

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México
<i>Autor / Adscripción</i>	Ernesto Sifuentes Jaime Macías Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México Waldo Ojeda Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Víctor M. González Ayuntamiento de Ahome, Sinaloa, México Daniel A. Salinas José G. Quintana Universidad Autónoma de Sinaloa, México
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 7(2): 149-168
<i>Fecha de publicación</i>	2016
<i>Área del conocimiento</i>	Ciencias agropecuarias y biotecnología
<i>Resumen</i>	Se desarrolló una plataforma computacional basada en tecnología de información y comunicaciones para programación integral y gestión de riego por Internet en el cultivo de papa, la cual ajusta las demandas hídricas del cultivo de papa a la variabilidad climática observada en los últimos años en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. El fundamento de la tecnología fue un modelo de programación integral del riego basado en grados-día crecimiento, integrándose a un software (Irrimodel) operado a través de Internet. En este trabajo se presenta un análisis de esta tecnología a gran escala como alternativa para la adaptación de la programación del riego ante los efectos del cambio climático.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/20.500.12013/1693

Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México

• Ernesto Sifuentes* • Jaime Macías •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

*Autor de correspondencia

• Waldo Ojeda •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Víctor M. González •

Ayuntamiento de Ahome, Sinaloa, México

• Daniel A. Salinas • José G. Quintana •

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Resumen

Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (marzo-abril, 2016). Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(2), 149-168.

Se desarrolló una plataforma computacional basada en tecnología de información y comunicaciones (TIC's) para programación integral y gestión de riego por Internet en el cultivo de papa, la cual ajusta las demandas hídricas del cultivo de papa a la variabilidad climática observada en los últimos años en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. El fundamento de la tecnología fue un modelo de programación integral del riego basado en grados-día crecimiento (GD), integrándose a un *software* (Irrimodel) operado a través de Internet. El sistema cuenta con las siguientes capacidades: a) elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, disponibilidad de agua y manejo; b) pronostica el riego con alta precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo y acumulación de GD; y c) genera y envía solicitudes de riego al módulo prestador del servicio. La transferencia a productores se hizo en tres meses en más de 3 000 ha, donde se presentaron dos niveles de uso. En 56% (1 738 ha), su aplicación fue con nivel alto, mientras que el resto con nivel medio. La superficie con nivel alto se conformó de 396 ha bajo riego por gravedad y 1 334 ha bajo riego por aspersión. Tanto en parcelas con riego por gravedad como de aspersión se incrementó la eficiencia de aplicación (Ea) (18%), rendimiento (7 t) y productividad del agua (1.5 kg·m⁻³), siendo mayor en las de gravedad contra manejo tradicional. En este trabajo se presenta un análisis de esta tecnología a gran escala como alternativa para la adaptación de la programación del riego ante los efectos del cambio climático.

Palabras clave: riego de precisión, grados-día, cambio climático, zonas de riego.

Abstract

Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (March-April, 2016). Irrigation Management for Potato Crops Based on Climate Variability: Application in Irrigation District 075, Fuerte River, Sinaloa, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 7(2), 149-168.

A computer platform was developed for integrated irrigation scheduling and management of potato crops based on information and communications technology using the internet. This technology adjusted the water demands of the potato crop according to the climate variability observed over recent years in the Valle del Fuerte, Sinaloa, Mexico. The basis of the technology was an integrated irrigation scheduling model based on increasing degree-days, with the integration of Irrimodel software operated over the internet. The system has the following capabilities: a) generates irrigation plans based on different scenarios related to climate, water availability and water management; b) produces a highly accurate irrigation prognosis according to the development of the crop and the accumulation of degree-days, and c) generates and sends irrigation requests to the service providers. The technology was transferred to producers over three months and covered over 3 000 ha. Two levels of use were identified —a high application level by 56% of the area (1 738 ha) and a medium level by the remaining area. The area with a high application level was composed of 396 ha which used gravity irrigation and 1 334 ha which used sprinkler irrigation. In both areas, with gravity irrigation as well as sprinkler irrigation, there was an increase in application efficiency (18%), yield (7 t) and water productivity (1.5 kg·m⁻³). The increase was greater with gravity than with traditional management. This work presents an analysis of the use of this technology on a large scale, as an option to adapt irrigation scheduling to the effects of climate change.

Keywords: Precision irrigation, degree days, climate change, irrigation areas.

Recibido: 28/07/2011
Aceptado: 01/10/2015

Introducción

El cultivo de papa es de los más sensibles al riego por su alto contenido de agua en relación con su peso (80%). La calidad y cantidad de rendimiento dependen de modo fundamental del manejo del riego. Es el cuarto cultivo más importante del norte de Sinaloa, México, estableciéndose cada año de 12 000 a 14 000 ha, de las cuales el 75% son de bajo riego por gravedad, 22% de bajo riego por aspersión y 3% de bajo goteo, con una producción promedio de 26 t/ha. Sin embargo, es uno de los cultivos más caros, oscilando en unos \$80 000 los costos de producción por hectárea (Sagarpa, 2010) debido a la aplicación excesiva de insumos.

En los últimos años se ha observado alta inestabilidad climática en el norte del estado de Sinaloa debido en gran medida al cambio climático, que ha provocado alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos e incremento en la presencia de eventos extremos, como sequías, heladas e inundaciones. Ante tal situación, cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos, principalmente en cuanto a riego y nutrición, haciéndose necesario tecnologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos (Ojeda, Martínez & Hernández, 2008). Con el desarrollo de las comunicaciones (Internet) y la informática, en la actualidad es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda, Sifuentes, & Unland, 2006).

Considerando estos elementos, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2008-2009, el Campo Experimental Valle del Fuerte (Cevaf) del INIFAP, a través del Programa de Investigación Uso y Manejo del Agua, desarrolló una plataforma computacional compuesta

de tecnología de comunicaciones y el *software* denominado *Irrimodel* (Sifuentes, Quintana, Macías, & González, 2013) para la programación integral y gestión del riego en tiempo real operado a través de Internet, generándose las condiciones para usar esta tecnología en forma masiva a partir del ciclo 2009-2010. Dicho sistema cuenta, entre otras, con las siguientes capacidades: 1) elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y manejo; 2) pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo determinado por la acumulación de grados día crecimiento (GDA), y 3) genera y envía solicitudes de riego al módulo que le presta el servicio hidráulico.

La ventaja de esta herramienta con respecto al método tradicional es que el productor, de una manera sencilla, aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real a través de Internet, que le permite en forma anticipada programar sus riegos desde cualquier parte sin importar dónde se encuentre. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa, pues es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado. Estas condiciones también reducen el riesgo de enfermedades como rizoctonia (*Rhizoctonia solani*), roña de la papa (*Streptomyces scabies* Thaxt.) y tizón tardío (*Phytophthora infestans*), lo cual ayuda a incrementar de manera significativa la calidad de la producción (Avery, 1983).

Se presentan los resultados en el uso de esta tecnología en el cultivo de papa en el Valle del Fuerte, ubicado al norte del estado de Sinaloa, México, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2009-2010. Tal propuesta representa el reto de aplicar por primera vez estos modelos a través de Internet. Ante la amenaza latente de eventos extremos, como sequías y heladas, este tipo de herramientas son vitales para afrontar y reducir sus efectos. Hoy día, dicha tecnología se está adaptando no sólo en el cultivo de papa sino para otros cultivos y otras regiones del estado.

Antecedentes teóricos

Importancia del riego de precisión en el cultivo de papa

La calidad y cantidad de tubérculos están relacionadas con una correcta calendarización del riego; por lo general, se contrarresta la deficiente calendarización incrementando la lámina y frecuencia del riego, o las aplicaciones de agroquímicos, para no tener mermas significativas en los rendimientos convencionales. La anterior práctica empieza a ser cuestionada ante la incertidumbre en la disponibilidad y cantidad del agua, variabilidad climática o por los problemas de contaminación atribuida a la agricultura intensiva.

El agua es el mayor componente de una planta de papa, alcanzando hasta 95% en los tejidos verdes y 85% en los tubérculos. Una planta de papa bajo condiciones óptimas de crecimiento y humedad puede reemplazar hasta cuatro veces al día su contenido de humedad por medio de la transpiración. La papa es más sensible al déficit hídrico del suelo que el trigo, soya o frijol, siendo sus etapas fenológicas más sensibles la formación de estolones y tubérculos.

La FAO (1986) afirma que si se estresa la papa durante la etapa de formación de tubérculos en un 50% de los requerimientos evapotranspirativos potenciales, se tendría una reducción de 35% en el rendimiento; durante la maduración se tendría una reducción de sólo 10%, y en la fase vegetativa, un 22%. Cambios drásticos en la humedad del suelo debido a riegos tardíos y pesados puede resultar en el agrietamiento o formación de corazones negros (necrosis interna) en los tubérculos, además de promover la presencia de otras enfermedades, como *Fusarium*, moho blanco y *Rhizoctonia* (UCLA, 2006).

Dudek, Gerald y Marshall (1981) llevaron a cabo un análisis y concluyeron que la programación del riego era rentable y benéfica si los productores pueden aplicar el riego con suficiente precisión. Parker, Cohen-Vogel, Osgood y

Zilberman (2000) determinaron que el programa "Sistema de Información para el manejo del Riego de California" (CIMIS), operado por el Departamento de Agua y Recursos, a un costo de 850 000 dólares al año, ahorra agua y tiene otros beneficios que superan con creces el costo de operación. Así, la programación del riego ha sido conocido por ser beneficiosa (Marek et al., 2010).

Efecto de la temperatura en la fenología del cultivo

La edad fisiológica de un tubérculo es producto de la edad cronológica y de los antecedentes ambientales de éste. Para medir la edad fisiológica se utiliza a menudo la acumulación de grados-día (GD) relacionada con la aparición de cada fase de desarrollo, que difieren para cada variedad (Jefferies & Lawson, 1991). Es decir, los estados de desarrollo casi siempre se presentan cuando se acumula el mismo valor de GD, con independencia de la fecha de siembra y del año; mientras que los días calendario muestran una amplia variación (cuadro 1). La estimación diaria de éstos requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Ojeda et al., 2006):

$$GD = T_a - T_{c-\text{mín}}, \text{ si } T_a < T_{c-\text{máx}} \quad (1)$$

$$GD = T_{c-\text{máx}} - T_a, \text{ si } T_a \geq T_{c-\text{máx}} \quad (2)$$

$$GD = 0, \text{ si } T_a \leq T_{c-\text{mín}} \quad (3)$$

Donde $T_{c-\text{mín}}$ y $T_{c-\text{máx}}$ son las temperaturas críticas mínima y máxima del cultivo, que en el caso de la papa son 2 y 29 °C, respectivamente.

La diferencia de duración del ciclo es de casi un mes entre las siembras de octubre y las de diciembre en el norte de Sinaloa, lo cual provoca alteración en la programación de las prácticas de manejo del cultivo. Además del efecto de la fecha de siembra existen alteraciones provocadas por la variabilidad y el cambio climático.

Cuadro 1. Días para alcanzar varios valores de grados día acumulados (GDA) en papa, variedad alpha, para diferentes fechas de siembra, en el Valle del Fuerte Sinaloa (Sifuentes, Macías, Apodaca, & Cortez, 2009).

Fecha de siembra									
GDA	01 oct.	10 oct.	20 oct.	30 oct.	10 nov.	20 nov.	30 nov.	10 dic.	20 dic.
Días									
800	33	35	38	42	47	50	53	54	54
900	37	40	43	48	53	57	60	61	60
950	40	42	46	51	57	60	63	64	63
1 000	42	45	49	55	60	64	66	67	66
1 100	47	50	56	62	66	70	73	73	72
1 150	49	53	59	65	70	74	76	76	75
1 500	69	76	83	89	93	96	97	97	96
1 600	76	83	90	95	100	102	103	103	101
1 700	82	90	97	102	106	108	109	109	107
1 750	86	93	100	105	109	110	112	111	109
1 800	90	96	103	108	102	113	115	114	112
1 850	93	100	106	111	115	117	117	116	114
1 900	96	103	110	114	118	120	120	119	117
2 000	103	110	116	121	124	126	126	124	122

Proyecciones de cambio climático para México y el estado de Sinaloa

El cambio climático es un fenómeno recurrente en la historia del planeta, pero a un ritmo más lento del observado en la actualidad. El IPCC (2007) lo define como una variación estadísticamente significativa del estado global del clima o de su variabilidad durante un largo periodo de tiempo.

El panel intergubernamental de cambio climático, conocido por sus iniciales en inglés de IPCC, ha desarrollado cuatro posibles escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero hasta el año 2100, conocidos como escenarios SRES o IEEEE, considerando cambios posibles en población global, el grado de globalización, cambios tecnológicos y el grado de uso de fuentes alternas de energía (Nakicenovic & Swart, 2000). Los cuatro escenarios futuros de emisiones son B1 (bajo), B2 (medio), A1 (de medio a alto) y A2 (alto).

Las proyecciones de emisiones se usan con frecuencia para conjeturar sobre el cambio climático futuro; sus supuestos básicos respecto

de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y las evaluaciones de su impacto en la sociedad (IPCC, 2007). El escenario A1B es un caso particular del escenario A1, que representa un escenario de emisiones medio moderado, el cual asume que la sociedad usará en forma balanceada fuentes energéticas además de las de origen fósil.

Para México, la mayoría de los modelos proyecta un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio, aunque se espera un incremento de esta variable en otras regiones del mundo. Seager *et al.* (2007) han mostrado que el noroeste del país se encuentra en un proceso de mayor aridez debido a una baja de la precipitación y a un alza en la evaporación.

Considerando el escenario A1B para el estado de Sinaloa, el cuadro 2 muestra los posibles alcances que se tendrán en cuanto a temperaturas medias, señalando los diferentes escenarios de cambio climático, para los periodos P0 (1961-1990), P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) y P3 (2071-2098).

Cuadro 2. Alcance de las temperaturas medias para los diferentes escenarios de cambio climático en el estado de Sinaloa (IMTA-INIFAP, 2011).

Variable	Alcance	P0	P1	P2	P3
Temperatura media	Anual	24.1	25.2	26.3	27.2
	Junio-octubre	27.9	29.1	30.2	31.1
	Octubre-marzo	21.0	22.1	23.1	24.0
Temperatura máxima media	Anual	31.6	32.2	33.4	34.5
	Junio-octubre	33.9	34.4	35.7	36.8
	Octubre-marzo	29.2	29.8	31.0	32.0
	Mes más caliente	35.6	36.1	37.3	38.2
Temperatura mínima media	Anual	16.8	17.0	18.1	18.9
	Junio-octubre	21.7	22.2	23.2	24.0
	Octubre-marzo	12.7	13.4	14.5	15.3
	Mes más frío	10.1	10.8	12.0	12.8

Cuadro 3. Variabilidad de la precipitación para tres periodos de proyecciones y el periodo base para el estado de Sinaloa (IMTA-INIFAP, 2011).

Variable	P0	P1	P2	P3
Precipitación anual	755.8	677.2	663.7	619.8
Precipitación octubre-marzo	176.9	122.6	113.0	96.4
Precipitación junio-octubre	629.5	602.8	598.9	568.6
Precipitación, mes más lluvioso	196.7	193.2	190.3	184.6

Con respecto a la precipitación, el cuadro 3 muestra la variabilidad de la precipitación para tres periodos de proyecciones: P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) y P3 (2071-2098), y el periodo base P0 (1961-90), para el estado de Sinaloa.

La agricultura es de las actividades más afectadas por este fenómeno, pues el desarrollo de los cultivos depende del clima (principalmente temperatura). De no realizarse acciones de adaptación y mitigación para Sinaloa, un estado eminentemente agrícola, las repercusiones pueden ser catastróficas para la economía de la entidad.

Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura

El cambio climático en los procesos productivos agrícolas debe verse como un problema actual, donde los tomadores de decisiones requieren de información en el proceso de planificación y

elaboración de políticas públicas para reducir la vulnerabilidad socioeconómica del sector ante el impacto por la variabilidad y el cambio climático. Los posibles impactos potenciales tanto positivos como negativos son los siguientes:

Impactos positivos

- Posibilidad de nuevos cultivos.
- Mayor periodo para el desarrollo de los cultivos.
- Mayor producción por CO₂ ↑.
- Aceleración de la maduración.
- Reducción en la severidad y duración de heladas.
- Más cosechas por año.

Impactos negativos

- Mayor incidencia de plagas y enfermedades.
- Menor diversidad de cultivos.

- Daños a cultivos por calor extremo.
- Ciclones más intensos e inundaciones.
- Menor eficacia de herbicidas y plaguicidas.
- Predicciones menos confiables (planeación difícil).
- Menor producción por acortamiento del ciclo.
- Mayor estrés hídrico y térmico.
- Problemas con el cumplimiento de horas frío.
- Incremento en la demanda pico de riego.
- Necesidad de nuevas variedades.

Ante este panorama, es necesario desarrollar estrategias de adaptación y mitigación para responder con oportunidad al impacto del cambio climático en los sistemas productivos agrícolas.

Gestión de zonas de riego

La operación de zonas de riego, como los distritos, se ha fundamentado en particular en reglas empíricas que se han obtenido con base en la experiencia acumulada por el personal que los opera. Su aplicación no ha permitido optimizar el uso de los recursos agua, tierra, capital y personal disponibles en los distritos del país. Aunque el manejo eficiente del agua en los distritos de riego es conceptualmente simple, en la práctica afronta muchos problemas colaterales de diversa índole (cultural, social, económico y tecnológico); el resultado conjugado se manifiesta en baja eficiencia en el uso del agua. Uno de los factores que más afecta la eficiencia es el procedimiento utilizado para determinar los volúmenes de agua a operar. Las razones principales que afectan su estimación son:

- En muchos casos, el servicio de riego se programa de modo prioritario en función de la facilidad en el manejo hidráulico de la red de distribución y no en las necesidades de agua de los cultivos.
- Cuando se toman en consideración los cultivos, la planeación se efectúa estimando las necesidades hídricas con base en estimaciones generales del uso

consuntivo de los cultivos (requerimientos hídricos), y no se toman en cuenta factores fundamentales como el suelo y su variabilidad espacial, y las condiciones meteorológicas.

- En muchos casos, cuando la programación se hace por la demanda de los usuarios, ésta obedece más bien a factores de tipo tradicional o simplemente a la apreciación empírica y subjetiva de necesidad de regar.
- Aunque la naturaleza del problema es conocida, preocupa que las causas se han asimilado como males necesarios, y así se habla de eficiencias de aplicación normales de 60%; este dato, más que indicar eficiencia, refleja graves problemas.

Si bien en los últimos años ha habido una preocupación por mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego parcelario, el esfuerzo resulta inconcluso si no se utilizan los medios adecuados y se combinan con el nivel tecnológico actual: desarrollo de la informática y electrónica, y avance científico en las áreas de física de suelos, fisiología vegetal y agroclimatología (Exebio, Palacios, Mejía, & Carmona, 2005).

El papel de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en la agricultura moderna

La agricultura en el mundo ha sido influida por el nuevo paradigma tecnológico, por lo que se ha favorecido con los enormes avances de la introducción de los recursos informáticos. El uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) ha cambiado de manera considerable, para bien, el modo de trabajo de agricultores, investigadores y todo el personal en el sector agrícola (Pérez, Milla, & Mesa, 2006). Según González (2003), de acuerdo con el interés expresado por los agricultores, entre las tareas propias de la agricultura que pueden ser objetos de aplicaciones de informática están:

- Consejos técnicos de cultivo: emplear *software* para la resolución de interrogantes

concretas sobre la práctica de cultivos: preparación de suelo, sistema de riego, determinación de ataques de plagas y enfermedades.

- Contabilidad, precios de mercado, cálculo de inversiones, inventario y movimiento, cálculo de insumos agrícolas, etcétera.
- Información y administración fiscal.
- Planificación y manejo de cultivos: selección de áreas de cultivos, proyección de fechas de siembra.
- Cálculo de dosis de plaguicidas: dosis por unidad de área, recomendaciones para su aplicación.
- Meteorología local: llevar registros diarios, mensuales y anuales de lluvias, precipitaciones, humedad relativa, radiación y otras variables meteorológicas de suma importancia en la producción agrícola.

Actualmente se han desarrollado numerosos proyectos TIC aplicados a la agricultura, como los presentados en las Jornadas de Agroinformática (INTA, 2008), el primer y segundo Congreso Argentino de Agroinformática en 2009 y 2010, tomando como ejemplos los siguientes:

- Ambiente de simulación, monitoreo y control remoto de un sistema de riego por goteo.
- Determinación de zonas de manejo mediante relevamiento de suelos y herramientas informáticas.
- Procesamiento digital de imágenes aéreas multiespectrales para la cuantificación de caña de azúcar caída.
- Simulación de la dinámica del carbono en suelos bajo siembra directa y labranza tradicional.
- Sistema de información *Informe de estado hídrico de suelos*.
- Modelo de simulación de fenología de soya.

Los programas de simulación facilitan en gran medida la estimación de las necesidades de agua de los cultivos y, por ende, el cálculo del programa de riego. Además, permiten generar

criterios para la planeación y el manejo del riego, con lo cual se da un mejor uso al recurso hídrico (Arteaga, Ángeles, & Vázquez, 2011).

Internet es una herramienta útil para el desarrollo rural y agrícola que aporta nuevas fuentes de información, pudiendo abrir otros canales de comunicación para el sector rural y organizaciones agrícolas. Esta red ofrece un medio para atenuar la brecha que existe entre los profesionales del desarrollo, la población rural y los productores agrícolas a través del diálogo y la interacción. Asimismo, promueve alianzas y redes interpersonales, además de nexos transversales y paralelos entre organizaciones. Los beneficios principales incluyen además una mayor eficiencia en el uso de recursos para el desarrollo, menor duplicación de actividades y costos reducidos de comunicación, así como un acceso global a la información y recursos humanos.

Metodología

Generación del modelo de programación integral del riego

El modelo de programación utilizado fue el generado por Ojeda, Sifuentes, Slack y Carrillo (2004) en el Valle del Fuerte, el cual fue validado en la zona de estudio. El modelo se compone de los parámetros coeficiente de cultivo (K_c), profundidad de raíz (P_r) y factor de abatimiento (F), expresadas como funciones no lineales, cuya variable independiente (X) son los GDA, haciéndolas autoajustables a variabilidad climática presente en la amplia temporada de siembra de esta región (de septiembre a enero) y por los efectos del cambio climático (cuadro 4). Estas condiciones causan problemas de adaptación cuando se utilizan parámetros expresados con base en días calendario, como los que se usan tradicionalmente.

Donde K_{co} es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica, la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo; $K_{m\acute{a}x}$ es el máximo valor de K_c durante su desarrollo; $XK_{m\acute{a}x}$

Cuadro 4. Parámetros de calendarización usados en programación integral del riego en papa para el norte de Sinaloa (Ojeda, Sifuentes, Slack, & Carrillo, 2004).

Variable	Modelo	Parámetro
Coefficiente de cultivo	$K_c = K_{m\acute{a}x} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{km\acute{a}x}}{\alpha_1}\right)^2$ si $K_c < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$	$K_{m\acute{a}x} = 1.3$ $XK_{m\acute{a}x} = 0.6$ $\alpha_1 = 0.45$ $K_{co} = 0.2$
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{rm\acute{a}x} - P_{ro}) \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right] \right\}$	$P_{ro} = 0.15 \text{ m}$ $P_{rm\acute{a}x} = 0.7 \text{ m}$ $\alpha_2 = 600$
Factor de abatimiento	$F_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	$\alpha_3 = 0.68$ (gravedad), 0.45 (aspersión) $\alpha_4 = 0.1$

corresponde a una variable auxiliar definida por los *GDA* cuando el cultivo tiene su máximo coeficiente de cultivo; α_1 es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales; *erfc* es la función complementaria del error, y x es una variable auxiliar calculada con la siguiente expresión:

$$x = \frac{GDA}{\alpha_o}$$

Donde *GDA* son los grados día acumulados desde la siembra o emergencia hasta un tiempo determinado y α_o son los *GDA* requeridos hasta alcanzar la madurez calculados como ya se explicó.

P_{ro} y $P_{rm\acute{a}x}$ representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz, respectivamente; el valor α_2 del modelo se ajustó de forma empírica de un valor aproximado a $2/3$ del valor *GDA*, donde el cultivo alcanza la profundidad radical máxima. Los valores de los parámetros α_3 y α_4 para el factor de abatimiento *F* se calibraron de modo empírico, considerando la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico, y las prácticas de manejo de riego por gravedad y aspersión en la zona.

Los valores experimentales de K_c , *F* y P_r se obtuvieron de dos parcelas sembradas con la variedad *alpha*; ambas parcelas se ubicaron a menos de 1 200 m de una estación climática automatizada; sus características se muestran en el cuadro 5.

Los valores base de K_c usados en las parcelas anteriores fueron los propuestos por Martin, Slack y Pegelow (1996). El parámetro P_r fue el del programa *SCS-Scheduler* v. 2.0 desarrollado por la Universidad del Estado de Michigan, Estados Unidos, y el Servicio de Conservación de Suelos (Shayya, Bralts, & Olmstead, 1990; Shayya & Bralts, 1991).

Desarrollo de la plataforma computacional

La plataforma computacional se integró por tres elementos: 1) enlace climático en tiempo real con la red agroclimática de las zonas productoras, 2) un servidor virtual administrado en el Cevaf y 3) *software Irrimodel* (Sifuentes et al., 2013).

Para obtener los datos climáticos en tiempo real de las estaciones agroclimáticas se utiliza el *software Advantage Pro* conectado a un dispositivo A840 Telemetry Gateway, que es un Radio Telemetry Units (RTU), donde dichos datos se obtienen por medio de Internet, como se muestra en la figura 1. Para lograr la conexión se configura el servidor *Advantage Pro*, usuario y contraseña, para replicar los datos climáticos de las estaciones conectadas al RTU.

A través del servidor virtual (<http://cevac.redirectme.net>) se descarga el programa *Irrimodel* y se almacenan bases de datos de usuario del mismo; una vez descargado, se requiere un usuario y contraseña para su operación. El programa fue desarrollado con una arquitectura

Cuadro 5. Características generales de parcelas experimentales para la generación de los parámetros de calendarización K_c , F y P_r en función de GDA (Ojeda et al., 2004).

Nombre	Sup (ha)	Arcilla (%)	Arena (%)	Humedad aprovechable (mm)	Sistema de riego
GRAV	50	57.8	22.8	14.7	Gravedad (surcos)
ASP	50	51.8	26.8	14.5	Aspersión (pivote central)

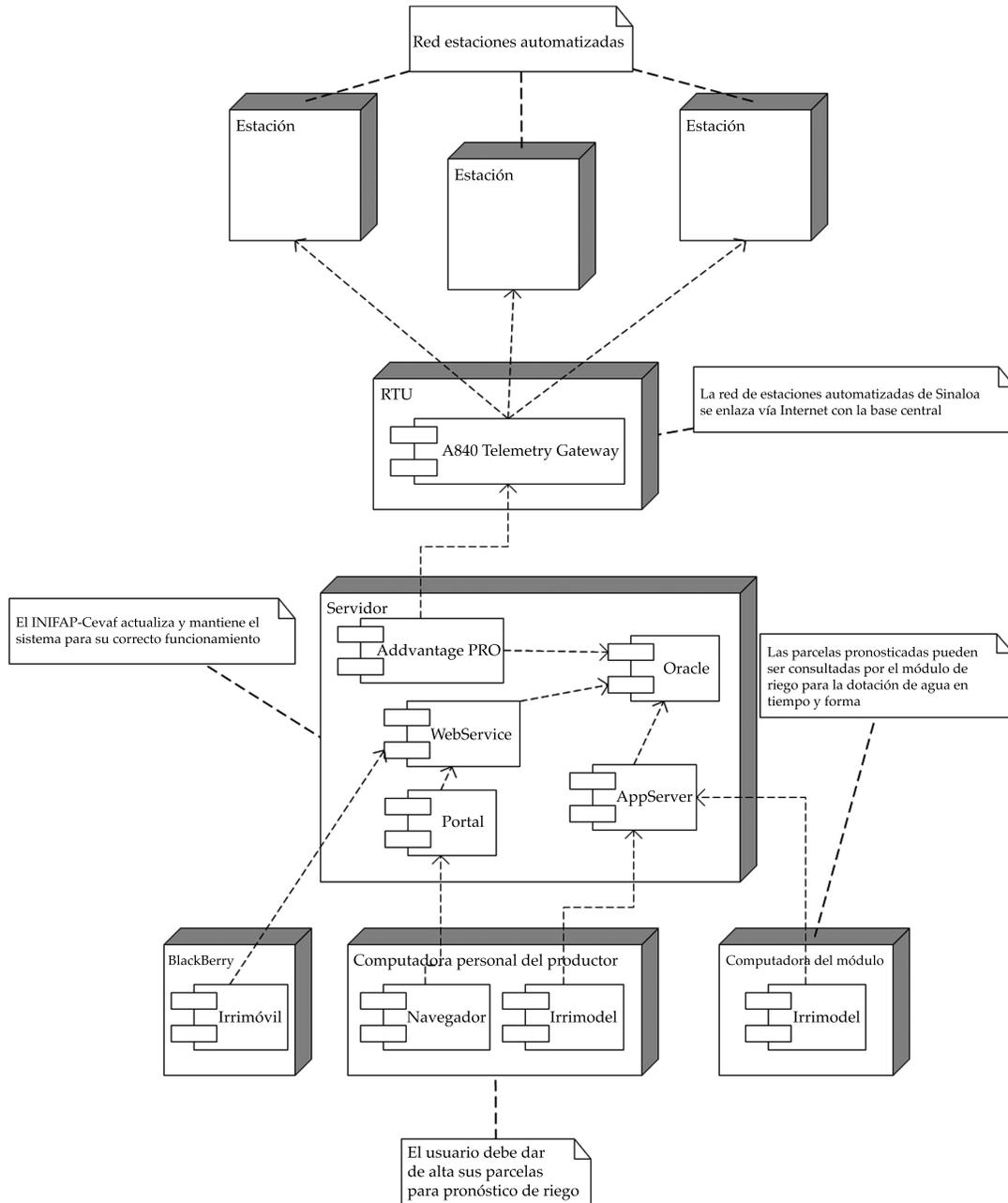


Figura 1. Diagrama de flujo del procesamiento de información climática para calendarización en tiempo real.

multicapa usando la tecnología Datasnap de Delphi, que permite separar la lógica de negocio en un servidor de aplicaciones y la presentación con los componentes VCL que pueden interconectarse por medio de Internet usando DBEXPRESS.

El sistema está diseñado para tres tipos de usuarios: 1) administrador del sistema, 2) productores y técnicos y 3) operadores de módulos de riego. Cada usuario puede tener acceso a una configuración específica del sistema de acuerdo con sus necesidades de operación, la cual es definida en coordinación por el administrador, como se muestra en la figura 2.

Los principales beneficios que ofrece el programa *Irrimodel* son los siguientes:

- Elabora planes de riego para un ciclo biológico completo bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua, suelos y sistemas de riego.
- Ajusta cada día la demanda hídrica del cultivo a partir de la siembra y considerando variabilidad climática.
- Pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo, determinado por la acumulación de grados día o tiempo térmico (*GDA*).
- Propone indicadores de apoyo para la supervisión y aplicación eficiente del riego.
- Presenta y predice la aparición de etapas fenológicas del cultivo.
- Es un auxiliar en la evaluación del manejo del riego de una o un grupo de parcelas al final de un ciclo agrícola.
- Consulta de bases de datos de clima y humedad de suelo en tiempo real e históricas.
- Además, el programa ofrece la ventaja de mejorar el grado de uso de fertilizantes principalmente nitrogenados y reducir el riesgo de enfermedades, pues es posible mantener niveles óptimos de humedad durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo, lo cual ayuda a incrementar de manera significativa la calidad de la producción.

Adopción de la tecnología

Capacitación y soporte técnico

Desde finales de septiembre de 2009 se inició el periodo de capacitación a técnicos y productores en la operación del sistema y sus aplicaciones prácticas. Se tuvo la participación de los productores de papa del norte de Sinaloa a través del Sistema Producto Papa local, también del módulo de riego Santa Rosa, perteneciente al distrito de riego 075 y donde se establecen alrededor de 4 000 ha de papa. Los usuarios que se integraron al programa de capacitación recibieron soporte técnico (agronómico e informático) durante todo el ciclo del cultivo a través del portal o mediante visitas directas.

Establecimiento de parcelas

Durante el proyecto se establecieron dos tipos de parcelas: 1) parcelas piloto donde se tuvo mejor control de la aplicación de la tecnología y 2) parcelas de adopción donde la tecnología la aplicó de modo directo el usuario. Las parcelas que se manejaron como piloto fueron cuatro (cuadro 6), estableciéndose en los municipios de Ahome, Guasave y El Fuerte.

Las parcelas de adopción las manejaron por completo tanto los usuarios que recibieron capacitación en los cursos programados como usuarios que solicitaban integrarse durante el transcurso del ciclo agrícola. La mayoría de estas parcelas se ubicaron en los municipios de Ahome y Guasave, aunque también se establecieron algunas en el municipio de El Fuerte (figura 3).

Resultados y discusión

Nivel de uso de la tecnología

El nivel de uso de la tecnología en las parcelas integradas al sistema fue diferenciada por diversas circunstancias, principalmente de operación interna con cada productor. Para

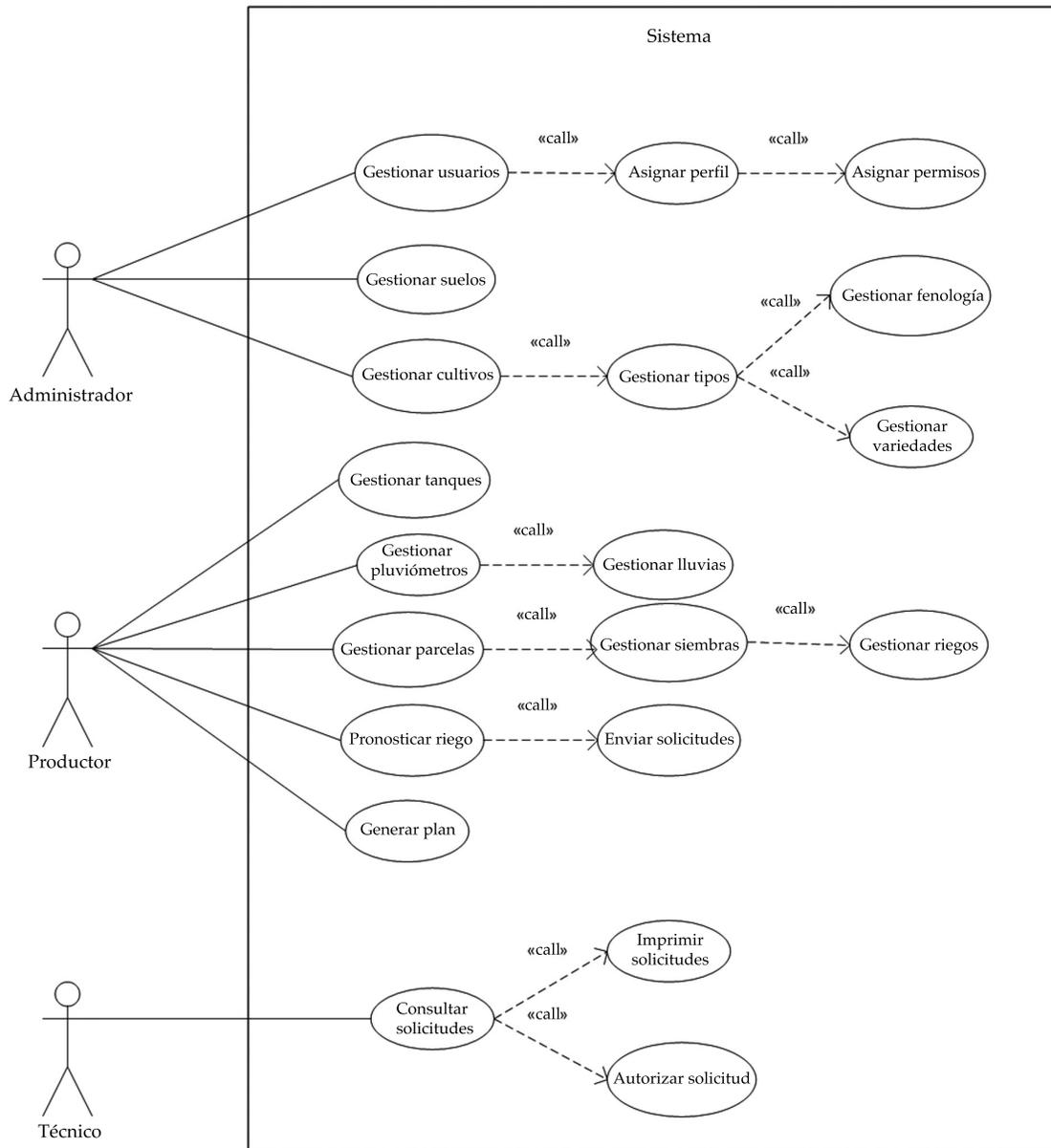


Figura 2. Diagrama de casos de uso del sistema Irrimodel.

cuantificar dicha diferenciación se clasificaron dos tipos de parcelas: 1) nivel alto, que aplicaron la tecnología de 90-100%; 2) nivel medio, donde el nivel de aplicación fue en 40-70%. En total se integraron 56 parcelas, que sumaron un total de 3 067.4 ha, de las cuales 1 738.4 fueron de nivel alto y el resto (1 329 ha), nivel medio (cuadro 7).

Análisis de parcelas piloto

Parcela Cevaf

Esta parcela se estableció bajo riego por gravedad usando la variedad fianna, la siembra fue el 11/11/09, con una densidad de 4 semillas·m⁻¹. El método de siembra fue en seco (con riego de

Cuadro 6. Características generales de parcelas piloto.

Núm.	Nombre	Superficie (ha)	Suelo	Sistema de riego	Fecha de siembra	Variedad	Ubicación
1	Cevaf	0.2	Arcilloso	Gravedad	11/11/09	Fianna	Cevaf (Guasave)
2	Hugo Gómez	20	Arcillo limoso	Aspersión	29/10/09	Ágata	Km 24, canal valle del Fuerte (El Fuerte)
3	Lote B-41	105.4	Franco arcilloso	Aspersión	28/12/09	Atlantic	Ejido Luisiana (Ahome)
4	Lote B-73	60	Franco arcilloso	Aspersión	19/11/09	FL-1867	Ejido 1° de Mayo (Ahome)
Total		185.6					

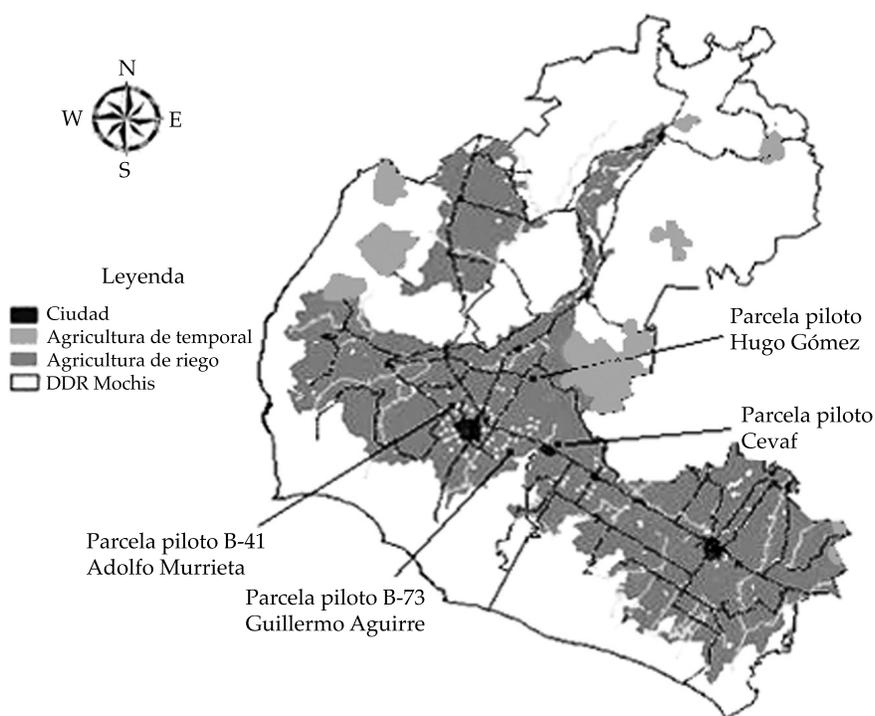


Figura 3. Parcelas de papa (gris claro) donde se está utilizando la tecnología de programación integral y gestión del riego a través de Internet en el Valle del Fuerte.

Cuadro 7. Nivel de uso de la tecnología de gestión de riego por Internet en dos tipos de usuarios de papa en el Valle del Fuerte, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Nivel de uso	Superficie		Número de productores	Número de parcelas	Superficie promedio (ha)	Número de propietarios
	ha	%				
Alto	1 738.4	56.67	9	41	42.4	174
Medio	1 329.00	43.33	8	15	88.60	130
Total	3 067.40	100.00	17	56	54.77	304

germinación inmediato), en surcos con separación de 80 cm y longitud de 80 m. Los riegos aplicados fueron seis, con un requerimiento de hídrico total (lámina neta total) de 36.39 cm y láminas netas de 5.61 a 6.3 cm en los riegos de auxilio. La lámina bruta total (lámina aplicada) fue de 57.74 cm con una eficiencia promedio de 63.02%.

La parcela que se usó como testigo fue el lote 9 de Diciembre de nueve hectáreas con condiciones de suelo, variedad, fecha de siembra y sistema de riego similares. Esta parcela se ubicó en el municipio de Ahome, a un costado del poblado Benito Juárez, dentro del módulo de riego Santa Rosa. Los riegos aplicados fueron seis, incluyendo el riego de presiembra, con una lámina de riego aplicada de 78 cm y una eficiencia promedio de 51% (12% menor que la obtenida en la parcela Cevaf).

La figura 4 muestra una comparación de estas dos parcelas, utilizando siete variables: rendimiento, lámina neta, riegos aplicados, lámina bruta, eficiencia, volumen y productividad del agua. En la parcela Cevaf se obtuvo un rendimiento de 43.06 t·ha⁻¹, mientras que en la testigo fue de 38 t·ha⁻¹; la lámina aplicada se redujo en 20 cm (2 000 m³·ha⁻¹) con respecto al testigo. Se estimó una productividad del agua de 7.33 kg·m⁻³ y 4.87 kg·m⁻³ para la parcela Cevaf

y testigo, respectivamente.

Además de lo anterior, se presentó una mejora importante en la calidad del tubérculo. La parcela manejada con la tecnología del proyecto permitió incrementar en más de 20% los tubérculos de primera clase con respecto al testigo y reducir el número de tubérculos de tercera (3.5 cm de diámetro menor) (figura 5).

Parcela Hugo Gómez Arroyo

Esta parcela se estableció bajo riego por aspersión (pivote central), con surcos a 90 cm de separación. Se utilizó la variedad ágata con fecha de siembra de 29/11/09 y una densidad de 4 semillas·m⁻², aplicándose el primer riego en presiembra, con fecha de 11/10/09. En total se aplicaron nueve riegos, incluyendo riego de presiembra con un requerimiento hídrico total de 39.39 cm y láminas netas en cada riego de 4.18 a 6.11 cm. La lámina bruta total fue de 46.96 cm, con una eficiencia promedio de 83.87% (cuadro 8).

Lote B-41

El sistema de riego de esta parcela fue por aspersión (avance frontal). Se estableció la variedad atlantic con fecha de siembra de 08/12/09,

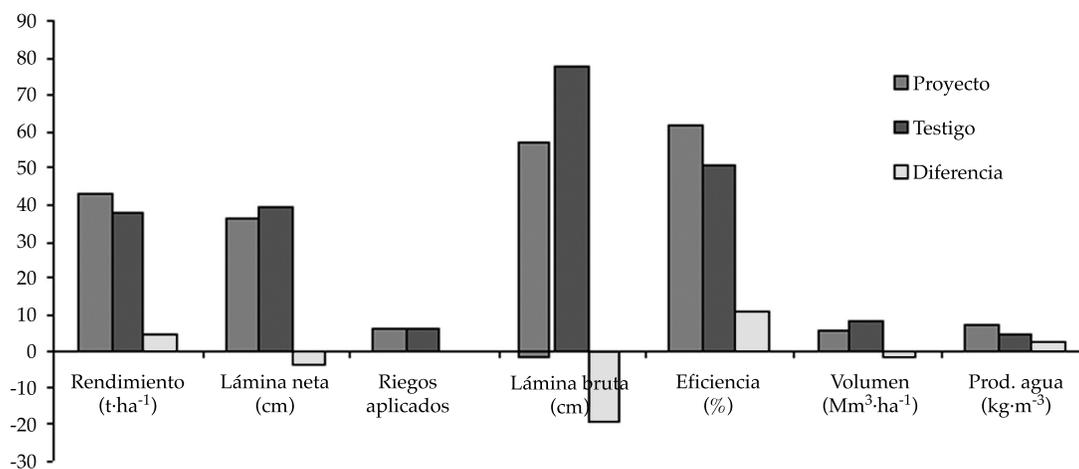


Figura 4. Resultados obtenidos en parcela de papa manejada con la tecnología de proyecto comparada con un testigo en el Valle del Fuerte, Sinaloa, ciclo 2009-2010.

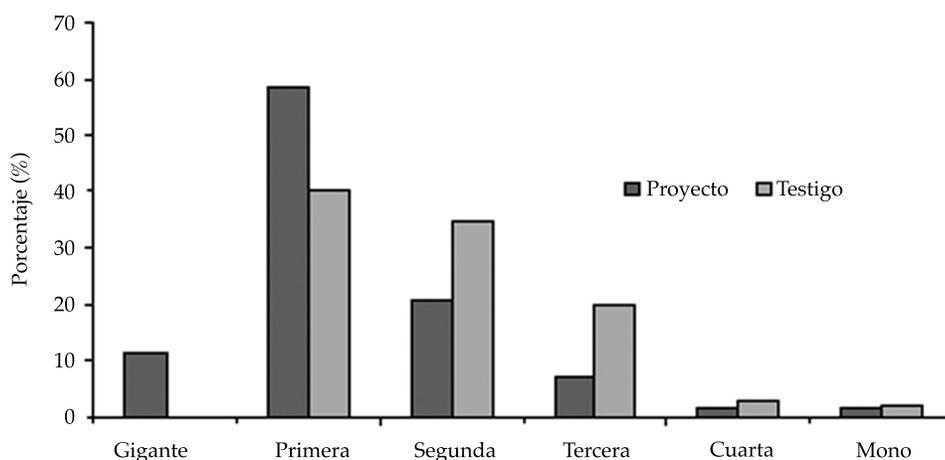


Figura 5. Distribución de la calidad de la cosecha en parcela Cevaf comparada con un testigo (lote 9 de Diciembre).

Cuadro 8. Riegos aplicados en parcela piloto Hugo Gómez Arroyo programados considerando variabilidad climática, en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Número de riego	Fecha de riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia (%)	Etapas
1	11/10/2009	-	-	8.81	10.15	86.80	Riego presiembra
2	16/11/2009	17	17	3.31	4.65	71.18	Brotación
3	25/11/2009	28	11	3.62	4.53	79.91	Inicio de estolonización
4	04/12/2009	37	9	3.84	4.16	92.30	Inicio de estolonización
5	14/12/2009	47	10	4.01	4.16	96.39	Inicio de estolonización
6	23/12/2009	56	9	4.90	4.96	98.79	Inicio de estolonización
7	04/01/2010	67	11	3.85	4.91	78.41	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
8	14/01/2010	77	10	3.81	4.54	83.92	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
9	23/01/2010	86	9	3.24	4.91	65.98	Desarrollo de tubérculos (diám: 3-5 cm)
				39.39	46.97	83.87	

con una densidad de 4 semillas·m⁻¹. Los riegos aplicados fueron siete en total (incluido el de presiembra), con un requerimiento de riego total (lámina neta total) de 35.59 cm y láminas requeridas en cada riego de auxilio de 3.8 a 5.12 cm. La lámina bruta total (lámina aplicada) fue de 41.07 cm, con una eficiencia promedio de 86.65% (cuadro 9).

Lote B-73

En esta parcela se estableció la variedad FL-1867, con fecha de siembra de 19/11/09, con una

densidad de 4 semillas·m⁻¹. Los riegos aplicados fueron ocho en total con riego por aspersión (pivote central). El requerimiento hídrico total fue de 30.47 cm y láminas requeridas en cada riego de 3.8 a 5.11 cm. La lámina bruta total fue de 41.88 cm, con una eficiencia promedio de 72.75%.

Análisis global

Este análisis se realizó con los resultados obtenidos de las parcelas con nivel de uso alto, para tener una estimación de los alcances de esta

Cuadro 9. Riegos aplicados en el lote B-41 programados considerando variabilidad climática, en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Número de riego	Fecha de riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia (%)	Etapa
1	07/11/2009	-	-	10.45	11.80	88.52	Riego de germinación
2	02/12/2009	-	-	3.86	3.89	99.22	Riego de germinación
3	15/01/2010	38	38	3.49	4.84	72.10	Emergencia
4	28/01/2010	51	13	3.62	4.96	72.98	Inicio de estolonización
5	10/02/2010	63	12	4.53	5.00	90.68	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
6	22/02/2010	75	12	4.78	5.70	83.94	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
7	06/03/2010	88	13	4.85	4.88	99.48	Desarrollo de tubérculos (diám: 3-5 cm)
				35.59	41.07	86.65	

tecnología en el ámbito comercial. Este grupo de parcelas se compararon con otro grupo tomado al azar con manejo tradicional, ubicado dentro del módulo de riego Santa Rosa, perteneciente al DR-075, en un área de 4 000 ha de papa, analizando por separado tanto las parcelas bajo riego por gravedad (396 ha) como las de riego por aspersión (1 334 ha). Las variables que se analizaron fueron eficiencia en el uso del agua, rendimiento, productividad del agua y requerimientos hídricos por fecha de siembra.

Eficiencia en el uso del agua

En riego por gravedad, la eficiencia de aplicación de todas las parcelas evaluadas fue mayor a la eficiencia promedio de la zona, que es de 51%. El incremento observado fue desde 5 hasta 30%; es decir, que es posible obtener eficiencias de aplicación hasta de 80% con el apoyo de esta tecnología (figura 6).

El comportamiento de las eficiencias de aplicación en riego por aspersión fue similar al de gravedad; la eficiencia promedio de la zona fue de 78%, mientras que la obtenida en 10 de las 12 parcelas evaluadas fluctuó de 81 a 97%; las dos restantes estuvieron por debajo de la media de la zona; es decir, mediante un manejo científico, es posible un incremento máximo hasta de 19% (figura 7).

Análisis de rendimiento

Se encontró un rendimiento promedio en la zona de análisis de 27 t·ha⁻¹. Cabe mencionar que el rendimiento medio estatal es de 26 t·ha⁻¹. En las parcelas bajo riego por gravedad manejadas con el sistema sólo una de las 13 parcelas no superó la media (semillero caña), como se observa en la figura 8. En esta variable destacan las parcelas Cevaf, Remolacha y Viuda, con 43, 40 y 33 t·ha⁻¹, respectivamente; es decir, un incremento de 16, 13 y 6 t·ha⁻¹ de manera respectiva.

El promedio de rendimiento en riego por aspersión en la zona fue de 35 t·ha⁻¹, por lo que la mayoría de las parcelas se mantuvo en este valor, con excepción de tres parcelas (figura 9), cuyo rendimiento fue cercano a las 44 t·ha⁻¹. Cabe mencionar que una de estas tres parcelas fue parcela piloto.

Productividad del agua

Esta variable es una de las más importante desde el punto de vista ambiental y económico, pues es un indicador de la eficiencia de los sistemas de producción para transformar el insumo agua en producto, que a su vez se transformará en beneficios para la sociedad, como alimento y bienes materiales. En las 13 parcelas manejadas bajo riego por gravedad sólo dos no superaron

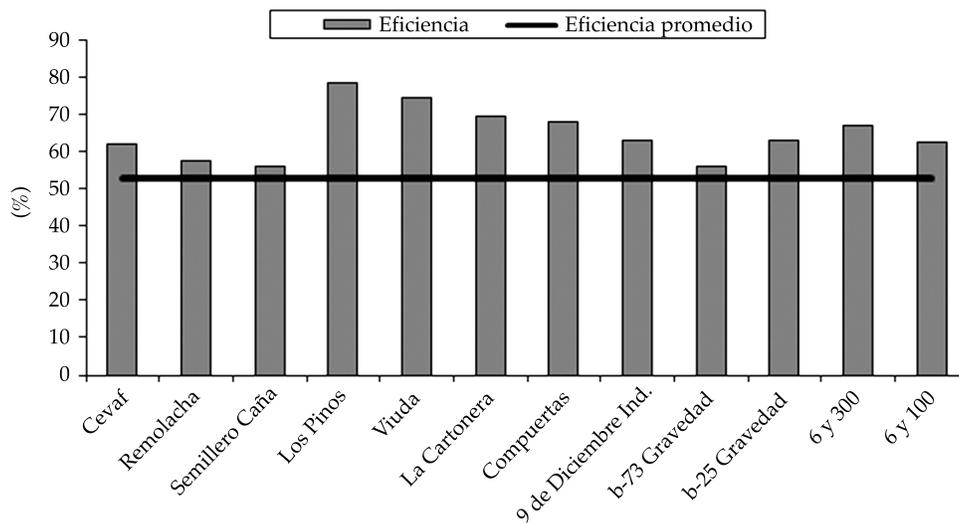


Figura 6. Eficiencia de riego en parcelas de papa manejadas con la tecnología bajo riego por gravedad comparadas con eficiencia promedio.

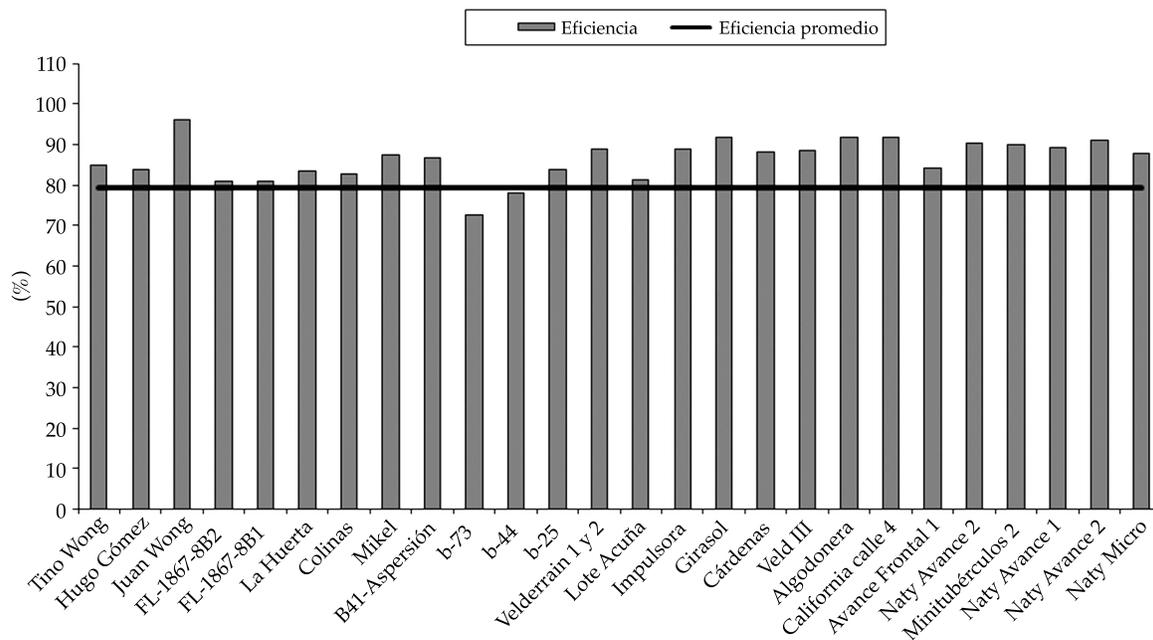


Figura 7. Eficiencia de riego en parcelas bajo riego por aspersión manejadas con programación integral comparadas con la eficiencia promedio.

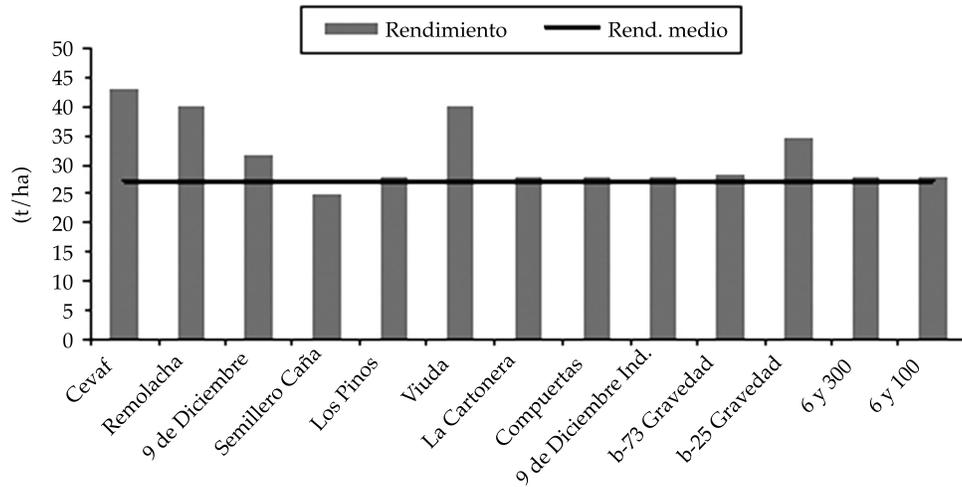


Figura 8. Rendimiento obtenido en parcelas bajo riego por gravedad con la tecnología comparada con el promedio de una zona representativa.

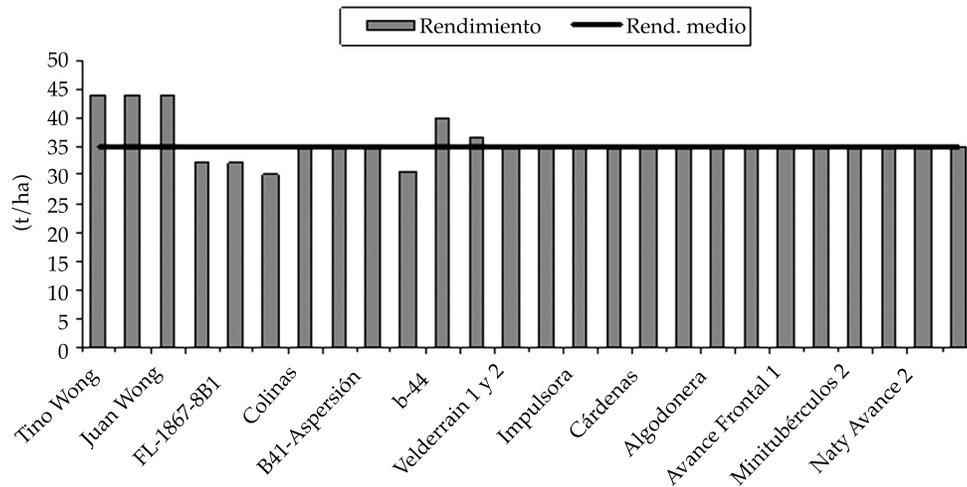


Figura 9. Rendimiento obtenido en parcelas bajo riego por aspersión con la tecnología comparada con el promedio de una zona representativa.

la productividad media, que fue de $4.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, el resto osciló entre 4.7 y $7.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. El valor máximo lo obtuvo la parcela Cevaf, donde se tuvo un mejor control en la aplicación adecuada

de la tecnología.

Bajo riego por aspersión, el incremento en productividad del agua fue más significativo, contrastando con el rendimiento. Ello indica

la capacidad que tienen estos sistemas para aplicar láminas bajas y mantener la humedad del suelo óptima con el apoyo de la tecnología de programación integral del riego. Se observó una fluctuación de la productividad del agua desde 6.5 hasta 11 kg·m⁻³, mientras que la media fue de 6.1 kg·m⁻³.

Impactos potenciales de la tecnología

Impactos ambientales

Un mejor manejo de la calendarización del riego se traduce en un mejor control de la salinidad y contaminación ambiental. El uso del sistema para la aplicación precisa de los riegos dará una mayor certidumbre y confianza a los agricultores para programar sus riegos. Se espera que esta tecnología podrá ayudar a reducir en un 20% la lámina convencional aplicada al cultivo de papa, que representa 1 800 m³·ha⁻¹ sin efecto negativo en el rendimiento. Lo anterior permitirá reducir la cantidad de nitrógeno aplicado, que en la actualidad es de 200 unidades por hectárea.

Impactos económicos

El cultivo de la papa en el norte de Sinaloa aporta cerca de 20% de la derrama económica total, que equivale a cerca de 1 400 millones de pesos. El uso y manejo de esta tecnología repercute no sólo en un menor volumen de riego, sino también en el aseguramiento de los rendimientos potenciales, al acoplar el requerimiento hídrico de los cultivos con las condiciones climáticas.

Impactos tecnológicos

Ante la falta de herramientas científicas de fácil acceso y uso, los agricultores aplican sus insumos de manera empírica, por lo que la gestión del riego a través de Internet es una herramienta indispensable para iniciar un cambio tecnológico en la manera de programar y aplicar el riego. La presente tecnología sienta las bases para reducir la incertidumbre en los sistemas

de producción de papa, generada, entre otras cosas, por el clima, acorde con los adelantos tecnológicos actuales y la competencia que con mayor frecuencia enfrentan los agricultores.

Impactos sociales

Cada vez son más los agricultores que tienen acceso a Internet. La plataforma computacional sin duda iniciará una nueva etapa en la agricultura sinaloense, al poner a disposición de los agricultores y de la sociedad una nueva forma de presentar y transferir el conocimiento. Esta herramienta ayudará a promover de forma rápida la cultura del agua y reducir problemas sociales generados por la disputa de este recurso. De acuerdo con Massieu (2004), la papa genera 90 jornales·ha⁻¹, que en Sinaloa representan alrededor de 1 260 000.

Conclusiones

- Se cuenta con una plataforma computacional robusta para gestión del riego por Internet enfocada a variabilidad y cambio climático, preparada para incorporar otros cultivos y aplicaciones agrometeorológicas.
- El manejo del riego a través de Internet con el programa *Irrimodel* permite involucrar a gran número de productores.
- Es posible lograr eficiencias en el uso del agua de 60 a 80% en riego por gravedad, de 85 a 90% en aspersión y de 95% en goteo, además de mejorar la calidad y cantidad de sus rendimientos. Con esta herramienta también se logran potenciar otros insumos, como fertilizante, al reducir los periodos de estrés hídrico y láminas aplicadas por sobrerriego.
- El sistema también contribuirá a mejorar el servicio de riego de los módulos hacia el usuario, pues el supervisor de riego podrá atender casi en tiempo real las solicitudes que genere el productor a través de Internet y tener una mejor operación de los canales.
- Se cuenta con una excelente herramienta para reducir los efectos negativos de eventos extremos como sequías prolongadas y

heladas, representando también una opción de adaptación al cambio climático.

Referencias

- Arteaga, R. R., Ángeles, M. V., & Vázquez, P. M. A. (2011). Programa *Cropwat* para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2):179-195.
- Avery, E. R. (1983). *Potato Diseases* (238 pp.) Durham New Hampshire, United Kingdom: Department of Botanic and Plant Pathology, University of New Hampshire.
- Dudek, D. J., Gerald, L. H., & Marshall, J. E. (1981). *The Derived Demand for Irrigation Scheduling Services*. Recovered from <http://www.ageconsearch.umn.edu/bitstream/32586/1/06020217.pdf>.
- Exebio, G. A., Palacios, V. E., Mejía, S. E., & Carmona, V. R. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *SMCS. Terra Latinoamericana*, 23(2):213-223.
- FAO (1986). *Yield Response to Water* (189 pp.). Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: FAO.
- González, B. H. (2003). *Informática y agricultura*. Guatemala: Centro de Telemática, Facultad de Agronomía, USAV. Recuperado de <http://www.iespana.es/byron/public/nfoagric.pdf>.
- IMTA-INIFAP (2011). *Proyecto: Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa. Informe final* (390 pp.). Jiutepec, México: IMTA-INIFAP.
- INTA (2008). *Jornadas de agroinformática*. Recuperado de <http://www.inta.gov.ar/actual/congreso/jaiio/trabajos.htm>.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC* (p. 104). En R. K. Pachauri, & A. Reisinger (Eds.). Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).
- Jefferies, R. A., & Lawson, H. M. (1991). A Key for the Stages of Development of Potato (*Solanum tuberosum*). Invergowrie, Dundee, United Kingdom. Scottish Crop Research Institute. *Ann. App. Biol.* 119: 387-389.
- Marek, T. H., Scherer, T., Porter, D., Rogers, D., Henggeler, J., & Howell, T. A. (2010). *What will it take to Get Irrigators to Use Advisory Programs? Lessons Learned from the Past 10 Years and Beyond*. 5th National Decennial Irrigation Conference Sponsored jointly by ASAE and the Irrigation Association Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona.
- Martin, E. C., Slack, D. C., & Pegelow, E. J. (1996). *Crop Coefficients for Vegetables in Central Arizona* (pp: 381-386). In Proceedings of the International Conference. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Ame. Soc. of Agric. Eng.
- Massieu, T. Y. C. (2004). Aportes. *Revista de la Facultad de Economía Universidad Autónoma de Puebla*, 9(16).
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (Eds.) 2000. *Special Report on Emissions Scenarios* (612 pp.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Slack, D. C., & Carrillo, M. (2004). Generalization of Irrigation Scheduling Parameters Using the Growing Degree Days Concept: Application to a Potato Crop. *Irrigation and Drainage*, 53: 521-261.
- Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., & Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencias*, 40: 13-25.
- Ojeda, W., Martínez, P., & Hernández, L. (2008). Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6. En *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Vol. II. A. Aguilar & P. Martínez (Eds.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Parker, D., Cohen-Vogel, D. R., Osgood, D. E., & Zilberman, D. (May-June, 2000). Publicly funded Weather Database Benefits Users Statewide. *California Agriculture*, 54(3):21-25.
- Pérez, A., Milla, M., & Mesa, M. (2006). Impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura. *Revista Cultivos Tropicales*, 27(1). Recuperado de http://www.inca.edu.cu/otras_web/revista/pdf/2006/1/CT27113.pdf.
- Sagarpa (2010). *Avance mensual por cultivos por estado*. México: Sagarpa. Recuperado de <http://www.siap.gob.mx/>.
- Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H., Harnik, N., Leetmaa, A., Lau, N., Li, C., Velez, J., & Naik, N. (2007). Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America. *Science*, 316: 1181-1184.
- Shayya, W. H., & Bralts, V. F. (1991). *Guide to SCS Microcomputer Irrigation Scheduling Package, SCS-Scheduler Version 2.0* (50 pp.). Michigan, USA: Department of Agricultural Engineering, Michigan State University.
- Shayya, W. H., Bralts, V. F., & Olmstead, T. R. (1990). A General Irrigation Scheduling Package for Microcomputers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 5:197-212.
- Sifuentes, I. E., Quintana, Q. J., Macías, C. J., & González, C. V. (2013). "Irrimodel" Programación integral y gestión del riego a través de Internet. *Manual del usuario. Versión 1.0* (44 pp.). Guasave, México: INIFAP-Cirnocefaf.
- Sifuentes, I. E., Macías, C. J., Apodaca, S. M. A., & Cortez, M. E. (2009). Predicción de la fenología de papa (principios y aplicaciones prácticas) (54 pp.). En *Folleto Técnico 32*. Los Mochis, México: INIFAP-CIRNO.
- UCLA (2006). *Integrated Pest Management for Potatoes in the Western United States. Agricultural and Natural Resources* (167 pp.) (2ª ed.). Publicación 3316. Oakland, USA: Universidad de California.

Dirección institucional de los autores

M.C. Ernesto Sifuentes

M.C. Jaime Macías

INIFAP-Campo Experimental Valle del Fuerte
km 1609, carretera internacional México-Nogales
81110 Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México
Teléfono: +52 (55) 3871 8700, extensión 81503
sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx
macias.jaime@inifap.gob.mx

Dr. Waldo Ojeda

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 329 3600
wojeda@tlaloc.imta.mx

M.C. Víctor M. González

H. Ayuntamiento de Ahome
Jardín Botánico "Benjamin F. Johnston"
Cuauhtémoc esq. Degollado Col. Bienestar s/n
81280 Los Mochis, Sinaloa, México
Teléfono: +52 (668) 8164 000
gcvictorm@gmail.com

M.C. Daniel A. Salinas, MC. José G. Quintana

Universidad Autónoma de Sinaloa
Prol. Ángel Flores y Justicia Social s/n
Ciudad Universitaria
81223 Los Mochis, Sinaloa, México
Teléfonos: + 52 (668) 8186 538 y 8186 500
daniel@ingenieria.lm.uasnet.mx
quintana.josegpe@gmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor