



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

TÉCNICAS DE RIEGO POR GRAVEDAD DE ALTA EFICIENCIA MEDIANTE MODELACIÓN HÍDRICA, CON APLICACIÓN EN DISTRITOS DE RIEGO

ISMAEL TALAMANTES CASTORENA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

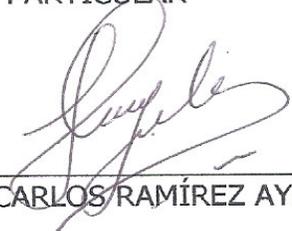
2013

La presente tesis titulada: **TÉCNICAS DE RIEGO POR GRAVEDAD DE ALTA EFICIENCIA MEDIANTE MODELACIÓN HÍDRICA, CON APLICACIÓN EN DISTRITOS DE RIEGO**, realizada por el alumno: **Ismael Talamantes Castorena** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



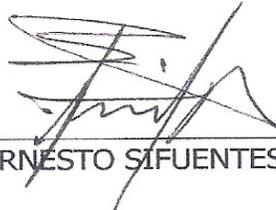
DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

DIRECTOR DE
TESIS



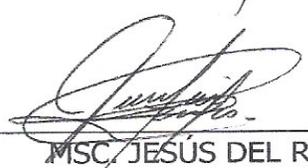
DR. WALDO OJEDA BUSTAMANTE

ASESOR



MC. ERNESTO SIFUENTES IBARRA

ASESOR



MSC. JESÚS DEL ROSARIO RÚELAS ISLAS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Noviembre de 2013

DEDICATORIA

Dedico esta tesis:

A Dios:

Admirable, Consejero, Dios fuerte, Padre eterno, Príncipe de paz a quien le debo la vida y lo que soy. A quien mi alma constantemente alaba.

A mis padres:

Ismael Talamantes Apodaca y Raquel Castorena Irazoqui; por traerme a este mundo, por sus bendiciones y consejos. Además por todas sus enseñanzas de principios y valores. La ayuda, comprensión y esfuerzo que me ha brindado durante toda mi vida, aun en tiempos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su amor y confianza, por todo esto les agradezco con el corazón.

A mi esposa:

Nidia Isabel Rosas Meza quien es mi mejor amiga y amada compañera que Dios puso en mi camino. Quien siempre ha estado apoyándome, y alentándome a seguir adelante y ser mejor cada día. Con todo mi amor por siempre.

A mis hermanos:

Saulo Talamantes Castorena, Devora Talamantes Castorena y Aracely Talamantes Castorena, quienes son parte de mí y de mis logros, los amo y les manifiesto que esta meta también es de ustedes.

A mis abuelos:

Fermín Castorena Aragón e Inés Irazoqui Castro, por su inmenso amor, y por sus oraciones.

A la familia Rosas Meza;

Rubén Rosas Medina (†) y María Luisa Meza Alcantar por permitirme formar parte de su familia. A mis cuñadas por el aprecio y el tiempo dedicado a mi esposa los meses que yo no estuve a su lado.

A mis cuñados:

Juan Daniel Ortega, Jesús Ruelas y Ana Gabriela Ramírez Jaime por estar siempre en los momentos buenos y malos apoyándome.

A la congregación (Iglesia de Dios en México "Flor Azul"):

Un agradecimiento profundo a la congregación a la que pertenezco por estar constantemente en intercesión por mi esposa y por mí. No tengo palabras para agradecerles. Solo digo este triunfo es de ustedes también, gracias a Dios, mi esfuerzo y sus oraciones.

A mis amigos con quienes compartimos momentos de alegría y tristezas.

A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis. A todos ellos les dedico este logro, gracias por ser parte de él.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo lo que hasta este momento me ha permitido vivir, y por darme la oportunidad de llegar a este punto en mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al colegio de posgraduados por haber dado la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Al programa de Hidrociencias, personal académico y administrativo por el apoyo facilidades otorgadas durante mi permanencia.

Al DR. Carlos Ramírez Ayala por su atención y buena disposición en la realización del presente trabajo, por su comprensión ante las situaciones personales que se me presentaron.

Al DR. Waldo Ojeda Bustamante por su dirección, persistencia y apoyo incondicional, que ha sido parte fundamental para el desarrollo del presente trabajo de investigación. Gracias por su enorme paciencia.

Al MC. Ernesto Sifuentes Ibarra por sus acertados comentarios, sugerencias y orientaciones que permitieron concluir con éxito el presente trabajo, y por su invaluable amistad y valiosa calidad humana.

Al Dr. Enrique Mejía Sáenz por su enorme hospitalidad y por ser el primer contacto que tuve en Hidrociencias.

A la MSC. Jesús del Rosario Ruelas Islas, por su valioso apoyo y buena disposición en la revisión del presente trabajo de investigación.

Al MC. Cesar Arturo Palacios Mondaca por su incondicional amistad y sus orientaciones respecto a este trabajo de investigación y la vida misma, A demás por conseguirme el permiso en la Universidad para estudiar el posgrado.

Al MC. Fernando Alberto Valenzuela Escoboza mi gran amigo y uno de mis tutores en la vida, gracias por la enorme disposición de concederme los permisos necesarios para concluir con este trabajo de investigación.

CONTENIDO

Resumen	1
Abstract	2
I INTRODUCCIÓN	3
1.1 Hipótesis.....	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo general	6
1.2.2 Objetivos particulares	6
II REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1 La irrigación en México	7
2.1.1 Situación actual de los distritos de riego en México	8
2.1.2 La operación de los distritos de riego en Sinaloa	8
2.2 El cultivo de maíz en México	10
2.2.1 Importancia económica y social	10
2.2.2 Manejo y sistemas de producción	12
2.2.3 Rendimiento y comercialización	12
2.3 Requerimientos agroecológicos	13
2.3.1 Clima	13
2.3.2 Agua	13
2.4 Calendarización del riego	14
2.4.1 Importancia del riego en la producción del maíz	14
2.4.2 El suelo y su relación con la programación del riego	14
2.4.2.1 Capacidad de campo	14
2.4.2.2 Punto de Marchitez Permanente	15
2.4.2.3 Humedad aprovechable	15
2.4.2.4 Variación del agua en el suelo	15
2.4.3 Características del cultivo asociados al riego	15

2.4.3.1 Fenología	15
2.4.3.2 Profundidad de raíz	17
<i>2.4.3.3 Coeficiente de cultivo</i>	<i>17</i>
<i>2.4.3.4 Evapotranspiración</i>	<i>19</i>
2.4.4 Métodos de programación del riego	19
2.4.4.1 El suelo como indicador	19
2.4.4.2 La planta como indicador	21
2.4.4.3 Balance hídrico	23
2.4.4.4 Sistemas de gestión del riego	25
2.5 Eficiencias de riego	25
2.5.1 Eficiencia de aplicación	25
2.5.2 Eficiencia de uniformidad	25
2.5.3 Eficiencia de conducción	26
2.5.4 Eficiencia global	26
<i>2.6 El diseño del riego por gravedad</i>	<i>26</i>
<i>2.6.1 Elementos de diseño</i>	<i>26</i>
<i>2.6.2 Movimiento del agua en el suelo</i>	<i>27</i>
<i>2.6.3 Modelos para diseño de riego por surcos</i>	<i>27</i>
<i>2.7 Técnicas parcelarias de riego por superficie de alta eficiencia</i>	<i>31</i>
2.7.1 Técnicas de riego por surcos	32
2.7.1.1 Riego en surco alterno	32
2.7.1.2 Riego en camas	33
2.7.1.3 Riego por reducción de gasto	33
2.7.1.4 Riego intermitente	34
2.7.1.5 Riego deficitario controlado	35
<i>2.8 El sistema IrriModel</i>	<i>36</i>
2.8.1 Descripción y operación del IrriModel	36

III MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1 Descripción de la zona de estudio	37
3.2 Diseño experimental	40
3.2.1 Diseño de tratamientos	40
3.2.2 Establecimiento del experimento	40
3.3 Programas computacionales utilizados	41
3.3.1 IRRIMODEL	41
3.3.2 RIGRAV	41
3.4 Calibración del programa RIGRAV para diseño de riego por gravedad ..	41
3.4.1 Calibración de los parámetros del modelo	41
3.5 Variables	44
3.5.1 Eficiencias de riego (aplicación y uniformidad)	44
3.5.2 Rendimiento del cultivo de maíz	45
3.5.3 Productividad del agua	45
IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Calendario de riegos (IRRIMODEL)	45
4.2 Parámetros del modelo de diseño de riego por gravedad (RIGRAV)	46
4.3 Precisión del modelo	47
4.4 Análisis de técnicas de riego por gravedad	48
4.4.1 Eficiencia del riego	48
4.4.2 Rendimiento del grano de maíz	50
4.4.3 Productividad del agua	51
V CONCLUSIONES	52
VI BIBLIOGRAFÍA	54

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Fechas de siembras cultivos de maíz para el módulo de riego Santa Rosa del DR-075 (Iñiguez <i>et al.</i> , 2012)	13
Cuadro 2. Caracterización fenológica del cultivo de maíz de acuerdo a Ritchie <i>et al.</i> (1992)	17
Cuadro 3. Indicadores del suelo de cuándo regar (James, 1988)	21
Cuadro 4. Indicadores de la planta cuándo regar (James, 1988)	23
Cuadro 5. Criterios de riego (CR) y profundidad radical efectiva para diferentes cultivos (Jara <i>et al.</i> , 2007)	25
Cuadro 6. Calendario de riegos utilizado en seis técnicas de aplicación del riego por superficie en el cultivo maíz en el norte de Sinaloa. Suelo arcilloso, fecha de siembra 14/02/11.	48
Cuadro 7. Resultados de la calibración de los parámetros Ks, Hf y n del modelo RIGRAV en dos eventos (C1 y C2).	49
Cuadro 8. Comparación de las variables Qu, Tr, Ea y CUC modeladas con RIGRAV y obtenidas en riegos aplicados en seis tratamientos de riego por superficie en el norte de Sinaloa.	51
Cuadro 9. Rendimiento de grano y rendimiento relativo del cultivo de maíz en seis tratamientos de riego por gravedad en el norte de Sinaloa.	53
Cuadro 10. Rendimiento de grano y productividad del agua en seis técnicas de aplicación del riego en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa.	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Lamina aplicada a nivel parcelario en el módulo Santa Rosa.	10
Figura 2. Diagrama de flujo para la generación del suministro de agua en el DR075 (Ojeda <i>et al.</i> , 2007).....	11
Figura 3. Productores de maíz (FAO, 2010).....	12
Figura 4. Serie histórica del maíz en Sinaloa	14
Figura 5. Fenología del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa adaptado de (Ojeda <i>et al.</i> , 2006).....	18
Figura 6. Pantalla principal del WinSRFR 3.2.....	29
Figura 7. Pantalla principal del programa SIRMOD.....	31
Figura 8. Pantalla principal del programa RIGRAV	32
Figura 9. Aplicación surcos alternos.....	34
Figura 10. Elaboración de camas	35
Figura 11. Aplicación reducción de gasto.....	35
Figura 12. Aplicación de la intermitencia	36
Figura 13. Aplicación del riego deficitario	37
Figura 14. Altitud del estado de Sinaloa en msnm	40
Figura 15. Tipos de suelo del estado de Sinaloa en base a su textura	41
Figura 16. Evaluación de la fase de avance y recesión.....	44
Figura 17. Obtención de las muestras de suelo de los diferentes tratamientos...	46
Figura 18. Comparación de las fases de avance y recesión observada y modelada con el programa RIGRAV durante el proceso de calibración durante el riego inicial (a) y primer auxilio (b).....	50

RESUMEN

El estado de Sinaloa es el principal productor de maíz en México bajo riego, aportando el 65% de la producción nacional, sin embargo, la eficiencia de aplicación de riego se mantiene en 45% y escenarios frecuentes de baja disponibilidad hídrica, han puesto en riesgo la estabilidad económica y social del estado. Con el fin de generar alternativas tecnológicas de aplicación inmediata que contribuyan a mejorar la eficiencia en el uso del agua del maíz, en el presente estudio se evaluaron cinco técnicas parcelarias de riego por gravedad de alta eficiencia: 1) surcos alternos, 2) camas, 3) reducción de gasto, 4) riego intermitente y 5) riego deficitario, comparándolas con el sistema tradicional (testigo). El estudio se realizó en el distrito de riego 075 (norte de Sinaloa) dentro del Campo Experimental Valle del Fuerte del INIFAP. Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con dos repeticiones. La programación de los riegos se realizó con el programa IRRIMODEL para determinar el requerimiento hídrico (L_n) y el momento de riego. El diseño de los riegos en los tratamientos se hizo con el programa RIGRAV estimando el gasto y tiempo de riego óptimos. El mejor tratamiento fue reducción de gasto con 89.16 y 92% de Eficiencia de Aplicación y Uniformidad respectivamente, seguido del riego intermitente con una eficiencia de aplicación de 85.79% y 93.3% de uniformidad. El testigo mostró la mayor uniformidad 99.03% pero la más baja eficiencia de aplicación 48.78%. Desde el punto de vista de ahorro y productividad del agua el mejor fue el riego deficitario, esta técnica podría ser una excelente opción en escenarios críticos de disponibilidad hídrica. Se demostró que el RIGRAV es una opción para usarse a nivel de zonas de riego.

Palabras clave: Diseño, riego de precisión, productividad del agua, rendimiento.

ABSTRACT

The state of Sinaloa is the major irrigated corn producer under in Mexico. It contributes with 65% of national irrigated production. However, the major constraints are the low irrigation efficiency 45% and the frequency of years with low water availability that have put into risk the economic and social stability. The current research was realized in order to generate technological applied alternatives that improve water use efficiency in corn. The experiments consisted of five different surface irrigation techniques: 1) alternate furrows, 2) beds, 3) flow rate reduction, 4) intermittent irrigation, 5) deficit irrigation and the conventional irrigation technique. The study was carried out at irrigation district 075 (north of Sinaloa) and Valle del Fuerte agricultural center (INIFAP). The experiments were arranged in a complete block design with 2 replications. Irrigation scheduling was realized using a computer program called irrimodel which determines irrigation requirement and timing. Furthermore, irrigation design in all treatments was done using another computer program called RIGRAV which basically consists in estimating the flow rate and optimal timing. The best treatment was flow rate reduction technique with 89.16% and 92% overall efficiency and uniformity. Followed by intermittent irrigation technique with 85.79% and 93.3% overall efficiency and uniformity. The conventional irrigation technique showed the greatest uniformity 99.03% but the lowest efficiency 48.78%. In terms of water saving and efficiency the best treatment was deficit irrigation technique which in could be an excellent choice in periods of low water availability. According to this study it is possible to manage RIGRAV program in all treatments and be an excellent option to consider at irrigation districts.

Keywords: design, irrigation technique, water use efficiency, yield.

I. INTRODUCCION

El maíz a nivel mundial se utiliza como alimento para animales o como materia prima industrial y sólo el 20% se destina al consumo humano, sin embargo, el aumento de la población mundial ejerce una fuerte presión sobre los recursos de agua dulce en países con grandes zonas áridas y semiáridas como México, solo la agricultura de riego puede proveer un adecuado suministro de alimentos para su creciente población.

En México el 68% de la producción de maíz se destina para consumo humano con un valor *per cápita* de 127 kg año⁻¹ (Nadal y Wise, 2005), cultivándose en una superficie anual de 7 a 8.5 millones hectáreas mayoritariamente bajo condiciones de temporal, 85% en el ciclo Primavera-Verano, y el 15% restante bajo riego en el ciclo otoño-invierno (Muñoz y Hernández, 2004), siendo el estado de Sinaloa el principal productor de maíz de riego aportando el 65% de la producción nacional (Ojeda *et al.*, 2006).

Desafortunadamente la distribución espacial y temporal del agua en México es muy desfavorable para la producción agrícola de temporal, por lo que la agricultura de riego seguirá siendo fundamental para cubrir la demanda de alimentos y materias primas que requiere su población, convirtiendo a este sector en el mayor usuario de agua dulce, situación que la obliga a ser más eficiente en el uso de este recurso (Palacios, 2005).

El cultivo de maíz es muy productivo con la aplicación de riego, puede triplicar su rendimiento con respecto al que se alcanza bajo condiciones de temporal, sin embargo, es muy sensible al déficit hídrico por lo que es muy importante acoplar el riego con la necesidad hídrica de la planta (Palacios, 2010), en nuestro País, la

agricultura de riego ya se encuentra en transición, pasando de la fase de expansión a la fase de maduración donde la optimización de los insumos agrícolas como el agua es de suma importancia ante su limitada, costosa e incierta disponibilidad (Sifuentes *et al.*, 2013).

En el estado de Sinaloa la agricultura está ligada a la cultura del uso excesivo de insumos y al monocultivo de maíz, provocando que esta actividad cada vez menos rentable y se deteriore la calidad de los recursos naturales; en maíz se aprovecha solo el 45%, el resto se pierde en el drenaje y por percolación profunda, arrastrando fertilizantes móviles y suelo (Sifuentes *et al.*, 2013), debido a una adecuada cultura del agua, ausencia de técnicas de riego fáciles de adoptar y al limitado personal capacitado para implementarlas (Sifuentes *et al.*, 2011). A pesar que los distritos de riego (DR) del noroeste de México han recibido apoyos por parte del estado para la modernización y rehabilitación de canales, tecnificación parcelaria y modernización de pozos, entre otras obras (CONAGUA, 2009), no se han tenido los impacto esperados en ahorro y aprovechamiento de agua.

En estas regiones el riego por gravedad sigue siendo la técnica más usada con el 85% de la superficie, 10% es aspersión y solo 5% es por goteo, sin embargo, en distritos de riego como el 075 los informes hidrométricos muestran una baja eficiencia parcelaria del orden del 40%, lo que indica aplicaciones de láminas altas de riego principalmente en cultivos como el maíz y caña de azúcar (Sifuentes *et al.*, 2003). Aunado a lo anterior en los últimos años se ha observado una alta variabilidad climática en el norte de Sinaloa provocando alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos e incremento en la presencia de eventos extremos como sequias y heladas (Sifuentes *et al.*, 2013).

Para lograr un riego de alta eficiencia se requiere primeramente conocer las necesidades hídricas de los cultivos y mejorar la aplicación del agua en las parcelas, entre los paquetes computacionales comerciales usados para estimar el requerimiento de riego se encuentran: CROPWAT desarrollado por la FAO (Allen *et al.*, 1998), y SPRITER (Ojeda *et al.*, 2004). La distribución del riego en la parcela demanda analizar diferentes escenarios de manejo bajo condiciones iniciales y de frontera, para ello en la actualidad existen programas como el SIRMOD, el WINSRFR y RIGRAV entre otros.

Aunque la aplicación del riego por surcos no ha variado mucho en las últimas décadas, se requiere mejorar su aplicación mediante técnicas que permitan incrementar su eficiencia, entre las que destacan: 1) *riego en surco alterno*, el cual puede reducir las láminas brutas aplicadas sin afectar la producción del cultivo (Graterol *et al.*, 1993; Kang *et al.*, 2000; Webber *et al.*, 2006; Horst *et al.*, 2005, 2007), 2) *camas*, consiste en un bordo de 1.6 m de ancho y 0.20 m de alto con una separación entre camas de 0.15 m (formando un surco) que permite un rápido mojado horizontal (Sifuentes, 2003); 3) *reducción de gasto*, en el cual el agua suministrada se reduce paso a paso de tal manera que se eliminan las pérdidas por escorrentía al final del surco y las pérdidas por percolación en el inicio del surco se mantienen al mínimo (Lal y Pandya, 1970), 4); *riego intermitente*, es la aplicación intermitente del agua de riego a surcos o melgas, con una serie de periodos en diferentes fases de duración constante o variable (Utah Agricultural Experiment Station, 1988) y 5) *riego deficitario controlado*, que consiste en reducir los aportes hídricos en los periodos fenológicos en los que el estrés hídrico no afecta significativamente a la producción y calidad de la cosecha

y cubre plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo del cultivo (Mitchel *et al.*, 1984).

Esta última técnica se basa en considerar que los cultivos presentan diferente sensibilidad al estrés hídrico dependiendo de su etapa fenológica. El estrés hídrico se presenta cuando la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) es menor que la demandada bajo condiciones óptimas que producen su máximo rendimiento potencial (Doorembos y Kassan, 1986).

En este trabajo se evaluaron las cinco técnicas anteriores para seleccionar las que mejor se adapten a las condiciones del norte de Sinaloa que ayuden a incrementar la eficiencia del riego superficial y conservación de humedad a nivel parcelario y de módulo de riego.

1.1 HIPOTESIS

Mediante la modelación hídrica con sistemas computacionales calibrados localmente, es posible diseñar técnicas parcelarias de riego por gravedad de alta eficiencia y de bajo costo, para el mejoramiento de la eficiencia en el uso del agua en maíz en el norte de Sinaloa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Estudiar las técnicas de riego por surcos y adaptarlas a las condiciones del norte de Sinaloa para incrementar la eficiencia del riego superficial y conservación de humedad a nivel parcelario y de módulo de riego.

1.2.2 Objetivo particulares

1. Definir los parámetros de diseño del modelo de diseño de riego por gravedad RIGRAV y calendarización del riego IRRIMODEL
2. Calibrar un modelo para diseño de riego por gravedad RIGRAV
3. Adecuar el uso del RIGRAV a las técnicas: Surco Alterno, Cama, Reducción de gasto, Intermitente y Riego Deficitario
4. Seleccionar las técnicas de fácil implementación a nivel parcelario y de zona de riego

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 La irrigación en México

En México los principales usos del agua son: domestico, industrial y agrícola. En el caso de México, el agua de uso agrícola está organizado en dos formas: la grande irrigación y la pequeña irrigación (Escobedo, 1997).

Para distinguir entre una y otra se sigue más que un criterio de tamaño, una divisoria administrativa: la gran irrigación, los llamamos “distritos de riego” que corresponden a sistemas de riego administrados y en su gran mayoría construidos por él estado y pequeña irrigación o (pequeño riego) aquellos sistemas que en los últimos años se han denominado “Unidades de riego”, es decir todos los sistemas de riego que no conforman un “distrito de riego” (Escobedo, 1997).

Un distrito de riego es el establecido mediante decreto presidencial el cual está conformado por una o varias superficies previamente delimitadas y dentro de cuyo perímetro se ubica una zona de riego el cual cuenta con las obras de infraestructura hidráulica, aguas superficiales y del subsuelo, así como sus vasos de almacenamiento, su zona federal de protección y demás bienes y obras conexas pudiendo establecerse también con una o varias unidades de riego (CONAGUA, 2004).

Por su parte (Palacios, 1981) dice que los distritos están constituidos por tres tipos de obras: las de riego, las de drenaje y las vías o caminos. Las primeras tienen por objeto llevar el agua de la fuente de abastecimiento a los cultivos, la segunda su función es extrae los excesos de agua tanto superficial como subterráneas, así como las sales que ésta trae en solución y por último, los

cominos son indispensables para la movilización del personal y equipo de operación y de los usuarios.

2.1.1 Situación actual de los distritos de riego en México

En los distritos de riego de la zona noroeste de México, el servicio de riego se programa en función de la facilidad del manejo hidráulico de la red de distribución y de la apreciación empírica y subjetiva del usuario, tratando de aplicar el método de tandeo combinado con la programación semanal dejando a un lado métodos científicos para conocer las necesidades hídricas reales de los cultivos las cuales están en función principalmente de las condiciones temporales del clima.

2.1.2 La operación de los distritos de riego en Sinaloa

En los distritos de riego se conduce el agua desde la fuente de abastecimiento hasta las parcelas de los usuarios, tratando de dar el servicio de entrega de agua para riego en el momento oportuno y con la cantidad necesaria. Para ello es necesario contar con un sistema de canales, con obras de control y complementarias construidas y localizadas de manera que permitan su distribución entre las diferentes unidades, zonas y secciones de riego que conforman a los diferentes módulos de riego.

Las bajas eficiencias globales de estos distritos reflejan un alto costo de operación, y sus consecuencias se observan en agotamientos de los almacenamientos de agua en las presas, ensalitramiento de los suelos, disminución de áreas de cultivo y disminución de rendimientos por falta de una buena planeación. La situación anterior se ha agudizado debido a las sequías recurrentes pero no cíclicas que ha afectado la zona.

En la Figura 1 se muestra la lámina aplicada de los últimos 12 años sobre la superficie sembrada de maíz en el modulo de riego Santa Rosa DR075. Con una lámina media aplicada a nivel parcelario con 92.52 cm. Cuando la necesidad hídrica promedio del cultivo es de 44 cm.

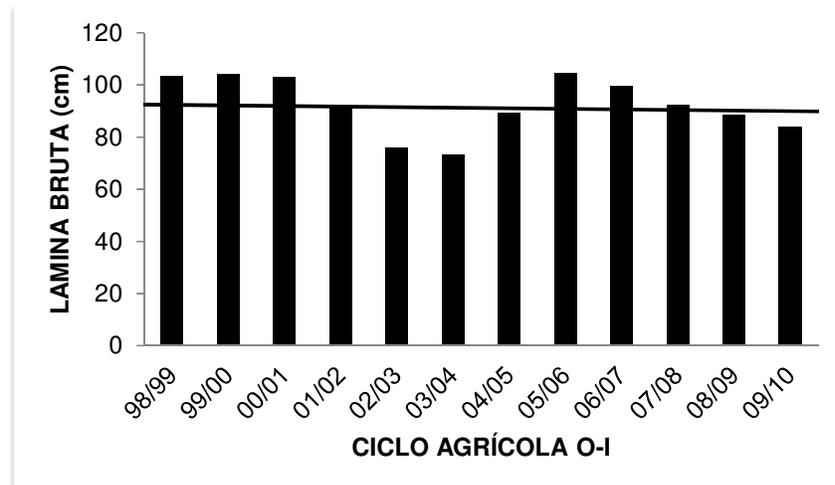


Figura 1. Lamina aplicada a nivel parcelario en el módulo Santa Rosa.

La distribución del agua en distritos de riego en México inicia con la integración de la petición del agua a través de una solicitud del productor al canalero, para cada bloque las solicitudes se ordenan al fin de cada semana por zona, el modulo de riego obteniendo el total de zonas realiza la petición a la red mayor, quien a su vez realiza la solicitud del agua a la comisión nacional del agua. El calendario de entrega de agua es posteriormente preparado para cada nivel operativo siguiendo un esquema que va en orden jerárquico desde la fuente (presa), distrito de riego, la red mayor hasta la entrega final en la parcela como se ve en la Figura 2.

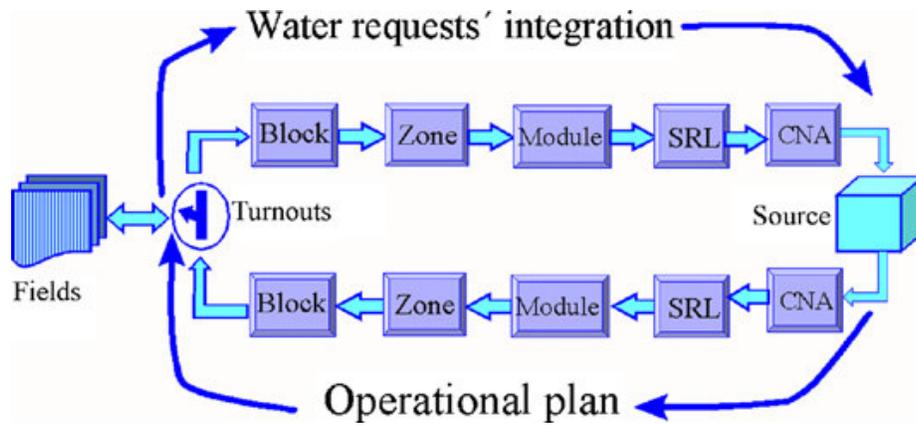


Figura 2. Diagrama de flujo para la generación del suministro de agua en el DR075 (Ojeda *et al.*, 2007).

2.2 El cultivo de maíz en México

2.2.1 Importancia actual económica y social

La mayor parte de la producción mundial de maíz se utiliza como alimento para animales o como materia prima industrial y sólo aproximadamente el 20% se destina al consumo humano. En México el patrón de consumo difiere al de los países industrializados ya que 68% del maíz se utiliza directamente para la alimentación humana con un consumo *per cápita* de 127 kg año⁻¹ (Nadal y Wise, 2005).

En el 2010 se produjeron 840.3 millones de toneladas de maíz en el mundo. En la Figura 3 se muestran los 10 países principales productores de maíz, entre los que destaca México ocupando el cuarto lugar (FAOSTAT, 2010).

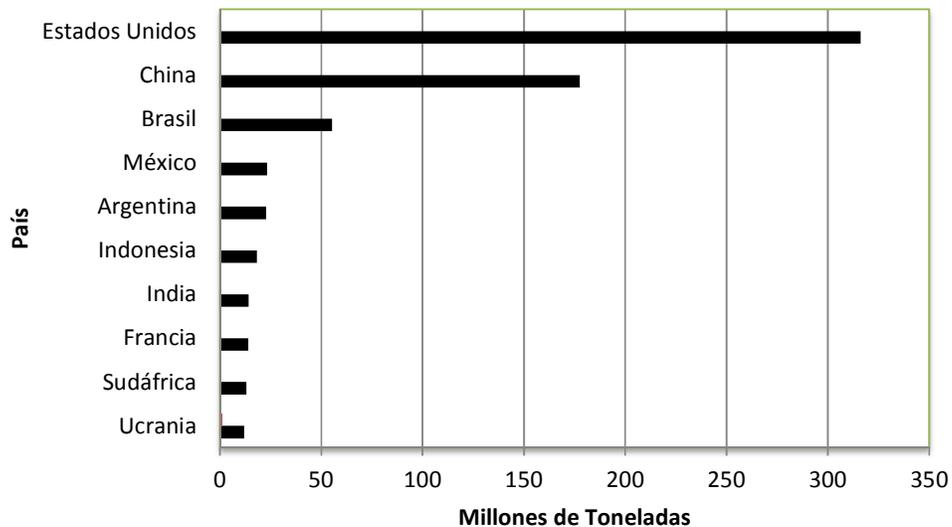


Figura 3. Productores de maíz (FAO, 2010).

En México este cultivo es de vital importancia debido a que desde hace siglos es el alimento básico de la población y representa la principal fuente de energía para quienes tienen menos posibilidades económicas, toda vez que la tortilla es la base de su alimentación. Por otra parte, en los últimos 20 años la demanda de maíz para la alimentación del ganado y para su uso industrial ha crecido en forma exponencial, constituyendo una competencia con el uso alimenticio.

Como se mencionó anteriormente, la demanda de maíz ha registrado un incremento continuo, además, en años recientes su crecimiento ha sido brusco debido a que el principal productor de maíz, los Estados Unidos de América. Lo utiliza para la producción de etanol con el objeto de reducir el consumo de combustibles fósiles que generan bióxido de carbono al quemarse en los motores de combustión interna, contribuyendo al calentamiento global (Palacios, 2010).

El maíz es un cultivo muy sensible al déficit hídrico; como se ha visto, el riego puede más que triplicar el rendimiento del cultivo con respecto al que se logra en temporal ; sin embargo, es muy importante que la aplicación de los riegos se

realice conforme al consumo de agua de la planta, según el proceso evapotranspirativo. Para un buen riego requiere que la distribución del agua en los surcos sea uniforme; el uso de sifones o tuberías de compuertas, permite una distribución adecuada del agua. En Sinaloa ya se utiliza el riego mediante aspersión, con cañones, mediante pivote central o avance frontal, lo que genera excelentes resultados y rendimientos de hasta 12 t ha⁻¹ (Palacios, 2010).

2.2.2 Manejo y sistemas de producción

El Cuadro 1 muestra las diferentes fechas de siembra para el ciclo otoño-invierno sobre el módulo de riego Santa Rosa (Iñiguez *et al.*, 2012).

Cuadro 1. Fechas de siembras cultivos de maíz para el módulo de riego Santa Rosa del DR-075 (Iñiguez *et al.*, 2012).

Fecha siembra	Día juliano	Número siembra	ET _c acumulado	Superficie por fecha	Factor ponderación	ET _c ponderada
07/10/2004	280	1	42.31	141.94	0.0130	0.55
17/10/2004	290	2	46.09	393.06	0.0360	1.66
27/10/2004	300	3	49.13	535.00	0.0490	2.41
06/11/2004	310	4	50.60	1,484.90	0.1360	6.88
16/11/2004	320	5	51.16	3,450.20	0.3160	16.17
26/11/2004	330	6	51.21	1,703.26	0.1560	7.99
06/12/2004	340	7	51.05	1,233.77	0.1130	5.77
16/12/2004	350	8	50.62	1,135.51	0.1040	5.26
26/12/2004	360	9	50.04	840.71	0.0770	3.85
			Total	10,918.36 ha	1.0000	50.54 cm

2.2.3 Rendimiento y comercialización

En Sinaloa se sembraron 471,247 ha produciendo 4,954,988.51 t durante el ciclo otoño-invierno. Obteniendo un rendimiento de producción de 10.52 t ha⁻¹ (SIAP, 2013). Sin embargo esto no fue siempre así hasta 1990 en promedio poco menos de 100 000 ha y cerca de 200,000 ha de trigo, entre 1991 y 1993, dicha relación se invirtió y comienza a cultivarse cerca de 250,000 ha de maíz y poco más de 120,000 ha de trigo.

En el distrito de riego 075 durante el ciclo otoño-invierno año 2007-2008 se sembraron 121,843 ha de maíz de un total 273,988 ha en las cuales el

rendimiento de producción fue de 10.19 t ha⁻¹ con una producción global de 1,242,142 t (Conagua, 2009).

La superficie sembrada y el rendimiento del maíz en Sinaloa de los últimos 20 años. En los cuales se muestra una tendencia que aumenta con el paso de los años, tanto en la cantidad de hectáreas sembradas como en el rendimiento de grano. Como se observa en la Figura 4.

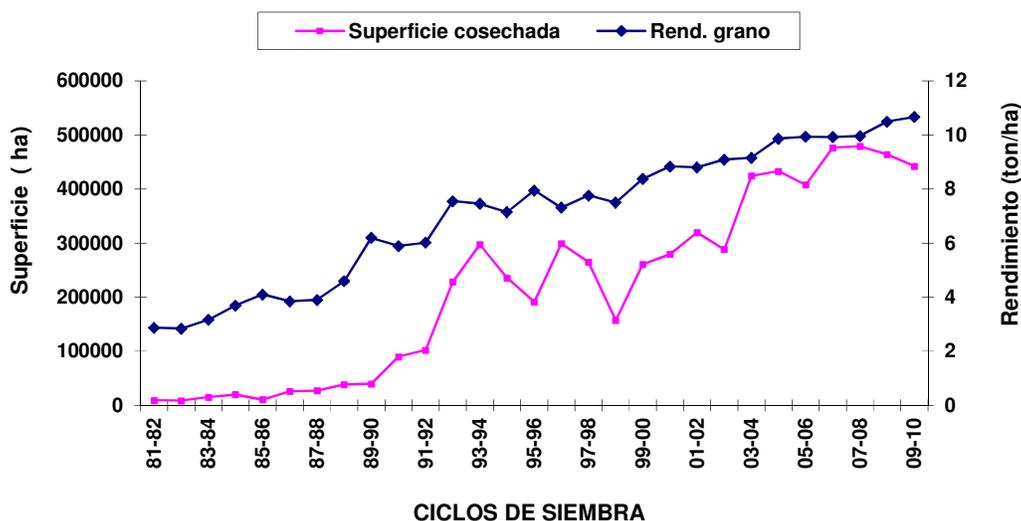


Figura 4. Serie histórica del maíz en Sinaloa.

2.3 Requerimientos agroecológicos

2.3.1 Clima

El cultivo de maíz se desarrolla con un fotoperiodo de 10 horas en promedio; la altitud: 0-3300 msnm; una precipitación: 500-800 mm; humedad ambiental: moderadamente húmeda; temperatura: 15-28 °C; luz: alta insolación; textura: suelos franco-arcillosos y franco-limosos, arenoso; profundidad: 0.8-1 m; salinidad: menor a 7 dS m⁻¹; pH: 5.5 a 7.5; Drenaje: requiere buen drenaje.

2.3.2 Agua

Doorembos y Kassam (1986) reportaron que el cultivo de maíz, dependiendo de las condiciones climáticas, y sin considerar otros factores de producción, requiere a lo largo de su ciclo de 500-800 mm de agua bien distribuida de acuerdo con sus fases fenológicas. Las fases de floración y llenado de grano son las más críticas para obtener la máxima producción.

Aceves *et al* (2008) mencionan que en el maíz la disponibilidad de agua en el momento oportuno, es el factor ambiental mas critico para determinar el rendimiento. El periodo con mayor exigencia de agua, es el que va desde 15 días antes de la floración hasta 30 días después.

Ojeda *et al* (2006) Determinaron que para el norte de Sinaloa se cálculo un consumo de agua para maíz de 440 mm.

2.4 Calendarización del riego

2.4.1 Importancia del riego en la producción del maíz

La agricultura es el mayor usuario de agua en las áreas de desarrollo y por consiguiente enfrenta el reto de utilizar este recurso en forma eficiente para competir en los otros sectores. La agricultura bajo riego en nuestro país se encuentra en transición pasado de la fase de expansión a la fase de maduración donde la optimización de los insumos agrícolas como el agua es de suma importancia ante su limitada, costosa e incierta disponibilidad.

2.4.2 El suelo y su relación con la programación del riego

2.4.2.1 Capacidad de campo

El contenido de humedad que existe en un suelo después de la eliminación del agua gravitacional se denomina capacidad de campo, este concepto es de gran

utilidad para la estimación de la cantidad de agua, contenida en el suelo de que puede disponer la planta Israelsen-Hasen (1965).

2.4.2.2 Punto de marchitez permanente

Es el contenido de humedad de los suelos cuando las plantas se marchitan permanentemente y corresponde al límite inferior de la humedad aprovechable por los vegetales. Una planta se marchitará cuando no sea capaz de seguir obteniendo humedad suficiente para hacer frente a sus necesidades hídricas (Israelsen-Hansen, 1965).

2.4.2.3 Humedad aprovechable

Como la capacidad de campo es la cantidad máxima de agua que un suelo bien drenado puede retener, y como el porcentaje de marchitamiento permanente, representa aproximadamente el límite inferior al que se reduce la humedad con los cultivos, la variación de agua aprovechable en un suelo queda comprendida dentro de estos dos límites (Thorne y Peterson 1985).

2.4.2.4 Variación del agua en el suelo

Para muchos suelos, la capacidad de agua aprovechable aumenta al hacerse más fina su textura. Puede haber muchas excepciones, sin embargo, a esta generalización. Veihmeyer y Hendrickson (1931) encontró en un estudio de 60 suelos de California, que algunos suelos más bien arenosos retenían en realidad más agua aprovechable que algunas arcillas. Esto se debía a que los suelos de textura fina contienen una cantidad apreciable de agua en el porcentaje de marchitamiento (Thorne y Peterson 1985).

2.4.3 Características del cultivo asociados al riego

2.4.3.1 Fenología

Ritchie *et al.* (1992) dividieron el desarrollo del cultivo en las etapas vegetativa (V) y reproductiva (R), las cuales a su vez las subdividieron en diferentes fases, como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Caracterización fenológica del cultivo de maíz de acuerdo a Ritchie *et al.* (1992).

Etapa	Fase	Clave
Vegetativa	Emergencia	VE
	Aparición de hojas verdaderas	V1...Vn
	Flor masculina o espiga	VT
Reproductiva	Flor femenina o Jilote	R1
	Grano acuoso	R2
	Grano lechoso	R3
	Grano masoso	R4
	Grano dentado	R5
	Madurez fisiológica	R6

En la zona norte de Sinaloa el comportamiento fenológico del maíz, otoño-invierno, para una variedad típica de ciclo intermedio, se muestra en la Figura 5.

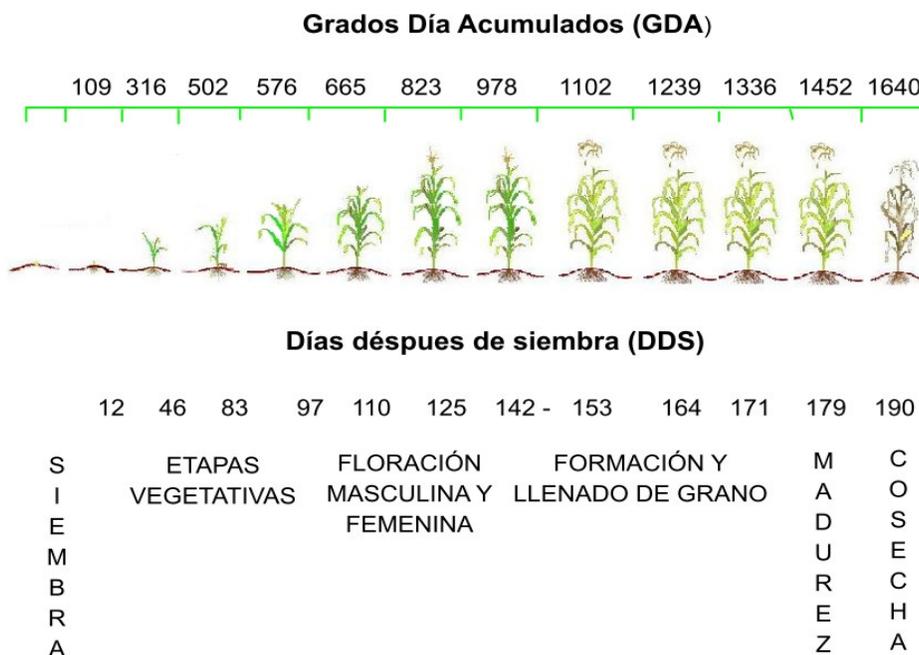


Figura 5. Fenología del cultivo de maíz en el norte de Sinaloa adaptado de (Ojeda et al., 2006).

2.4.3.2 Profundidad de raíz

Las raíces crecen con un patrón definido como resultado de sus características genéticas pero pueden ser modificadas por las condiciones del medio ambiente. La profundidad del suelo de la que el cultivo extrae agua corresponde a la profundidad efectiva de sus raíces para un cultivo dado. Esta profundidad varía con la etapa de desarrollo. Las raíces no extraen el agua uniformemente del perfil de suelo explorado. En un suelo uniforme los patrones de extracción de humedad varían de acuerdo con el cultivo y las condiciones de humedad del suelo. La profundidad de raíz en función del tiempo también es un aspecto importante ya que conforme aumenta su profundidad también aumenta el perfil del suelo que hay que humedecer (Allen et al., 1998).

2.4.3.3 Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo (K_c) es el coeficiente entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración de cultivo de referencia (ET_o). Representa el efecto integrado de un cultivo en particular con relación al cultivo del pasto de referencia y son: altura del cultivo, albedo (reflectancia) de la superficie del cultivo y suelo, resistencia del cultivo y evaporación que ocurre en el suelo. Además el K_c describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se desarrollan desde la siembra hasta la cosecha. El K_c al inicio es pequeño y aumenta a medida que la planta cubre el suelo. Los valores máximos del K_c se alcanzan en la floración, se mantienen durante la fase media y finalmente decrece durante la fase de maduración. Los principales factores que determinan el K_c son el clima, suelo y tipo de cultivo por lo que se puede mencionar que el valor K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo y varía sólo en una pequeña porción en función del clima (Allen *et al.*, 1998).

Otro periodo importante en el crecimiento y desarrollo del maíz es el tiempo de la siembra a la iniciación de la espiga y la antesis; en las cuales la temperatura puede afectar de tres maneras; a) las temperaturas frías afectan la duración del periodo de la siembra a la floración, efecto conocido como vernalización b) debido a las amplias temperaturas, el índice de progreso hacia la floración se incrementa con el aumento de la temperatura óptima donde la floración es más rápida y c) existe un umbral en el cual la floración se retrasa progresivamente a temperaturas más cálidas (Summerfield *et al.*, 1991). La emisión de los estigmas puede retratarse por temperaturas muy altas (Hunter *et al.*, 1974), o bajas (Wilson *et al.*, 1995). Warrington y Kanemasu (1983) han encontrado que la iniciación floral en

maíz es rápida (17 días o menos) con temperaturas cálidas (> 23°C) mientras que a temperaturas bajas (< 15°C) las plantas tardan 40 días.

Crasta y Cox (1996), afirman que temperaturas menores de 14°C reducen la acumulación de materia seca en maíz durante el intervalo de crecimiento comprendido entre la emergencia y la octava hoja. Cuando las temperaturas varían de 15 a 30°C el índice de aparición foliar se incrementa aproximadamente al doble, por lo que se aumenta el promedio en el número de hojas con el rango de temperatura diaria (Coligado y Brown, 1975).

2.4.3.4 Evapotranspiración ET_C

La cantidad de agua removida desde el suelo y la planta se denomina evapotranspiración. Esta agua, debe reponerse periódicamente al suelo para no dañar el potencial productivo de la planta. Diversas metodologías se han propuesto para su determinación, debiendo considerarse siempre que la evapotranspiración depende, entre otros aspectos, de las condiciones climáticas, tipo y estado de desarrollo del cultivo, y de la disponibilidad de agua del suelo.

La evapotranspiración del cultivo (ET_C) puede determinarse a partir de la evapotranspiración potencial, ET_P (o evapotranspiración del cultivo de referencia), según la expresión:

$$ET_C = ET_P * K_C$$

en donde K_C es un coeficiente de cultivo adimensional que varía con el cultivo y su desarrollo vegetativo. Las unidades comunes de medida de ET_C y ET_P suelen ser mm/día, mm/mes o mm/temporada.

2.4.4 Métodos programación del riego

2.4.4.1 El suelo como indicador

Esta metodología considera la determinación del contenido actual de humedad o agua del suelo, comparándolo con un valor predeterminado mínimo de contenido de humedad, regando cada vez que se alcance dicho valor. El contenido mínimo de humedad varía, con el estado fenológico del cultivo y sensibilidad a déficit hídrico de la planta.

El contenido de humedad del suelo puede medirse o estimarse directamente, o bien inferirse a partir de otros parámetros del suelo. El Cuadro 3 señala las ventajas y desventajas de estos indicadores.

Cuadro 3. Indicadores del suelo de cuándo regar (James, 1988).

Parámetro observado o medido	Instrumento o procedimiento	ventajas	Desventajas
Apariencia y tacto	Visual	Simple	Demandante de tiempo aproximado, requiere entrenamiento para adquirir habilidades interpretativas
Gravimetría	Barreno, cápsulas, balanza y horno	Simple y exacto	Destructivo; no instantáneo dado los requerimientos de secado de la muestra
Resistencia eléctrica	Block de yeso	Da lecturas indirectas del contenido de agua del suelo	Calibración individual de cada block de yeso. Requiere instalación cuidadosa en terreno y numerosas repeticiones. Baja

			durabilidad (1-2 años). No adecuado en el suelos de textura gruesa
Potencial matricial de agua en el suelo	Tensiómetro	Permite medir dirección del movimiento del agua en el suelo, e indirectamente, el contenido de humedad de él	Requiere mantenimiento, instalación cuidadosa y numerosas repeticiones. Lecturas frecuentes
Dispersión de neutrones	Neutrómetro y tubos de acceso	Permite sucesivas mediciones en el mismo punto; rápido y exacto	Equipo de alto costo que requiere calibración y precauciones especiales en su manejo y almacenamiento; calibración afectada por cambios en materia orgánica
Propiedades dieléctricas	TDR	No destructivo, rápido y exacto sin riesgo de radiaciones	Alto costo, limitada resolución especial. No apto en suelos rocosos o pedregosos

2.4.4.2 La planta como indicador

Dado que el objetivo de riego es reestablecer el agua de la planta, el método más directo de cuándo regar es monitorear la planta directamente. Diferentes técnicas y procedimientos pueden utilizarse, señalándose en el Cuadro 4 sus ventajas y desventajas.

Cuadro 4. Indicadores de la planta cuándo regar (James, 1988).

Parámetro observado o medio	Instrumental o procedimiento	Ventajas	Desventajas
Apariencia	Visual	Simplicidad	La detección temprana en cambios de color y otros cambios requieren experiencia. Aún así, los rendimientos ya han sido afectados
Temperatura de la hoja	Termometría infrarroja	Mediciones a distancia	Metodología de aplicación bien desarrollada. Problemas de sensibilidad en climas húmedos
Potencial del agua en la hoja	Cámara de presión, psicómetro de termocupla	Grado de deshidratación; integral el efecto del ambiente en la planta; lecturas se correlacionan con los procesos metabólicos; indicador del flujo del agua	Grandes variaciones durante el día; demandante de tiempo; requiere personal calificado; destructivo
Resistencia estomática	Porómetro de difusión	Mide resistencia de la hoja a la	Semejante a potencial de agua en la hoja

		pérdida de vapor de agua	
--	--	--------------------------	--

2.4.4.3 Balance hídrico

Está basada en aspectos meteorológicos del suelo y de la planta. Tres aspectos deben considerarse previamente. El primero, consiste en determinar un criterio de riego (CR) el cual señala el porcentaje tolerable de disminución del agua aprovechable del suelo (HA). En general, se sugiere un valor de cincuenta por ciento ($CR = 0.5$) asignándose valores de CR del 30% ($CR = 0.3$) para cultivos sensibles a un déficit de agua y valores de $CR = 0.6$ para cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico Cuadro 5.

El segundo aspecto tiene que ver con la profundidad de raíces del cultivo Cuadro 6. En cultivos anuales, dicha profundidad cambia rápidamente con el tiempo, a partir, de emergencia a madurez fisiológica. Por tanto, una adecuada programación del riego, requiere el conocimiento de la profundidad efectiva de raíces en cada período de tiempo analizada. Así, este valor determinará la profundidad P del suelo desde donde se extrae agua. En otras palabras, si el suelo tiene 1.80 m de profundidad, pero el cultivo está en una etapa temprana de desarrollo (30 cm de profundidad de raíces, por ejemplo), el valor P a considerar debe ser de 30 cm.

Similar criterio debe mantenerse para especies frutícolas, antes que alcancen un desarrollo completo de plena producción.

En general, se establece que la planta alcanza el 90% de su profundidad radical efectiva, cuando su desarrollo fenológico corresponde al 50%.

Cuadro 5. Criterios de riego (CR) y profundidad radical efectiva para diferentes cultivos (Jara *et al.*, 2007).

Cultivo		CR
	Prof. efectiva (cm)	
Ají	0.5	60
Ajo	0.5	60
Alcachofa	0.50	100
Alfalfa	0.65	180
Arveja	0.6	60
Brócoli	0.5	60
Cebolla	0.50	60
Coliflor	0.5	60
Damascos	0.65	180
Duraznos	0.65	180
Espárragos	0.5	180
Empastadas	0.65	60
Fréjol	0.50	90
Frutilla	0.5	60
Habas	0.6	80
Lechugas	0.40	60
Maíz	0.65	120
Manzanos	0.65	180
Melón	0.5	90
Menta	0.35	60
Papas	0.30	60
Perales y ciruelos	0.65	180
Pimiento	0.5	60
Repollo	0.5	60
Sandía	0.5	120
Trigo invierno	0.65	100
Trigo primavera	0.65	90
Vid	0.65	180
Zanahoria	0.5	90

El tercer aspecto, se refiere al conocimiento de la cantidad de agua que el cultivo y el ambiente extraen desde el suelo (Evapotranspiración del cultivo, ET_c). Esta cambia con la edad del cultivo, clima y ubicación geográfica. Por tanto, debe recurrirse a una fuente de información o metodología confiable de cálculo que considere los aspectos reseñados.

De este modo, la frecuencia de riego (FR) o cada cuántos días debiera regarse nuevamente para no perjudicar el rendimiento del cultivo, se determinará por:

$$FR = \frac{HA * CR}{ET_c}$$

2.4.4.4 Sistemas de gestión del riego

Para lograr un riego de alta eficiencia se requiere primeramente conocer las necesidades hídricas de los cultivos y mejorar la aplicación del agua en las parcelas, entre los paquetes computacionales comerciales usados para estimar el requerimiento de riego se encuentran: CROPWAT desarrollado por la FAO (Allen *et al.*, 1998), y SPRITER (Ojeda *et al.*, 2004). La distribución del riego en la parcela demanda analizar diferentes escenarios de manejo bajo condiciones iniciales y de frontera, para ello en la actualidad existen programas como el SIRMOD, el WINSRFR y RIGRAV entre otros.

2.5 Eficiencias del riego

2.5.1 Eficiencia de aplicación

Israelsen y Hansen (1962) consideran para fines de evaluación, la eficiencia de aplicación como; la relación entre el requerimiento de riego de los cultivos y el agua servida a la parcela.

$$\text{Eficiencia de aplicación} = \frac{\text{Volumen requerido de riego por el cultivo (m}^3\text{)}}{\text{Volumen entregado en la parcela (m}^3\text{)}}$$

2.5.2 Eficiencia de uniformidad

El Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC) señala cuán homogéneo es la aplicación del agua por el sistema de riego. Quiñones (2004) menciona que es un indicador que deja ver que tan uniforme se distribuye el agua en la superficie regada; y es la relación entre la desviación de la altura del agua infiltrada en el punto, respecto a la altura promedio de agua infiltrada.

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n L_m} \right]$$

2.5.3 Eficiencia de conducción

La eficiencia de conducción es la relación entre el volumen de agua que se entrega a las parcelas para riego y el volumen que se extrae de la fuente de abastecimiento (presa). En los distritos de riego del país la eficiencia de conducción promedio es del orden de 60% Palacios (1994).

$$\text{Eficiencia de conducción} = \frac{\text{Volumen entregado a las parcelas (Mm}^3\text{)}}{\text{Volumen extraído de la presa (Mm}^3\text{)}}$$

2.5.4 Eficiencia global

Según Palacios (1990) la eficiencia global es la relación entre el volumen de agua utilizada con un fin determinado y el volumen extraído o derivado de una fuente de abastecimiento con ese mismo fin.

$$\text{Eficiencia global} = \frac{\text{Volumen Utilizado (m}^3\text{)}}{\text{Volumen extraído (m}^3\text{)}}$$

2.6 El diseño del riego por gravedad

2.6.1 Elementos de diseño

El diseño de riego por gravedad consiste en la selección de la longitud, el espaciamiento entre surcos, la pendiente longitudinal, así como la dirección y el gasto de riego, que permitan distribuir uniformemente la lámina de riego previamente calculada.

2.6.2 Movimiento del agua en el suelo

El movimiento cíclico del agua en el suelo comienza con su entrada en el perfil a través del proceso de infiltración, continúa con su almacenamiento temporario en la zona de enraizamiento y termina con su remoción del suelo por el drenaje, la evaporación o absorción por la planta. Este ciclo consiste en un número apreciable de procesos de diferentes, que pueden ocurrir en forma simultánea e interdependiente. La infiltración o entrada del agua en el suelo ocurre generalmente en la superficial y tiene dirección vertical hacia abajo. El agua puede entrar a través de toda la superficie, en forma uniforme o puede penetrar a través de surcos e incluso puede moverse hacia arriba en el perfil del suelo, desde una fuente inferior, como en el caso de un manto freático (Gurovich, 1985).

2.6.3 Modelos para diseño de riego por surcos

Desde finales de 1970, el Servicio de Investigación Agrícola del United States Department of Agriculture (USDA) ha estado involucrado en el desarrollo de modelos de simulación hidráulica y software como herramientas para el análisis de sistemas de riego por superficie. Los principales resultados de este desarrollo son la creación del programa de SRFR (Strelkoff et al., 1998). Una nueva generación del software de riego superficial llamado WinSRFR ha estado en desarrollo desde 2004. Teniendo como resultado el desarrollo de una herramienta

para la realización de análisis prácticos sobre diferentes tipos de sistemas de riego superficial. Las principales funciones del programa son: Análisis de eventos, Análisis de la operación, diseño físico, y la simulación según Bautista (2009).

WinSRFR proporciona tres evaluaciones de procedimientos: (a) un post-irrigación: que son las características de retención de agua del perfil del suelo sondeado y estimaciones de contenido de agua del suelo, (b) un volumen post-riego basado en la anticipación y las mediciones de la recesión (Merriam y Keller) y por último la fase de avance, que consiste en el balance de volumen basado en la ecuación de Elliott y el método de Walker de dos puntos (Elliot y Walker) según Bautista (2009).

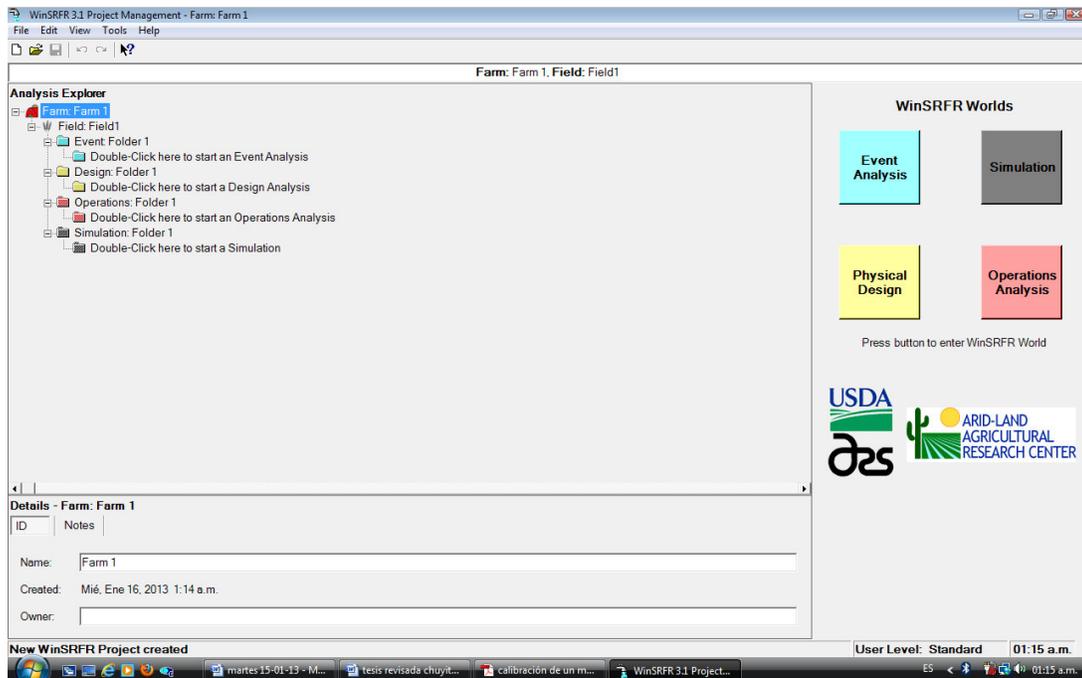


Figura 6. Pantalla principal del WinSRFR 3.2.

La irrigation Software Division de Utah State University produjo el modelo SIRMOD, que simula un gran número de situaciones asociadas con el riego superficial. El modelo SIRMOD simula el riego por gravedad (en la frontera, la

cuenca y surco) a nivel de campo. La rutina de simulación utilizada en SIRMOD se basa en la solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant para conservación de la masa y la conservación de la cantidad de movimiento Walker y Skogerboe (1987). Los insumos necesarios del modelo para simular un evento de riego incluyen: la infiltración, rugosidad hidráulica (n de Manning), geometría de surco, pendiente de surco, longitud del surco, flujo de entrada y el avance en tiempo.

La infiltración de un surco se representada con la ecuación de Kostiakov-Lewis que es dada por: $Z = kt^a + f_0t$ (1) donde Z es la infiltración acumulada (m^3 / m surco); t es el tiempo (min) que el agua está disponible para la infiltración. K es el parámetro de ajuste. Y f_0 ($m^3/min/m$ surco). El resto de los parámetros de entrada: la geometría, la pendiente y longitud del surco pueden medirse fácilmente y el Coeficiente de Manning. La salida del modelo incluye el avance y las características de la recesión, la distribución final de agua infiltrada y los parámetros relacionados con el agua de aplicaciones, almacenamiento, eficiencia y la escorrentía hidrogramas según Walker y Skogerboe (1987).

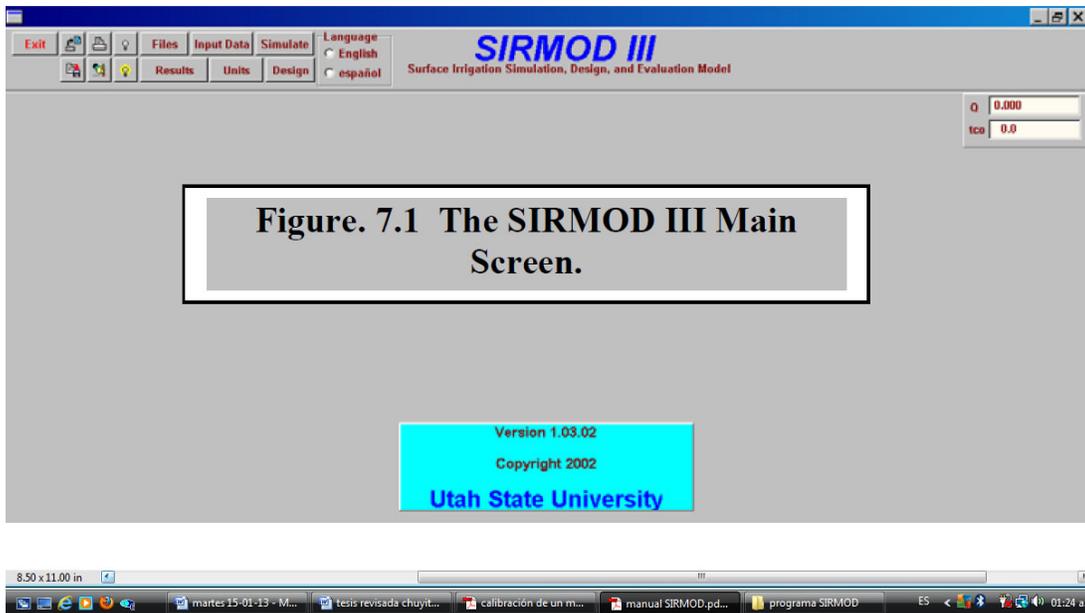


Figura 7. Pantalla principal del programa SIRMOD.

Modelo RIGRAV

Algunos autores han propuesto simplificaciones a las ecuaciones de Barré de Saint-Venant y de Richard, para presentar de manera integral la ecuación de conservación de la masa, como la siguiente:

$$Q_r t = \int_0^s A_h(x, t) dx + \int_0^s A_l(x, \tau) dx$$

Donde S es la posición del frente de avance en el tiempo t , x es la distancia a lo largo de la melga o del surco medida a partir de la cabecera aguas arriba, A_h es el área hidráulica de la sección transversal del escurrimiento superficial y A_l es el área de la sección transversal del escurrimiento subterráneo. El tiempo de infiltración τ , se define como $\tau = t - t_x$ y corresponde al tiempo que tarda el frente de avance en llegar al punto situado a la distancia x .

Rendón *et al.* (1995) desarrollaron un programa de cómputo (RIGRAV) que resuelve numéricamente la ecuación anterior con algunas modificaciones. Para utilizarlo se requiere conocer el coeficiente de rugosidad y la pendiente

longitudinal así como la función de infiltración de Green y Ampt (1911). El coeficiente de rugosidad varía entre 0.02 y 0.04 para un suelo sin cultivo (Chow, 1973).

El RIGRAV es un software utilizado para simular el riego por gravedad y su función es modelar la duración del tiempo de riego (TR), Gasto de riego unitario (q_u) coeficiente de uniformidad, lámina bruta, eficiencia de aplicación (E_a); considerando las propiedades físicas del suelo tales como humedad a saturación (θ_s); humedad a saturación inicial (θ_o); conductividad hidráulica a saturación (K_s) y función de infiltración (Hf) en las diferentes técnicas de riego superficial. Seleccionando el valor de la pendiente natural del terreno y la longitud del riego.

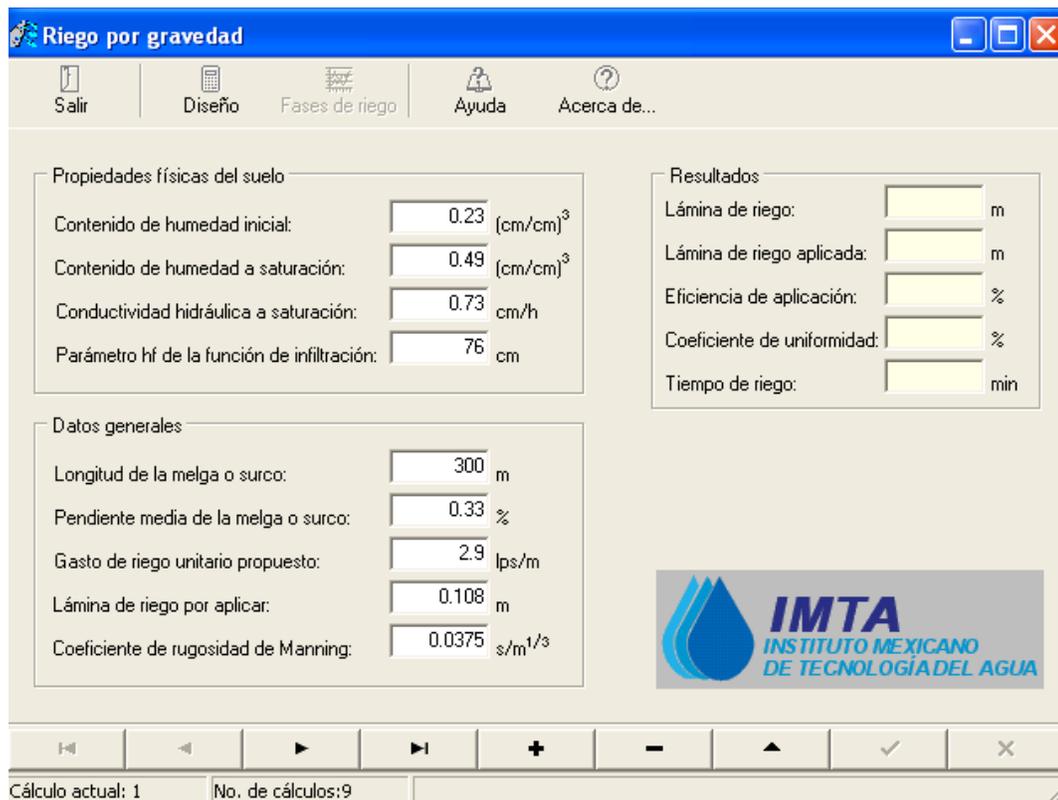


Figura 8. Pantalla principal del programa RIGRAV.

2.7 Técnicas parcelarias de riego por superficie de alta eficiencia

Las siembras en camas se han utilizado en trigo con éxito; por ejemplo, en China hubo ahorro del agua y un aumento en la eficiencia del uso del agua en comparación con el sistema convencional (Fahong *et al.*, 2004). Fischbach y Mulliner (1974) mencionan que el riego en surcos alternos en el cultivo de maíz produjo rendimientos similares al método tradicional al aplicarlo en varios tipos de suelo en el este de Nebraska. Musick y Dusek (1975), encontraron que al regar surcos alternos la eficiencia de aplicación de agua fue mayor en longitudes de surcos superiores a 370 m, pues a mayor movimiento lateral hay una mayor uniformidad en la aplicación al hacer más lento el avance del agua en el surco. Hanson (1989) en un estudio realizado en el Valle de San Joaquín, California, demostró que el riego intermitente requiere casi 33% menos agua para llegar la final del surco que el riego tradicional, pues se reduce 30% del volumen desperdiciado por escorrentía. En Gansu, China se ha utilizado el sistema de surco alterno en el cultivo del maíz para aumentar la eficiencia de uso del agua en zonas áridas (Shaozhong *et al.*, 2000). En el oeste de Estados Unidos se identificaron oportunidades para mejorar la productividad del agua y gestión del riego con la técnica de riego deficitario controlado (Grassini *et al.*, 2011).

Goldhamer *et al.* (1987) compararon el método tradicional y riego intermitente en los condados de Kern y Fresno California, EE.UU. en suelos arcillosos, durante el riego de presembrado y el primer riego de auxilio, cuando las tasas de infiltración son altas. Ellos encontraron que en la fase de avance fue mayor el tiempo requerido en el tradicional (868 minutos) que en intermitente (492 minutos) para lograr llegar al final de surco de una longitud de 366 metros. También encontraron

una mejor distribución de humedad y los volúmenes de escurrimiento se redujeron al mejorar la eficiencia de aplicación.

El método de riego con reducción de gasto ha mostrado ser una técnica mejor que el método tradicional ya que permite disminuir las pérdidas de agua por escorrentía y percolación al final y principio del surco respectivamente, aumentando la eficiencia de aplicación y productividad del agua (Gurovich, 1999).

2.7.1 Técnicas de riego por surcos

2.7.1.1 Riego en surco alterno

Consiste en regar un surco y el adyacente no, lo cual reduce el consumo de agua sin afectar la producción del cultivo (Graterol *et al.*, 1993; Kang *et al.*, 2000; Webber *et al.*, 2006; Horst *et al.*, 2005, 2007). El agua se aplica y se deja un surco sin regar durante el primer riego, en el segundo riego el agua se aplica en el surco no regado, para el tercer y cuarto riego se hace lo mismo. Alternando el riego en los surcos (Sifuentes y Macías, 2003).



Figura 9. Aplicación surcos alternos.

2.7.1.2 Riego en camas

Surcos pequeños para facilitar el avance en Sinaloa, consiste en un bordo de 1.6 m de ancho y 0.20 m de alto y una separación entre camas de 0.15 m (formando un surco) que permite un rápido mojado horizontal (Sifuentes, 2003).



Figura 10. Elaboración de camas.

2.7.1.3 Riego por reducción de gasto

En esta técnica el agua suministrada se reduce paso a paso de tal manera que se eliminan las pérdidas por escorrentía al final del surco y las pérdidas por percolación en el inicio del surco se mantienen al mínimo (Lal y Pandya, 1970).



Figura 11. Aplicación reducción de gasto.

2.7.1.4 Riego intermitente

Es la aplicación intermitente del agua de riego a surcos o melgas con una serie de periodos en diferentes fases de duración constante o variable (Utah Agricultural Experiment Station, 1988). Este trabajo consiste en intermitencias realizadas de forma manual, con el uso de los sifones.



Figura 12. Aplicación de la intermitencia.

2.7.1.5 Riego deficitario controlado

Consiste en reducir los aportes hídricos en los periodos fenológicos en los que el estrés hídrico no afecta significativamente a la producción y calidad de la cosecha y cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo del cultivo (Mitchel *et al.*, 1984).



Figura 13. Aplicación del riego deficitario.

2.8 El sistema IrriModel

Sistema inteligente para programación de riego bajo condiciones variables de clima, para diferentes condiciones de disponibilidad de agua y manejo. Pronostica el riego con alto nivel de precisión en base al concepto grados día (GD). Con aplicación a nivel del productor y de zonas de riego.

El principal objetivo de este programa es generar automáticamente y en tiempo real los programas de riego de acuerdo a la fenología del cultivo y balance hídrico usando el concepto de días grado de crecimiento. Ojeda y colaboradores (2006) generaron en el Valle del Fuerte los parámetros de programación integral para el cultivo de maíz: coeficiente del cultivo (K_c), profundidad dinámica de la raíz (P_r) y factor de abatimiento (F).

2.8.1 Descripción y operación del IrriModel

Dentro de las principales capacidades que ofrece IrriModel a los usuarios se encuentran las siguientes:

- Enlazarse en tiempo real a redes de estaciones climáticas automatizadas

- Procesar bases de datos de suelo, clima, riego, cultivos y métodos de programación integral del riego.
- Transferir información técnica relacionada con riego y agrometeorología.
- Plan de riegos que despliega todos los riegos recomendados para una siembra específica, calculados con datos climáticos históricos.
- Pronóstico de la fecha del próximo riego de cada parcela, así como los tiempos de cada riego de acuerdo al gasto (litros por segundo) de la parcela, las cuales pueden ser enviadas al módulo de riego correspondiente como solicitud de riego.
- Autorización del módulo de riego, a través de las cuales el productor puede consultar las solicitudes de riego que le fueron autorizados por el módulo.
- Seguridad, que ayuda a controlar los accesos.
- Reportes como un conjunto de informes con consultas especiales de los datos climáticos que pueden ser exportados al paquete computacional Excel.

Proceso de programación integral y gestión del riego en tiempo real

Para lograr el proceso de programación integral y gestión del riego en tiempo real a través de internet, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) han integrado la infraestructura necesaria para tal propósito. Cuenta con un servidor y sitio web exclusivos, base de datos y desarrollo del software especializado IrriModel.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción de la zona de estudio

El trabajo se desarrolló en el Distrito de Riego 075 localizado en la zona norte del estado de Sinaloa; colindando al norte con la Sierra Madre Occidental, al sur con el Mar de Cortés, al oeste con el Distrito 076 (Valle del Carrizo) y al este con el Distrito 063 (Guasave). La precipitación anual fluctúa de 200 a 350 mm concentrada en los meses de julio a octubre. Los valores anuales acumulados de la evapotranspiración de referencia (ET_o) varían de 1600 a 1700 mm, que son muy superiores a la precipitación acumulada anual. Los suelos del Valle del Fuerte tienen una textura predominantemente franco arcillosa (50% arcilla, 30% limo y 20% arena), bajos en materia orgánica (menos del 1%) y densidad aparente de 1.15 g cm^{-3} (Ojeda *et al.*, 2006).

Sinaloa presenta un gradiente topográfico de la costa hacia los límites montañosos con los estados de Durango y Chihuahua. Presenta una amplia planicie costera donde se desarrolla la actividad agrícola, principalmente de riego, que se eleva rápidamente en la medida en que avanza hacia el oriente, iniciando pronto las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, con elevaciones de menos de 3000 msnm en los límites con los estados de Durango y Chihuahua, aunque sin alcanzar el parteaguas de las cuencas de los ríos que fluyen hacia el estado de Sinaloa, dichos parteaguas se ubican en los estados vecinos de Chihuahua y Durango. La Figura 14 presenta la variación de la altitud topográfica para el estado de Sinaloa.

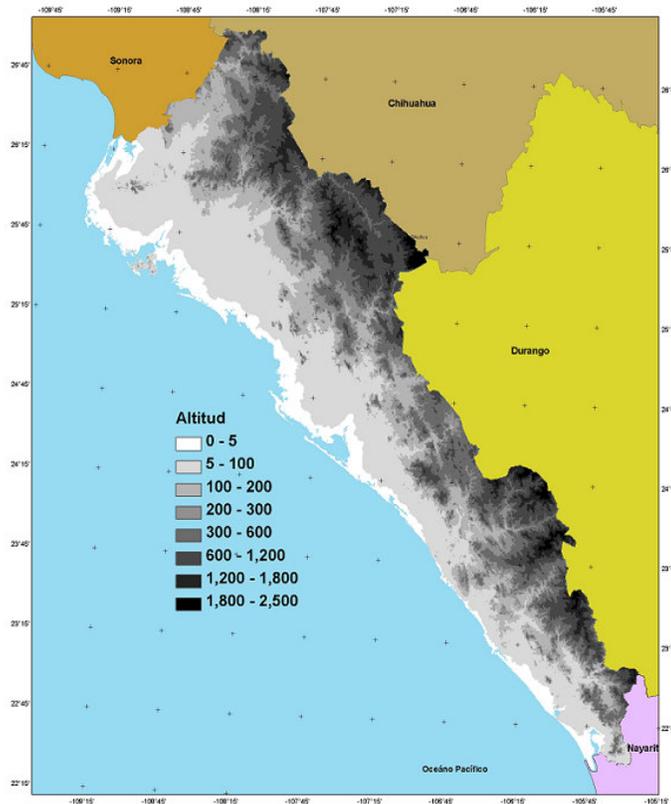


Figura 14. Altitud del estado de Sinaloa en msnm.

Un dato indispensable en la estimación de la capacidad de retención de humedad del suelo es su textura. Suelos finos tienen alta capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, por lo que la frecuencia del riego es menor que en un suelo de textura gruesa. La Figura 15 presenta la variación espacial de los suelos del estado de Sinaloa. Se observa una textura fina en la zona de planicies donde se concentra la agricultura de riego.

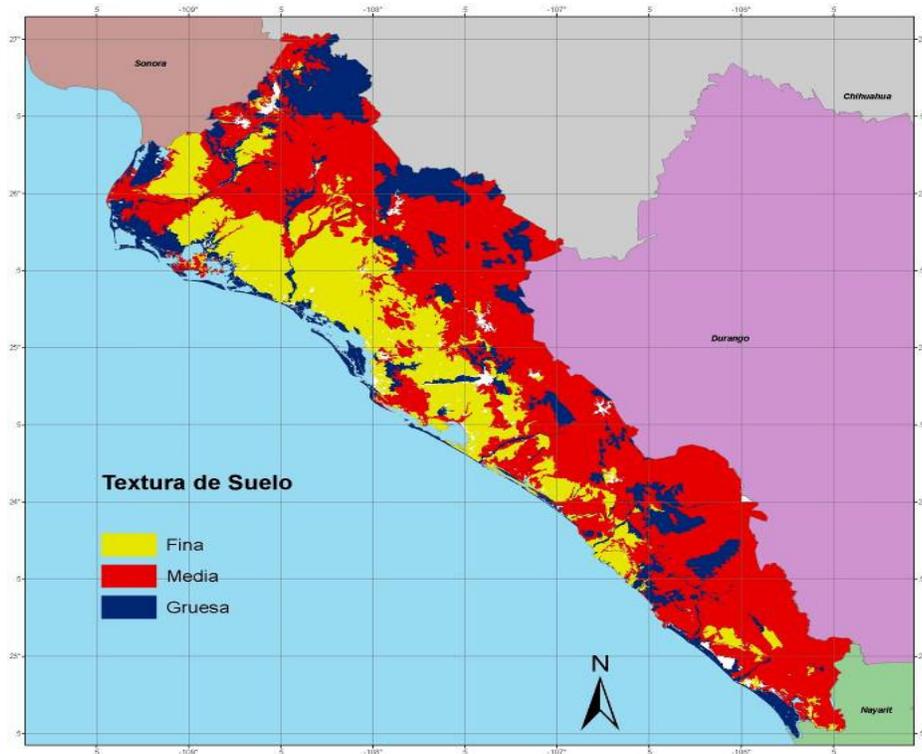


Figura 15. Tipos de suelo del estado de Sinaloa en base a su textura.

La superficie regable es de 238,000 hectáreas con un plan de cultivos compuesto de la siguiente manera: el 11.7% de la superficie tiene cultivos perennes (PER) y 88.3% cultivos anuales, de estos 80% es de ciclo otoño-invierno y 20% de segundos cultivos de ciclo primavera-verano. El porcentaje de la superficie sembrada por cultivo y por ciclo es 66% maíz, 20% frijol (*Phaseolus vulgaris*), 7% papa (*Solanum tuberosum*), 4% jitomate (*Solanum lycopersicum*) y 3% con otros cultivos en el OI. En el ciclo PV existen segundos cultivos de la superficie sembrada en OI: 65% es sorgo (*Sorghum bicolor*), maíz 34% y otros cultivos 1%. Los cultivos perennes que se establecen son: caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) con 62%, alfalfa (*Medicago sativa*) con 20%, y mango (*Mangifera indica*) con el 18% (Ojeda *et al.*, 2011).

3.2 Diseño experimental

Se estableció un experimento durante el ciclo agrícola OI 2010/2011 en terrenos del Campo Experimental Valle del Fuerte (CEVAF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en Juan José Ríos, Sinaloa, México a los 25° 46' 32" N, 108° 48' 10" O y una altitud de 20 msnm.

3.2.1 Diseño de tratamientos

Los tratamientos utilizados fueron seis técnicas para riego por superficie (surcos): 1) surcos alternos (SUA), 2) camas (CAM), 3) reducción de gasto (REG), 4) riego intermitente (INT), 5) riego deficitario (DEF) y 6) el testigo (TES). Este último corresponde al riego por surcos convencional de la zona de estudio. Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones en una parcela de 19,612.8 m², con 12 unidades experimentales de 8 m x 204 m (10 surcos).

3.2.2 Establecimiento del experimento

El cultivo se sembró en seco en todos los tratamientos el 14/02/11 aplicando un riego de germinación en forma inmediata, se utilizó la variedad Pioneer P2946W ciclo intermedio con sembradora de precisión Monosem NG. Se aplicó una fertilización base previo a la siembra de 126-52-0, al cierre de cultivo (octava hoja verdadera V8) se complementó la fertilización con 115-0-0, las fuentes usadas fueron urea y fosfato monoamónico (MAP). La densidad de siembra fue de 103,000 semillas ha⁻¹ separadas a 12.04 cm; cuando el maíz alcanzó 40 cm de altura se procedió a cultivar y abrir surco en forma simultánea.

3.3 Programas computacionales utilizados

3.3.1 IRRIMODEL

La programación del riego de germinación se hizo gravimétricamente y la de los riegos de auxilio se llevó a cabo con el programa IRRIMODEL para determinar el momento y requerimientos de riego (L_n), este sistema es una derivación del software SPRITER implantado bajo internet, el cual pronostica el riego en tiempo real, en función al desarrollo fenológico del cultivo, acumulación de grados día crecimiento (GDCA) y humedad del suelo. El sistema estima diariamente los parámetros de calendarización en función de los días grado acumulados (Ojeda *et al.*, 2006).

3.3.2 RIGRAV

El diseño de los riegos (inicial y auxilios) se realizó con el programa RIGRAV y la función es simular la duración del tiempo de riego (T_r), Gasto de riego unitario (q_u), coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC), lámina bruta (L_b), eficiencia de aplicación (E_a) y eficiencia de riego (E_r), considerando los siguientes parámetros: lámina neta (L_n), humedad a saturación (θ_s), humedad inicial (θ_0), conductividad hidráulica a saturación (K_s), parámetro de la función de infiltración (H_f), pendiente natural del terreno (m) y la longitud del riego (L).

3.4 Calibración del programa RIGRAV para diseño de riego por gravedad

3.4.1 Calibración de los parámetros del modelo

Para el diseño del riego inicial se realizaron pruebas de riego en la parcela experimental en el tratamiento SUA donde se midieron las fases de avance y recesión con fines de calibración de los parámetros K_s y H_f del RIGRAV. Para esto se consideraron los siguientes valores iniciales de los otros parámetros: $L = 204.3$ m, $m = 0.04\%$, $L_n = 0.12$ m, $\theta_0 = 0.37$ cm³ cm⁻³ (medida

gravimétricamente), $\theta_s = 0.65 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (determinada), $n = 0.0375 \text{ s m}^{-1/3}$. Los parámetros iniciales de K_s y H_f fueron los propuestos por Fuentes (1997) cuyos valores son respectivamente 0.05 cm hr^{-1} y 59 cm , el valor de n fue el propuesto por Rosano *et al.*, (2001). Una vez hecha la calibración de K_s y H_f en el riego inicial, se ejecutó el programa en el resto de los tratamientos (excepto el TES) para determinar el gasto por surco óptimo (Q_g) y T_r , el primero representa el producto del gasto de riego unitario (q_u) por la separación entre surcos (E). Debido a que la calibración se realizó en SUA se consideró la separación entre surcos de 1.6 m , despreciando el perímetro del surco intermedio.



Figura 16. Evaluación de la fase de avance y recesión.

En el primer riego de auxilio se realizó una segunda calibración con pruebas de riego (avance y recesión) en el mismo tratamiento SUA, para verificar los parámetros K_s y H_f obtenidos en el riego inicial, Para los siguientes riegos en todos los tratamientos se utilizaron los parámetros obtenidos en la segunda calibración a excepción del TES.

Para poder aplicar el RIGRAV en el resto de los tratamientos se hicieron algunas adecuaciones. En los tratamientos SUA y CAM se consideró una separación entre surcos de 1.6 m, en el método REG la longitud del surco se dividió en cuatro partes iguales y el gasto de riego se manejó en dos eventos, en las primeras tres cuartas partes de la longitud total se utilizó un gasto alto sin llegar al gasto máximo no erosivo (aproximadamente el triple del TES), en el último cuarto el gasto de riego se redujo a menos de la mitad del gasto inicial para completar la lámina proyectada.

En el tratamiento INT se dividió en dos secciones (sección A y B) de cinco surcos y la longitud del surco (L) se dividió también en tres partes iguales. La aplicación del riego inició en la zona A (0 m) y se suspendió al llegar al primer tercio ($L/3$) para iniciar la aplicación en la zona B (0 m) y al llegar al primer tercio, repitiendo esta acción hasta cubrir los tres tercios de ambas zonas. En este tratamiento la separación entre surcos fue de 0.8 m.

Para el caso del riego deficitario controlado (DEF), la L_n (calculada con IRRIMODEL) en cada riego se redujo al 30% con respecto a L_n sin déficit en el primer riego (inicial), segundo (primer auxilio), cuarto (tercer auxilio) y quinto riego (cuarto auxilio). En el segundo riego de auxilio no se provocó déficit ya que coincidió con la etapa más crítica del cultivo desde el punto de vista hídrica que fue floración (R1).

3.5 Variables

3.5.1 Eficiencias de riego (aplicación y uniformidad)

En todos los riegos y en los seis tratamientos, la evaluación de los riegos se hizo en términos de eficiencias de aplicación (E_a) y uniformidad (CUC) en

unidades porcentuales. La primera se determinó usando la fórmula $E_a = (L_n / L_b) \times 100$, donde E_a representa la eficiencia de aplicación (%), L_n la lámina de riego requerida o lámina neta y L_b la lámina de riego bruta o aplicada (Bolaños *et al.*, 2001). La determinación de L_b se calculó mediante la fórmula $Q \times T = L_b \times A$, donde Q es el gasto de riego ($l\ s^{-1}$), T el tiempo (s), L_b es la lámina de riego aplicada (m) y A la superficie regada (m^2) (Martin, 2011).

El CUC se determinó utilizando la fórmula de Christiansen, expresada de la siguiente manera: $CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n L_m} \right]$ donde, L_i es la lámina infiltrada (medida en forma gravimétrica) en el punto i , L_m la lámina infiltrada media y n el número de sitios de muestreo a lo largo del surco. L_i se determinó en tres sitios de muestreo (50, 100 y 150 m) a lo largo del surco central de cada tratamiento con muestras gravimétricas en tres estratos del perfil del suelo (0-30, 30-60 y 60-90 cm), antes y después de cada riego.



Figura 17. Obtención de las muestras de suelo de los diferentes tratamientos.

3.5.2 Rendimiento del cultivo de maíz

El rendimiento se evaluó el 27/07/11 (163 días después de siembra) en cinco sitios representativos de muestreo ubicados en los dos surcos centrales, de cinco metros de largo en un área de 8 m² (5 m x 1.6 m).

3.5.3 Productividad del agua

Además se evaluó la productividad del agua (PA), la cual representa la relación de una producción obtenida (producto o servicio) con respecto al insumo agua (Kassam y Smith, 2001; Bessembinder *et al.*, 2005). La PA también fue utilizada como definición de la cantidad de alimento producido por unidad de agua usada (Viets, 1962) y se calcula con la siguiente fórmula: $PA = (RC / VA)$, donde RC es la producción de un cultivo en kg y VA el volumen de agua utilizado en m³.

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Calendario de riegos (IRRIMODEL)

El calendario de riegos utilizado en los tratamientos estudiados se muestra en el Cuadro 6, se aplicaron un total de cinco riegos incluyendo el riego inicial. El intervalo de los riegos de auxilio fue de 16 a 52 días, la Ln del riego inicial fue de 12 cm y las de los riegos de auxilio fluctuaron entre 8 y 11 cm sumando una Ln total de 48 cm a excepción del tratamiento DEF donde esta fue menor.

Cuadro 6. Calendario de riegos utilizado en seis técnicas de aplicación del riego por superficie en el cultivo maíz en el norte de Sinaloa. Suelo arcilloso, fecha de siembra 14/02/11.

Riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina neta (cm)	DGCA [§]	Etapa Fenológica
1	0	0	12	0	Siembra
2	52	52	8	489.11	Cuarta hoja (V4)
3	73	21	8	741.21	Flor masculina (VT)
4	89	16	9	962.36	Jiloteo (R1)
5	105	16	11	1213.77	Grano lechoso (R3)
			48		

[§]DGCA: Días Grado Crecimiento Acumulado.

4.2 Parámetros del modelo de diseño de riego por gravedad (RIGRAV)

Los resultados de la calibración de los parámetros de diseño K_s , H_f y n del programa RIGRAV se presentan en el Cuadro 7, se observan dos calibraciones a partir de los parámetros de referencia R propuestos por Fuentes (1997) y Rosano *et al.*, (2001). En la primera calibración C1 realizada en el riego inicial, los valores obtenidos de K_s y H_f fueron 0.33 cm hr^{-1} y 68 cm respectivamente. El valor de n fue el mismo que el de referencia ($0.0375 \text{ s m}^{-1/3}$).

En la segunda calibración C2 efectuada en el primer riego de auxilio, n se mantuvo igual, mientras que K_s se modificó a 0.09 cm hr^{-1} y h_f a 99 cm probablemente por la variación de la porosidad inicial del suelo, estos valores se utilizaron para el diseño del resto de los riegos.

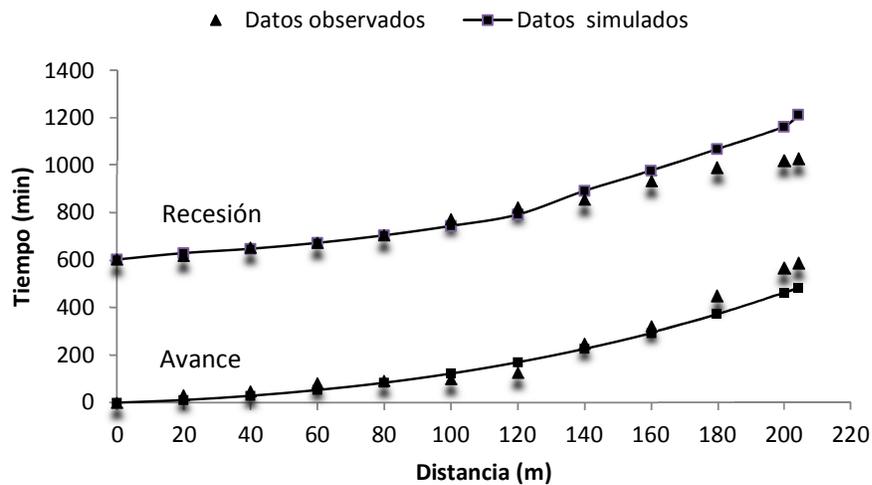
Cuadro 7. Resultados de la calibración de los parámetros K_s , h_f y n del modelo RIGRAV en dos eventos (C1 y C2).

Riego	Calibración	L	M	q_u	θ_0	θ_s	K_s	n	h_f	L_n	L_b	T_r
		(m)	(%)	(lps m^{-1})	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	(cm hr^{-1})	($\text{s m}^{-1/3}$)	(cm)	(m)	(m)	(min)
1	R \ddagger	---	---	---	---	---	0.05	0.0375	59	---	---	---
	C1 \ddagger	204.3	0.04	0.76	0.37	0.65	0.33	0.0375	68	0.12	0.13	605
2	C1 \ddagger	204.3	0.04	0.76	0.42	0.65	0.33	0.0375	68	0.08	0.11	469
	C2 \ddagger	204.3	0.04	0.63	0.42	0.65	0.09	0.0375	99	0.08	0.09	481

R \ddagger = parámetros de referencia, C1 \ddagger = primera calibración, C2 \ddagger = segunda calibración.

4.3 Precisión del modelo

En ambas calibraciones las fases de avance y recesión observadas en campo fueron similares a las modeladas con el RIGRAV. En las Figuras 18a y 18b se muestra un comparativo entre los datos modelados y calibrados de estas dos variables.



(a)

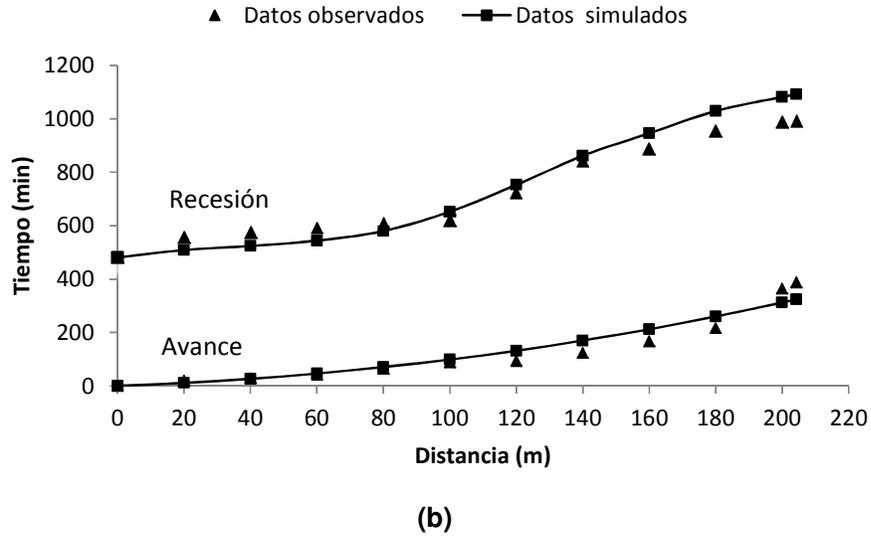


Figura 18. Comparación de las fases de avance y recesión observada y modelada con el programa RIGRAV durante el proceso de calibración durante el riego inicial (a) y primer auxilio (b).

4.4 Análisis de técnicas de riego por gravedad

4.4.1 Eficiencia del riego

El Cuadro 8 muestra una comparación detallada entre las variables Q_g , T_r , E_a y CUC modeladas y obtenidas en campo. En todos los tratamientos se observa que Q_g modelado fue similar al aplicado, lo cual indica un buen control de la aplicación de los tratamientos. De acuerdo a la E_a y CUC obtenida, el mejor tratamiento fue el REG con 89.16 y 92% respectivamente, seguido del INT con una E_a de 85.79% y un CUC de 93.3%, aunque la CUC de este último fue ligeramente mayor el INT mostró mayor E_a y practicidad en la aplicación del riego. El TES mostró la mayor CUC la cual fue de 99.03% pero con la más baja E_a con solo el 48.78%, esto demuestra que el riego tradicional utiliza el criterio de aplicación de láminas de riego altas en todos los puntos de la parcela con Q_g bajos con respecto al óptimo de diseño, provocando erosión hídrica y lixiviación de nutrimentos soluble como el nitrógeno. El tratamiento con mayor consumo de

agua fue TES con 98.54 cm seguido de CAM con 58.10 cm, SUA 56.97 cm, INT 56.01 cm, REG 53.96 cm y DEF con solo 44.28 cm de Lb.

Cuadro 8. Comparación de las variables Qu, Tr, Ea y CUC modeladas con RIGRAV y obtenidas en riegos aplicados en seis tratamientos de riego por superficie en el norte de Sinaloa.

Trat.	Riego	Sección	L (m)	Qu* (lps m ⁻¹)	Tr* (min)	Ea* (%)	CUC* (%)	Qg** (lps)	Tr** (min)	Ea** (%)	CUC** (%)		
SA	1		204.3	0.76	597	89	90	1.22	652	82.2	89		
	2		204.3	0.63	481	88	89	1.01	476	90.7	87		
	3		204.3	0.63	481	88	89	1.01	521	82.8	90		
	4		204.3	0.67	508	86	87	1.07	556	82.4	90		
	5		204.3	0.76	548	90	93	1.22	579	84.8	98		
			Media				88.2	89.6			84.58	90.8	
CAM	1		204.3	0.76	597	89	90	1.22	669	80.1	87		
	2		204.3	0.63	481	88	89	1.01	502	85.9	89		
	3		204.3	0.63	481	88	89	1.01	510	84.7	94		
	4		204.3	0.67	508	86	87	1.07	565	81.1	86		
	5		204.3	0.76	548	90	94	1.22	592	83	89		
			Media				88.2	89.8			82.96	89	
REG	1		153.23	1.79	77	73	88	1.43	118	86.2	83		
			204.3	0.76	369	72	78	0.61	253				
	2		153.23	1.79	52	75	71	1.43	71	87.9	94		
			204.3	0.73	259	87	83	0.58	194				
	3		153.23	1.79	52	74	71	1.43	65	90.6	94		
			204.3	0.73	259	87	83	0.58	201				
	4		153.23	1.73	66	80	75	1.38	183	91.5	96		
			204.3	0.73	259	87	83	0.58	199				
	5		153.23	1.79	79	84	79	1.43	103	89.6	93		
			204.3	0.76	298	86	84	0.61	226				
			Media			81.1	79.5			89.16	92		
	INT	1	A	68.1	1.2	37	70	91	0.96	43	83.16	91	
136.2				1.2	106	72	97	0.96	77				
204.3				1.2	210	68	89	0.96	165				
B			68.1	1.2	37	70	91	0.96	44	83.68			92
			136.2	1.2	106	72	97	0.96	74				
			204.3	1.2	210	68	89	0.96	164				
2		A	68.1	1	30	75	84	0.8	38		84.29	93	
			136.2	1	76	60	79	0.8	64				
			204.3	1	151	86	79	0.8	113				
			68.1	1	30	75	84	0.8	35	83.42			92
			136.2	1	76	60	79	0.8	67				

		B	204.3	1	151	86	79	0.8	121			
		3	A	68.1	1	30	75	84	0.8	33		
				136.2	1	76	60	77	0.8	73	85.84	94
	204.3			1	151	86	79	0.8	109			
		B	68.1	1	30	75	84	0.8	34			
			136.2	1	76	60	77	0.8	69	88.3	94	
			204.3	1	151	86	79	0.8	103			
	4	A	68.1	1	31	75	84	0.8	42			
			136.2	1	76	85	79	0.8	74	86.29	96	
			204.3	1	151	86	79	0.8	118			
		B	68.1	1	31	75	84	0.8	37			
			136.2	1	76	85	79	0.8	73	86.71	95	
			204.3	1	151	86	79	0.8	133			
	5	A	68.1	1	38	89	85	0.8	45			
			136.2	1	78	85	80	0.8	87	87.23	93	
			204.3	1	189	85	80	0.8	164			
		B	68.1	1	38	89	85	0.8	45			
			136.2	1	78	85	80	0.8	86	88.99	93	
204.3			1	189	85	80	0.8	157				
Media					76.63	83.1		85.79	93.3			
DEF	1	204.3	1	318	89	91	0.8	351	81.6	93		
	2	204.3	1	212	83	80	0.8	232	82.2	96		
	3	204.3	1	303	88	86	0.8	324	84	88		
	4	204.3	1	238	83	81	0.8	266	80.7	84		
	5	204.3	1	291	89	86	0.8	335	78.3	96		
	Media					86.4	84.8		81.36	91.4		
TES	1	204.3					0.52	1173	52.7	99.43		
	2	204.3					0.52	1086	38.6	98.68		
	3	204.3					0.52	977	42.9	99.76		
	4	204.3					0.52	924	51	98.33		
	5	204.3					0.52	982	58.7	98.98		
	Media								48.78	99.03		

* Variables modeladas ** variables obtenidas

4.4.2 Rendimiento del grano de maíz

La variable rendimiento de grano mostró diferencia estadística significativa entre tratamientos, la mejor técnica fue REG con 10,686 kg ha⁻¹ mientras que el del testigo fue de 9,423 kg ha⁻¹ como se muestra en el Cuadro 9, lo cual indica que condiciones óptimas de humedad en el suelo es un factor fundamental para

mejorar el rendimiento ya que también fue el mejor en términos de Ea y CUC. El resto de los tratamientos fueron similares al testigo.

Cuadro 9. Rendimiento de grano y rendimiento relativo del cultivo de maíz en seis tratamientos de riego por gravedad en el norte de Sinaloa.

Tratamiento	Clave	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Rendimiento relativo (%/100) (Ri/Rmax)
Surcos alternos	SUA	8,869 e	0.83
Camas	CAM	8,742 f	0.82
Reducción de gasto	REG	10,686 a	1.00
Intermitente	INT	9,622 c	0.90
Deficitario	DEF	9,025 b	0.84
Testigo	TES	9,423 d	0.88

Letras distintas en una misma columna denotan tratamientos significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

4.4.3 Productividad del agua

Con respecto a la variable PA, los tratamientos DEF y REG fueron los mejores con 2.04 y 1.98 kg m⁻³ respectivamente mientras que la del TES fue sólo de 0.96, como se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Rendimiento de grano y productividad del agua en seis técnicas de aplicación del riego en el cultivo de maíz en el norte de Sinaloa.

Tratamiento	Clave	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Volumen aplicado (m ³ ha ⁻¹)	Productividad del agua (kg m ⁻³)	Diferencia
Surco alternativo	SUA	8,869	5,697	1.56	+0.60
Camas	CAM	8,742	5,810	1.51	+0.55
Reducción de gasto	REG	10,686	5,396	1.98	+1.02
Intermitente	INT	9,622	5,601	1.72	+0.76
Riego deficitario	DEF	9,025	4,428	2.04	+1.08
Testigo	TES	9,423	9,854	0.96	---

Las técnicas parcelarias evaluadas muestran las bondades en el ahorro del agua, esta alternativa podría implementarse en los distritos de riego de México, ya que el volumen ahorrado es cercano a $5,426 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ del tratamiento con menor consumo de agua DEF con respecto al TES, con solo una reducción del 4.25% de rendimiento, lo que permitiría una mayor superficie sembrada y el establecimiento de dobles cultivos en el mismo ciclo agrícola. El tiempo total de riego refleja reducción en la mano de obra con lo cual permite disminuir costos del cultivo.

V. CONCLUSIONES

Se lograron calibrar los parámetros conductividad hidráulica a saturación (K_s) y el parámetro de la función de infiltración (H_f), sin embargo esta debe realizarse en dos eventos apoyados con pruebas de riego (avance y recesión), en el riego inicial y en el primer auxilio debido a la variación en porosidad del suelo. El mejor tratamiento desde el punto de vista de eficiencias, rendimiento y practicidad fue reducción de gasto (REG).

Desde el punto de vista de ahorro de agua y productividad del agua el mejor fue el riego deficitario, esta técnica podría ser una excelente opción en escenarios críticos de disponibilidad de agua. Los tratamientos surcos alternos y camas mostraron eficiencias de aplicación relativamente altas (E_a) con una tendencia a disminuir el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC) por la ruptura del lomo de surcos y el bordo de la cama.

Los modelos IRRIMODEL y RIGRAV demostraron ser excelentes herramientas para el manejo integral del riego en las técnicas evaluadas. El RIGRAV adecuado para las técnicas surcos alternos, camas, reducción de gasto y riego intermitente,

proporciona buen nivel de precisión en el diseño, cuando se cuenta con suficiente información de campo dándole aplicabilidad a nivel de zona de riego. No se puede generalizar las técnicas para los diferentes tipos de suelos, por esto se recomienda estratificar su aplicación para una zonas de riego específica.

VI. BIBLIOGRAFIA

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes & Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. Food and agriculture organization FAO, Irrigation and drainage, paper No. 56. 300p.

Bautista, E. A.J. Clemmens, T.S. Strelkoff, J. Schlegel. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management* 96 1146–1154.

Bessembinder, J. J. E. P. A. Leffelaar, A. S. Dhindwal, T. C. Ponsioen. 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. *Agricultural Water Management* 73 (2): 113-130.

Bolaños G. M., E. Palacios V., C. Scott y A. Exebio G. 2001. Estimación del volumen de agua usando una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia* 35 (6): 589-597.

Coligado, M.C., and Brown, D.M. 1975. Response of corn (*Zea mays* L.) in the pre-tassel initiation period to temperature and photoperiod. *Agric. Meteorol.* 14: 357-367.

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. 2009. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tlalpan, México, D.F. 389 p.

Crasta, O.R., and Cox, W.J. 1996. Temperature and soil water effects on maize growth, development yield, and forage quality. *Crop Sci.* 36: 314-348.

Escobedo Castillo, J. Francisco. 1997. “El pequeño riego en México”. En: Martínez Saldaña, Tomas y Jacinta Parlem Viqueria (Editores). Antología sobre pequeño riego. Colegio de postgraduados. México. Pp 241-272.

Graterol, Y. E., D. E. Eisenhauer and R. W. Elmore. 1993. Alternate-furrow irrigation for soybean production. *Agricultural Water Management* 24 (2): 133-145.

Gurovich Luis A., 1985. Fundamentos y diseño de sistemas de riego. Editorial IICA. San José Costa Rica. 433 P.

Horst, M. G., S. S. Shamutalov, J. M. Gonçalves and L. S. Pereira. 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agricultural Water Management* 87(2): 115-127.

Hunter, R.B., Hunt, L.A., and Kannenberg, L.W. 1974. Photoperiod and temperature effects on corn. *Can J. Sci.* 54: 71-78.

Iñiguez C. M., W. Ojeda B. e I. Sánchez C. 2012. La eficiencia global y la evapotranspiración: variables que determinan la capacidad de canales de riego. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas.* 4 (1): 5-11 Pp.

Israelsen O. W. y V.E. Hansen. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Editorial REVERTÉ. Barcelona, España. Pp 158-160.

James L. G. 1988. Principles of Farm Irrigation–System Design. John Wiley and Sons, Inc. USA. 543 p.

Kang, S. Z., Z. S. Liang, X. T. Hu, Y. H. Pan, P. Z. Shi and J. Zhang. 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrigation Science* 19(4): 181-190.

Kassam, A. and M. Smith 2001. Methodologies on crop water use and crop water productivity. Food Agriculture Organization. 18 p.

Lal, R. and A. C. Pandya 1970. Furrow irrigation with decreasing inflow rate. Journal of the Irrigation and Drainage División 96 (4): 451-460.

Ojeda B. W., E. Sifuentes I. y H. Unland W. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. Agrociencias. 40: 13-25 Pp.

Ojeda B. W., J.M. González C., E. Sifuentes I., E. Isidro y L. Rendón P. 2007. Using spatial information systems to improve water management in México. Agricultural Water Management. 89. 81-88 Pp.

Ojeda B. W., E. Sifuentes I., M. Íñiguez C. y M. J. Montero M. 2011. Impacto del cambio climático en el desarrollo y requerimientos hídricos de los cultivos. Agrociencias. 45: 1-11 Pp.

Palacios V. E. 1981. Manual de operación de distrito de riego. Ed. Universidad Autónoma de Chapingo. Tercera Edición. Pp. 326.

Palacios V. E. 1990. La eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego. Memoria: Análisis de la problemática del agua y perspectivas para la modernización de su uso en la Agricultura de Guanajuato., Celaya, Gto., diciembre 1990.

Palacios V. E. 1994. Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego. Diplomado en diagnóstico, planeación, uso eficiente del agua y la energía eléctrica y mejoramiento de las URDERAL. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp: 1-15.

Palacios V. E. 2010. La importancia del riego en la producción de maíz en México; en: el cultivo del maíz temas selectos. De León Carlos y Rodríguez Montessoro Rafael. Volumen 2. Mundi-prensa. Col. Cuauhtémoc, D.F. México.

Rosano M, L., L. Rendón P., P. Pacheco H., J. D. Etchevers B., J. Chávez M., y H. Vaquera H. 2001. Calibración de un modelo hidrológico aplicado en el riego tecnificado por gravedad. *Agrociencia* 35 (6): Pp 577-588.

Sifuentes I. E. y J. Macías. 2003. Jornada de manejo sustentable del cultivo del maíz. Memoria de capacitación. Fundación produce Sinaloa A.C. Pp 19-32.

Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., Schmidt, B.V., 1998. SRFR, Version 3.31—A model for simulating surface irrigation in borders, basins and furrows. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.

Summerfield, R.J., Roberts, E.R., Ellis, R.E. and Lawn, R.J. 1991. Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Expl. Agric.* 27:11-31.

Thorne W. D., y H. B. Peterson 1985. Técnica de riego: Fertilidad y explotación de los suelos. Ed. Continental. 2^{da} edición. México. Pp 47, 73-74.

Utah agricultural experiment station. 1988. Surge flow irrigation. Research bulletin 515. Utah State University. 92 p.

Viets, F.G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. *In: Advances in agronomy.* Norman A. G. (ed). Berkeley square house, London. Ed. Academic press inc. 14: 223-264.

Walker W. and Skogerboe, G. 1987. Surface Irrigation Theory and Practice. Prentice Hall, New York.

Warrington, I.J. and Kanemasu, E.T. 1983a. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seedling emergence, tassel initiation and anthesis. Agron. J. 75: 749-754.

Webber, H. A., C. A. Madramootoo, M. Bourgault, M. G. Horst, G. Stulina and D. L. Smith. 2006. Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. Agricultural Water Management 86(3): 259-268.

Wilson, D.R., Muchow, R.C., and Murgatroyd, C.J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in cool climate. Field crops research. 43: 1-18.

PAGINAS DE INTERNET

http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=3

51