parcelas.

El siguiente programa que se instaló fue el de predicción (con base en los modelos ARIMA), que se encarga de estimar las horas aproximadas con humedad fácilmente aprovechable que le

quedan disponibles a una parcela. El programa ejecutable de predicción se asoció a una tarea programada para realizarse a los 5 minutos después de cada hora. Los resultados de las horas con humedad fácilmente aprovechable en el suelo que le quedan a las parcelas se almacenan en la tabla 'predicción'.

Después de lo anterior se procedió a elaborar el servicio de alertas o avisos de estados de humedad de las parcelas. Es necesario indicar que el servicio de alertas vía teléfono celular consiste en enviar un mensaje de texto al usuario encargado de la parcela cuando ésta deja de tener humedad fácilmente aprovechable en el suelo. Cabe aclarar que el programa que realiza el balance hídrico climático indica cada hora el WVC y en caso de que alguna parcela no tenga humedad fácilmente aprovechable, genera automáticamente un mensaje indicando el número de parcela, la fecha y hora, el número de teléfono celular al que va a ser enviado, el cuerpo del mensaje (que muestra la lámina en milímetros que se debe aplicar para reabastecer la humedad del suelo a capacidad de campo junto con el número de parcela) , y se almacena en la tabla de datos 'mensajes' con el estado de envío pendiente ('Enviar'). Para el envío de los mensajes como parte del servicio de alertas, se conectó el teléfono celular Nokia C3-00 al puerto USB del servidor, y se abrió el programa Tera Term 4.71 utilizando el puerto 'com' que el servidor le asignó al teléfono celular. Posteriormente en el Tera Term 4.71 se escribieron los comandos AT y ATI para recibir las respuestas 'OK' y 'NOKIA' respectivamente. Por esto, se elaboró un programa cuya función es seleccionar los mensajes que aún no han sido enviados y enviarlos al número de celular indicado (encargado de la parcela). Además se verifica el buen funcionamiento de la conexión del celular con el servidor con las pruebas necesarias. Ahora se desarrollo un programa ejecutable de alertas, por medio del software Microsoft Visual Studio 2010. La función del servicio de alertas programada consiste en establecer la conexión el puerto

‘com’ asignado al teléfono celular, después establecer la conexión con el programa MySQL Server para acceder a los mensajes que no han sido enviados de la tabla de datos ‘mensajes’. Los mensajes que tienen estado pendiente (‘Enviar’) se envían a través del teléfono celular Nokia C3-00 utilizando comandos AT y una vez enviados los mensajes se actualizan los estado de envío de los mensajes a ‘Enviado’ (Figura 2).

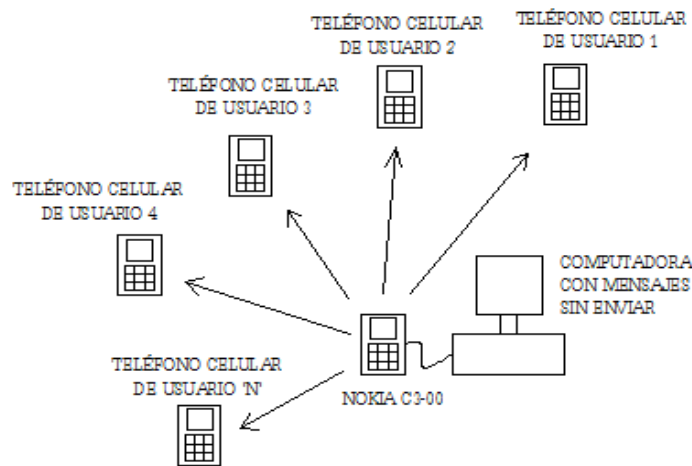


Figura 2. Servicio de alertas de humedad de suelo en las parcelas.

Una vez hecho el programa de alertas se procedió a asociarlo a una tarea programada en el sistema operativo Microsoft Windows 7™, para ejecutarlo a los 10 minutos después de cada hora ya que en ese instante se han terminado de calcular las humedades de suelo de las diferentes parcelas con el programa que calcula el balance hídrico climático. El programa de alertas funciona únicamente en una dirección, es decir, permite únicamente el envío de mensajes del servidor hacia el usuario, sin embargo el usuario no puede responder.

Instalada la tarea programada de alertas, se procedió a elaborar el sistema de consulta con respuestas automáticas vía teléfono celular, que permite que el usuario pueda consultar en cualquier momento la cantidad de horas con humedad fácilmente aprovechable que le queda a su parcela y pueda planear su riego. Para hacer este sistema de respuestas automáticas vía teléfono

celular (SRAVC) se elaboraron dos aplicaciones; una que instalo en el servidor y otra que se instalo en un teléfono celular (con el requisito de contar con el sistema operativo Android en cualquier versión superior a la 1.6) que está conectado con el servidor. La aplicación del celular se desarrollo en Eclipse Helios y su función de escuchar mensajes nuevos o mensajes que el teléfono celular LG GT540f reciba; y con la condición de que el mensaje esté correctamente escrito (es decir, contenga el nombre del usuario solicitante y el número de parcela separados por una coma). El celular reenvía el contenido del mensaje al servidor y espera la respuesta del servidor. Una vez que el servidor recibe el mensaje de consulta se establece una conexión con el programa MySQL Server para acceder a la tabla de datos 'predicción' y obtiene la predicción del número de horas que le quedan a la parcela dentro de HFA, así el servidor envía un mensaje de regreso al teléfono celular GT540f por el puerto de configuración (ver Figura 3) con esa información. Hecho lo anterior, el teléfono celular envía la consulta de regreso al usuario por medio de un mensaje de texto.

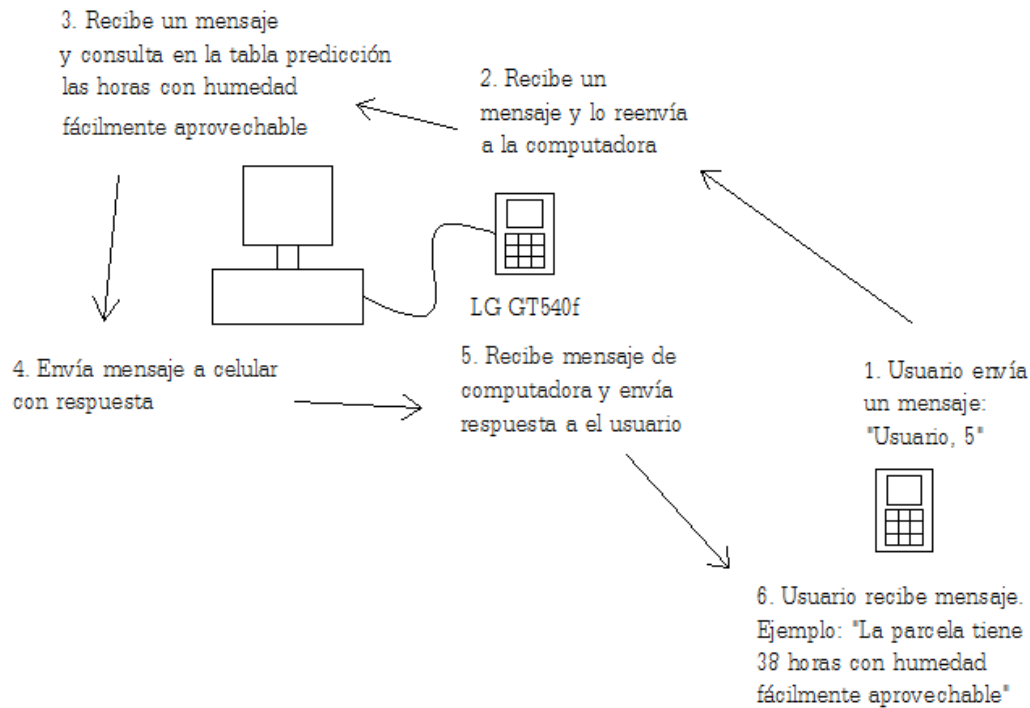


Figura 3. Servicio de consulta con respuestas automáticas vía teléfono celular para conocer las horas con humedad fácilmente aprovechable disponibles en una parcela.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de alertas fue probado para 5 números de teléfono diferentes (usuarios) y en diferentes fechas y horas y a todos los usuarios les llegó el mensaje con aviso de necesidad de riego. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de alerta.

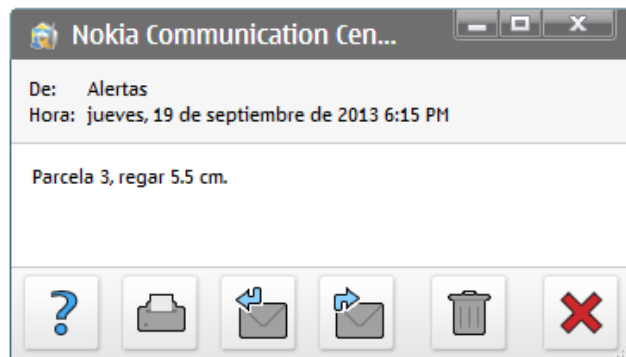


Figura 4. Mensaje recibido por el sistema de alertas indicando el número de parcela y la lámina de riego para obtener la humedad a capacidad de campo en el suelo (visualizado con el software Nokia PC Suite).

Adicionalmente el sistema de consulta con respuestas automáticas fue probado a diferentes horas y en diferentes días para probar su estabilidad y se encontró que a todas las peticiones de los usuarios fueron respondidas satisfactoriamente. En la Figura 5 se muestra la consulta del usuario con nombre 'Pfd' y la parcela número 3 (mensaje de texto enviado al sistema de predicción).

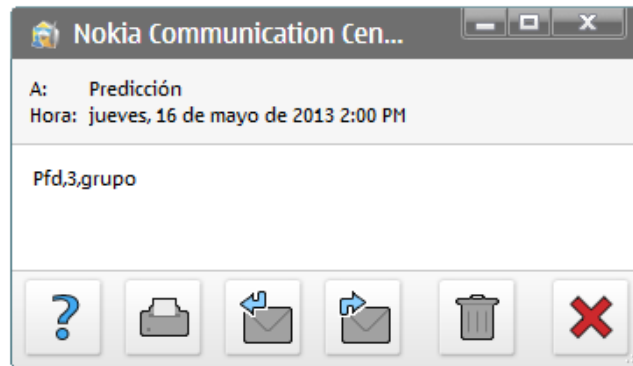


Figura 5. Mensaje enviado al sistema de consulta con respuestas automáticas indicando el nombre de quien envía el mensaje, el número de parcela y la palabra grupo separados por coma (visualizado con el software Nokia PC Suite). En la Figura 6 se muestra la respuesta que envió el sistema de predicción sobre el estado de humedad de la parcela al teléfono celular del usuario.

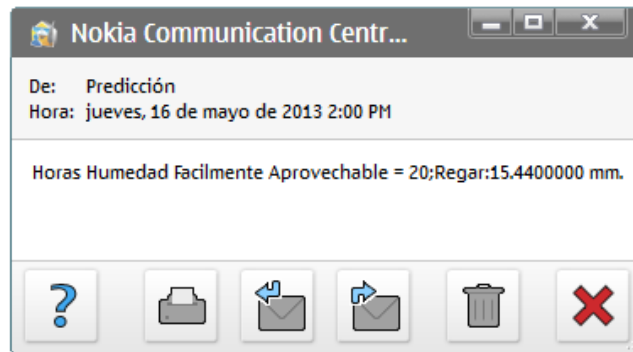


Figura 6. Mensaje recibido por el sistema de consulta con respuestas automáticas indicando la cantidad de horas con humedad fácilmente aprovechable y la lámina de riego requerida para obtener humedad a capacidad de campo en el suelo (visualizado con el software Nokia PC Suite).

Con esta investigación se diseñó y se probó un sistema de alertas y de respuestas automáticas con un celular Nokia C3-00 y LG GT540f respectivamente. Cabe mencionar que Car *et al.* (2012) propusieron un sistema similar al desarrollado en esta investigación, debido a que utilizaron el SMS para programar el riego en Australia, y evaluaron la utilidad de su sistema por los agricultores que regresaban sus datos de riego y precipitación al sistema y concluyeron que el 80% de los regadores encontraron útil al sistema. Sin embargo encontraron que el mayor problema consiste en realizar las indicaciones del sistema en los momentos en los cuales son requeridos. Por ello, la eficiencia en el sistema desarrollado en esta investigación se va a dar por el seguimiento oportuno de los usuarios.

4. CONCLUSIONES

El sistema de alertas tempranas resulto de fácil operación dado que solo hace uso de los servicios de mensajes cortos (SMS) para el envío y recepción de alertas, con el fin de mantener informado en todo momento a los agricultores sobre el contenido de humedad de su(s) parcela(s). Cabe mencionar que de esta manera el agricultor conoce el momento y la cantidad de agua en milímetros que requiere regar a su parcela para abastecer la humedad a capacidad de campo.

Adicionalmente con el servicio de respuestas automáticas el agricultor tendrá la oportunidad de conocer una estimación de la cantidad de horas hacia adelante con las que su parcela contará con humedad fácilmente aprovechable en el suelo en tiempo real y de esta manera puede planear sus actividades para tener al cultivo libre de estrés hídrico.

5. LITERATURA CITADA

Akima, H., A. Gebhardt, T. Petzoldt, and M. Maechler. 2013. Akima: Interpolation of irregularly spaced data. R package version 0.5-9. <http://CRAN.R-project.org/package=akima>. Accessed

January 2013.

Allen, R. G. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization (FAO), Vol. 56.

Arefin, M., Banik, M., Rahim, I., Islam, T., & Biswas, T. 2012. Automated irrigation control system: An advanced approach. In Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2012 International Conference on (pp. 516-520). IEEE.

Campbell Scientific, Inc. 2007. LoggerNet User's Manual. Version 3.4.1. Electronic Version. Logan, Utah. USA.

Car, N. J., Christen, E. W., Hornbuckle, J. W., & Moore, G. A. 2012. Using a mobile phone Short Messaging Service (SMS) for irrigation scheduling in Australia—Farmers' participation and utility evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84, 132-143.

Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R*. Second Edition. Springer Science Business Media, LLC. New York, NY, USA. 364p.

Developers, A. 2011. What is android?. <http://developer.android.com/guide/basics/what-is-android.html>, 2.

Gironés, J. T. 2011. El gran libro de Android. Alfaomega Grupo Editor. Primera edición. 339 pp.México.

Hatfield, J.L. 1990. Methods of estimating evapotranspiration. Irrigation of agricultural crops. ASA. monograph n° 30, pp. 436 - 467.

Huo, Z. P., Wei, Z. Y., & Tang, Y. P. 2012. A Remote Control System Based on Short Messaging Service for Intelligent Agricultural Irrigation. Applied Mechanics and Materials, 190, 1104-1108.

Hyndman, R.J. and Khandakar, Y. 2008. "Automatic time series forecasting: The forecast package for R", Journal of Statistical Software, 26(3).

Kofler, M. 2005. The Definitive Guide to MySQL 5. David Kramer. Third edition. APRESS. New York, NY, USA. 172p.

Korhonen, K., Donadini, F., Riisager, P., andPesonen, L. J. 2008. GEOMAGIA50: an archeointensity database with PHP and MySQL. Geochemistry, Geophysics, Geosystems 9(4): 1-14.

Lugo Espinosa, O., Quevedo Nolasco, A., Bauer Mengelberg, J. R., Valle Paniagua, D. H. D., Palacios Vélez, E., & Águila Marín, M. 2011. Prototipo para automatizar un sistema de riego multicultivo. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(5), 659-672.

Maddipatla, K., Sravani, T., Rajesh, T., Krishna, R. M., & Avinash, J. 2012. Remote Access to agricultural motor through the usage of GSM and SMS technologies. *Advances in Computer Science and its Applications*, 1(3), 211-214.

Rahali, A., Guerbaoui, M., Ed-dahhak, A., El Afou, Y., Tannouche, A., Lachhab, A., & Bouchikhi, B. 2011. Development of a data acquisition and greenhouse control system based on GSM. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 3(8), 297-306.

Randolph, N., D. Gardner, M. Minutillo, and C. Anderson. 2010. *Professional Visual Studio 2010*. Wrox. Wiley Publishing, Inc, Indianápolis, Indiana. 1177 p.

Vishwakarma, R. G., & Choudhary, V. 2011. Wireless solution for irrigation in agriculture. In *Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN)*, 2011 International Conference on (pp. 61-63). IEEE.

Xie, S. Y., Peng, H., Bao, A. H., Qiu, H. L., & Chen, C. 2013. The Application Research on Remote Monitoring and Controlling System in Irrigation Pumping Station. *Applied Mechanics and Materials*, 278, 1658-1663.

XUE, H. X., GAO, L., WANG, L., WANG, Y., & LI, W. B. 2010. The Wireless Automatic Control System for Orchard Irrigation based on Smart-phone Platform. *Hunan Agricultural Sciences*, 19, 046.

IV. CONCLUSIONES GENERALES

Con esta investigación se logró desarrollar un sistema con la capacidad de dar recomendaciones de necesidades de agua y consultas a usuarios de parcelas utilizando las tecnologías de información y comunicación como servicio de internet, y servicio de mensajes cortos de los teléfonos celulares y además utilizando una red de estaciones meteorológicas automáticas.