

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**Evaluación de Programas de Simulación Para el Diseño  
del Riego por Gravedad**

**POR**

**GUILLERMO ACOSTA LÓPEZ**

**TESIS**

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

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ENERO DEL 2008**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**Evaluación de Programas de Simulación Para el Diseño  
del Riego por Gravedad.**

TESIS DEL C. **GUILLERMO ACOSTA LÓPEZ** ELABORADA BAJO  
LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORIA Y  
APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION.**

**APROBADA POR:**

**Director:**

\_\_\_\_\_  
**Ph D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA**

**Codirector:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. MIGUEL RIVERA GONZALEZ**

**Asesor:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. FEDERICO VEGA SOTELO**

**Asesor:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. ERNESTO LUNA DAVILA**

\_\_\_\_\_  
**ING. VICTOR MARTINEZ CUETO**

**COORDINADOR DE LA DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ENERO DEL 2008**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**Evaluación de Programas de Simulación Para el Diseño del Riego  
por Gravedad.**

**TESIS DEL C. GUILLERMO ACOSTA LÓPEZ QUE SE SOMETE A  
CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR, COMO  
REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE:**

**INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION.**

**APROBADA POR:**

**Director:**

\_\_\_\_\_  
**Ph D. VICENTE DE PAUL ÁLVAREZ REYNA**

**Codirector:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. MIGUEL RIVERA GONZALEZ**

**Asesor:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. FEDERICO VEGA SOTELO**

**Asesor:**

\_\_\_\_\_  
**M.C. ERNESTO LUNA DAVILA**

\_\_\_\_\_  
**ING. VICTOR MARTINEZ CUETO**

**COORDINADOR DE LA DIVISION DE CARRERAS AGRONOMICAS**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**ENERO DEL 2008**

## DEDICATORIAS

### **A Dios:**

Por darme la razón de vivir.

### **A mis padres:**

Bertin Acosta Jiménez y Estela López Austria, por todo el sacrificio, amor, comprensión, consejos y apoyo incondicional que me han brindado en los momentos buenos y malos a lo largo de mi vida.

### **A mis hermanos:**

Lupita, Octavio y Elvia, les agradezco de todo corazón su amor, confianza, sacrificio y por ser un ejemplo a seguir.

### **A mi familia:**

A toda mi familia que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de mis estudios

A Lupita A. L. por darme su amor incondicionalmente y estar conmigo en las buenas y en las malas.

## AGRADECIMIENTOS

A mi “ALMA TERRA MATER” Por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales y formar parte de la familia NARRO y ser orgullosamente buitre.

Al MC. Miguel Rivera González, por su amistad, apoyo, así como la dedicación en la colaboración, asesoramiento y revisión de esta tesis.

Al Ph D. Vicente De Paúl Álvarez Reyna, por su colaboración y asesoramiento en la revisión de la presente tesis.

Al M.C. Federico Vega Sotelo, por el su colaboración y asesoramiento para concluir esta tesis.

Al M.C. Ernesto Luna Dávila, por su colaboración y asesoramiento para concluir esta tesis.

Al M.C Edgardo Cervantes Álvarez, por su colaboración y asesoramiento en el diseño y análisis estadístico realizado en esta tesis.

AL CENID – RASPA (Centro nacional de Investigaciones Disciplinarias en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera), por brindarme su apoyo y herramientas necesarias para la elaboración de esta tesis.

A todos mis maestros que intervinieron a lo largo de mi carrera y contribuyeron en mi formación académica.

A mis compañeros de generación de Ingeniero Agrónomo en Irrigación: Pedro, Abraham, Ramiro, Ildefonso, Benjamín, Argeo, Marcos, Martín, Amin Oscar, Paola, Rosibel, Orlando.

A todas aquellas personas que de alguna u otra manera colaboraron en el desarrollo de mis estudios y la realización de esta tesis.

## INDICE DE CONTENIDO

	<b>PAGINA</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>II</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b>	<b>III</b>
<b>INDICE DE CUADROS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>II. OBJETIVO</b>	<b>4</b>
<b>III. HIPÓTESIS</b>	<b>4</b>
<b>IV. REVISION DE LITERATURA</b>	<b>5</b>
<b>4.1 Riego por gravedad.</b>	<b>5</b>
<b>4.2 Diseño del riego.</b>	<b>5</b>
<b>4.3 Metodologías de diseño</b>	<b>6</b>
<b>4.3.1 Pruebas de riego.</b>	<b>6</b>
<b>4.3.2 Modelos matemáticos</b>	<b>6</b>
<b>4.3.2.1 Modelo Hidrodinámico total</b>	<b>7</b>
<b>4.3.2.2 Modelo Cero inercia</b>	<b>8</b>
<b>4.3.2.3 Modelo Onda Cinemática.</b>	<b>9</b>
<b>4.3.2.4 Modelo de Balance Volumétrico.</b>	<b>9</b>
<b>4.4 Software de simulación del riego por superficie.</b>	<b>10</b>
<b>4.4.1 Software de Simulación RIGRAV.</b>	<b>10</b>
<b>4.4.2 Software de Simulación SIRMOD.</b>	<b>11</b>
<b>4.5 Evaluación del riego por gravedad</b>	<b>12</b>
<b>4.5.1 Uniformidad de Distribución</b>	<b>12</b>

<b>4.5.2 Eficiencia de aplicación</b>	<b>13</b>
<b>4.5.3 Eficiencia de requerimiento de riego</b>	<b>13</b>
<b>4.6 Trabajos realizados utilizando los modelos de simulación para predecir el riego por superficie</b>	<b>14</b>
<b>V. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>16</b>
<b>5.1 Caracterización físico –química del suelo.</b>	<b>16</b>
<b>5.2 Evaluación de las eficiencias de riego</b>	<b>16</b>
<b>5.2.1 Determinación de la humedad del suelo</b>	<b>17</b>
<b>5.2.2 Determinación de la pendiente.</b>	<b>17</b>
<b>5.2.3 Determinación del gasto aplicado.</b>	<b>18</b>
<b>5.2.4 Tiempo de avance.</b>	<b>18</b>
<b>5.3 Infiltración del suelo</b>	<b>18</b>
<b>5.4 Programas de simulación del riego por gravedad.</b>	<b>19</b>
<b>5.4.1 Programa RIGRAV.</b>	<b>19</b>
<b>5.4.2 Programa SIRMOD II.</b>	<b>20</b>
<b>5.5 Análisis estadístico</b>	<b>21</b>
<b>VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>22</b>
<b>6.1 Características físico – químicas de los sitios experimentales.</b>	<b>22</b>
<b>6.2 Evaluaciones de las eficiencias de riego en campo</b>	<b>25</b>
<b>6.3 Eficiencias de riego obtenidas en campo</b>	<b>25</b>
<b>6.4 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo RIGRAV.</b>	<b>26</b>
<b>6.5 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo SIRMOD.</b>	<b>27</b>
<b>VII. CONCLUSIONES</b>	<b>30</b>
<b>VIII. RECOMENDACIONES</b>	<b>30</b>
<b>IX. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>31</b>

**INDICE DE CUADROS**

Cuadro 1.- Características Físico - Químicas del predio Santa Bárbara.	22
Cuadro 2.- Características Físico - Químicas del predio San Ramiro.	23
Cuadro 3.- Características Físico - Químicas del predio Las Mercedes.	23
Cuadro 4.- Características Físico - Químicas del predio La Purísima	24
Cuadro 5.- Características Físico - Químicas del área experimental CENID RASPA.	24
Cuadro 6. Datos de campo de las pruebas de riego de los predios.	25
Cuadro 7.- Eficiencias de riego obtenidas de las pruebas de riego para cada localidad.	26
Cuadro 8.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (RIGRAV, 1987).	26
Cuadro 9.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (SIRMOD, 1986).	27
Cuadro 10.- Análisis estadístico, comparando los programas de simulación	28



# **Evaluación de Programas de Simulación Para el Diseño del Riego por Gravedad.**

## **RESUMEN.**

El presente trabajo de investigación se realizó en 3 localidades de la Comarca Lagunera, Santa Bárbara, Las Mercedes y San Ramiro, también se utilizó la información de campo, recabada por Luna (1983), en las localidades La Purísima y el área experimental CENID – RASPA.

El objetivo fue seleccionar el programa de simulación que permita predecir mejor la eficiencia de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución, del riego por gravedad.

Los programas de simulación evaluados fueron el SIRMOD y RIGRAV.

Ambos programas sobreestiman las eficiencias de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución. Además requieren las funciones de infiltración de las pruebas de campo, para mejorar las estimaciones de las eficiencias de riego por gravedad.

El análisis estadístico utilizado para comparar el grado de error para cada uno de los programas de simulación en base a los datos de campo obtenidos en las evaluaciones de riego, fue la prueba de  $\chi^2$  – cuadrada, la que determinó que el programa SIRMOD, predijo mejor el riego por gravedad.

## I. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 80 % de los recursos del agua en México y a nivel mundial consumidos por la humanidad, se utilizan para riego (Manual de Riego, 1990; Águila, 1997). La actividad agrícola es la que requiere más agua, sin embargo, es la más ineficiente. En un estudio realizado por el Banco Mundial en 1988 (Águila, 1997) se estimó que la eficiencia promedio en uso del agua en la agricultura es de 30 % a nivel mundial. En México se estima que la eficiencia de conducción es del orden de 60 % (Palacios, 1990) y de aplicación a nivel de parcela es 60 % (Águila, 1997), resultando una eficiencia global de 36 %.

Actualmente el riego superficial en la Comarca Lagunera ocupa el primer lugar en cuanto a superficie regada. A pesar de ser el método más extendido y más antiguo, su desarrollo técnico apoyado a un análisis científico se ha iniciado hace unas pocas décadas, (Israelsen 1932; Lewis y Milne, 1938), debido entre otras razones a la complejidad del fenómeno.

Una alternativa actualmente disponible son los modelos de simulación del riego superficial, que permiten conocer el desarrollo de las diferentes fases del riego en corto tiempo y poca inversión, esto para aumentar la eficiencia de riego y producción, bajo cualquier condición de suelo y agua.

A través del modelo RIGRAV, se ha demostrado que el gasto de riego que maximiza las eficiencias de aplicación, requerimiento de riego y uniformidad es único (Rendón *et al.*, 1990). Además, cuando la longitud del riego se duplica o triplica, el gasto de riego debe aumentar en la misma proporción para obtener las máximas eficiencias.

En Guanajuato se evaluaron las eficiencias del riego por melgas y producción en el cultivo de trigo, encontrando que cuando se selecciona adecuadamente el gasto de riego unitario por melga, se obtiene eficiencia de aplicación y uniformidad similares a las obtenidas teóricamente (Rendón *et al.*, 1990). Además el rendimiento es similar al obtenido experimentalmente en estudios de funciones de respuesta al régimen de humedad en el suelo.

El modelo de simulación SIRMOD, provee capacidad analítica con respecto a todas las variables que afectan el diseño y manejo del riego superficial (Walker, 1985). No simplifica ninguna de las variables pero a cambio simula la respuesta del sistema a los valores que se le introducen a cada variable. Se identifica así, un óptimo diseño y manejo del riego.

A través del Modelo SIRMOD, se identifican rápidamente las modificaciones y/o ajustes que el productor o regador tiene que realizar para mejorar la eficiencia de aplicación del agua (Walker y Skogerboe, 1987). Además comentan que dados los grandes problemas de demanda de agua por los diferentes usuarios y baja disponibilidad del recurso, aunado a los problemas de tipo económico que tiene el mundo hoy, el riego superficial continuará teniendo una mayor atención por los profesionistas y agricultores, para mejorar cada día las prácticas de riego.

Utilizando resultados de experimentos anteriores y aplicando el modelo de simulación SIRMOD para el diseño de riego por gravedad en alfalfa a nivel comercial, en la Comarca Lagunera, por medio del modelo se pudo demostrar que se pueden producir 101 ton/ha de forraje verde con una lámina de riego de 1.89 m, siempre que se considere la pendiente, longitud de la melga o surco y tiempo de riego para cada suelo en especial (Catalán, 1993).

## **II. OBJETIVO**

Seleccionar el programa de simulación que permita predecir mejor la eficiencia de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de Distribución (UD).

## **III. HIPÓTESIS**

Ambos programas predicen con similar precisión, las eficiencias de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD), en riego superficial.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 6.1 Características físico – químicas de los sitios experimentales.

Las características físico –químicas de los sitios seleccionados en la Comarca Lagunera se presentan en los cuadros 1,2, 3, 4 y 5.

En el cuadro 1, se presentan las características físico –químicas del predio Santa Bárbara a una profundidad de 90 cm. Se observa que en el estrato 0 – 30 se tiene una textura franca, y en los estratos 30 – 60, 60 – 90, se tiene una textura franco arcillosa, el pH se encuentra en un rango de 8.08 a 8.58, y la CE fluctúa de 2.01 a 2.53 ds/m, con una densidad aparente que varía desde 1.3 a 1.4 gr/cm<sup>3</sup>, en los diferentes estratos.

Cuadro 1.- Características Físico - Químicas del predio Santa Bárbara

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)		
	0 - 30	30 – 60	60 - 90
pH	8.08	8.52	8.58
CE (ds/m)	2.38	2.53	2.01
M.O (%)	1.49	0.34	0.48
Arena (%)	41	53	41
Limo (%)	44	36	7
Arcilla (%)	41	48	11
Textura	franco	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso
CC (%)	26.4	19.2	22.5
PMP (%)	12.8	7.5	9.8
Da (gr/cm <sup>3</sup> )	1.4	1.3	1.4

En el cuadro 2, se presentan las características físico –químicas del predio San Ramiro, a una profundidad de 120 cm. La textura predominante es la franca, con un rango de pH de 8.13 a 8.58, la CE varía de 1.7 a 2.76 ds/m, el contenido de M.O se encuentra en un rango de 0.73 a 1.07 %, con una densidad aparente que varía desde 1.2 a 1.4 gr/ cm<sup>3</sup> para los diferentes estratos

Cuadro 2.- Características Físico - Químicas del predio San Ramiro

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.48</b>	<b>8.41</b>	<b>8.58</b>	<b>8.13</b>
<b>CE (ds/m)</b>	1.81	1.7	2.76	1.47
<b>M.O (%)</b>	0.94	0.87	1.07	0.73
<b>Arena (%)</b>	61	43	33	27
<b>Limo (%)</b>	25	39	45	47
<b>Arcilla (%)</b>	14	18	22	26
<b>Textura</b>	Franco	Franco	Franco	Franco
<b>CC (%)</b>	22.5	25.5	29.7	32.5
<b>PMP (%)</b>	11.2	13.2	15.4	17.5
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.2	1.4	1.3	1.3

En el cuadro 3, se presentan las características físico –químicas del predio Las Mercedes, a una profundidad de 120 cm. Se presentan un perfil de suelo con texturas alternadas franco arcillosa y franca, con un rango de CE de 0.39 hasta 1.62 ds/m, el contenido de M.O varia desde 0.6 hasta 1.2 %, y la densidad aparente se encontró de 1.2 a 1.3 gr/cm<sup>3</sup>, para los diferentes estratos.

Cuadro 3.- Características Físico - Químicas del predio Las Mercedes

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>CE (ds/m)</b>	0.39	1.56	1.62	1.3
<b>M.O (%)</b>	1.2	0.7	0.7	0.6
<b>Arena (%)</b>	35	49	41	17
<b>Limo (%)</b>	29	25	29	39
<b>Arcilla (%)</b>	36	26	30	44
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Franco	Fco. Arcilloso	Franco
<b>CC (%)</b>	36.5	28.9	31.2	40.7
<b>PMP (%)</b>	22.3	16.7	18.6	25.6
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.2	1.2	1.3	1.3

En el cuadro 4, se presentan las características físico –químicas del predio La Purísima, a una profundidad de 120 cm. La textura predominante es franco arcillosa, con rangos de pH de 8.1 a 8.6, la CE varía de 0.54 a 3.5 ds/m, con una densidad aparente de 1.23 a 1.37 g/cm<sup>3</sup>, para los diferentes estratos.

Cuadro 4.- Características Físico - Químicas del predio La Purísima

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.6</b>	<b>8.4</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>
<b>CE (ds/m)</b>	0.58	0.54	2.5	3.5
<b>M.O (%)</b>	0.89	0.27	0.27	0.21
<b>Arena (%)</b>	30.1	38.1	24.1	30.1
<b>Limo (%)</b>	36	32	40	32
<b>Arcilla (%)</b>	33.8	29.8	35.8	29.8
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso
<b>CC (%)</b>	32.3	32.3	33.8	34.7
<b>PMP (%)</b>	15.7	15.7	18	18.1
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.23	1.37	1.25	1.28

En el cuadro 5, se presentan las características físico –químicas del area experimental CENID-RASPA, a una profundidad de 120 cm. Se presenta un perfil de suelo con texturas alternadas franco arcillosa y franca, los contenidos de pH se encuentran en un rango de 8.4 a 8.6, la CE fluctúa de 0.36 a 0.56 ds/m y la densidad aparente varía de 1.27 a 1.4 g/cm<sup>3</sup>.

Cuadro 5.- Características Físico - Químicas del área experimental CENID RASPA

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.6</b>	<b>8.4</b>	<b>8.5</b>	<b>8.6</b>
<b>CE (ds/m)</b>	0.56	0.36	0.40	0.45
<b>M.O (%)</b>	0.96	0	0.69	0.14
<b>Arena (%)</b>	37.4	43.4	45.4	33.4
<b>Limo (%)</b>	28	26	32	42
<b>Arcilla (%)</b>	34.5	30.5	22.5	24.5
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Franco	Franco
<b>CC (%)</b>	33.7	31.1	26.1	28
<b>PMP (%)</b>	16	15.2	11.3	14.6
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.32	1.4	1.27	1.33

## 6.2 Evaluaciones de las eficiencias de riego en campo

En el cuadro 6, se presentan las evaluaciones hechas en campo, en el se describe las variables obtenidas de cada predio seleccionado, las cuales son, el gasto aplicado (Q), longitud de melga (Lm), ancho de melga (Am), Pendiente (So), Tiempo de riego (Tr), Volumen aplicado (Va), Lamina bruta (Lb), Lamina neta (Ln), Lamina requerida (Lr) y la textura del suelo.

Cuadro 6. Datos de campo de las pruebas de riego de los predios

Datos de campo	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID - RASPA
Gasto aplicado (lps)	50.0	40.2	113.2	36.0	18.0
Longitud de melga (m)	193	174	132	135	105
Ancho de melga (m)	16.8	20.5	21.4	10.0	8.0
Superficie (m <sup>2</sup> )	3242.4	3567.0	2824.8	1350.0	840.0
Pendiente (%)	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05
Tiempo de riego (min)	198	240	130	73	178
Volumen aplicado (m <sup>3</sup> )	594.0	577.4	603.1	157.7	192.2
Lamina bruta (cm)	18.0	16.0	21.0	12.0	23.0
Lamina neta (cm)	16.2	14.4	18.9	10.8	20.7
Lamina requerida a 90 cm.	11.4	13.8	3.3	20.4	15.2
Textura	franco	Franco arcilloso	Franco arenoso	Migajón arcilloso	Migajón arcilloso

## 6.3 Eficiencias de riego obtenidas en campo.

En base al gasto utilizado, ancho de melga, longitud de melga y pendiente del terreno se obtuvieron las eficiencias de aplicación (Ea), requerimiento (Er), uniformidad de distribución del agua (UD), Tiempo de avance (Ta) y gasto unitario (Qu) obtenidos en la evaluación de campo de cada predio, presentados en el cuadro 7.

La eficiencia de aplicación (Ea), varia en un rango del 36 – 79 %, la localidad las Mercedes presenta la eficiencia mas alta (79 %), y la localidad el CENID – RASPA la mas baja. La eficiencia de requerimiento (Er), varia en un rango del 38 – 100 %, presentando la localidad Santa Bárbara la mayor eficiencia



(100 %) y la Purísima la mas baja (38 %). La Uniformidad de Distribución varía en un rango del 63 – 90 %, siendo las Mercedes la que presentó la mayor Uniformidad de Distribución.

Cuadro 7.- Eficiencias de riego obtenidas de las pruebas de riego para cada localidad.

CAMPO	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga)	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	128	211	89	73	178
Ea (%)	52	79	50	66	36
Er (%)	84	70	100	38	54
UD (%)	63.6	90	77	71	63

Una vez obtenidas las eficiencias de riego en campo mostradas en el cuadro anterior, se procedió a utilizar los modelos de simulación RIGRAV y SIRMOD para simular el riego por gravedad.

#### 6.4 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo RIGRAV.

En el cuadro 8, se presentan las eficiencias obtenidas por el modelo de simulación RIGRAV, en base a los datos registrados en las evaluaciones de campo.

Este modelo sobreestima las eficiencias de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución, sin embargo subestima los tiempo de avance.

Cuadro 8.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (RIGRAV, 1987)

RIGRAV	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga).	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	97.66	79	32	33	72
Ea (%)	90	88	77	100	100
Er (%)	100	100	100	90	57.38
UD (%)	97	96	91	92	95.98

## 6.5 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo SIRMOD.

En el cuadro 9, se presentan las eficiencias obtenidas por el modelo de simulación SIRMOD, en base a los datos registrados en las evaluaciones de campo.

Al igual que el RIGRAV, el SIRMOD sobreestima las eficiencias de aplicación, requerimiento, Uniformidad de Distribución y el tiempo de avance.

Cuadro 9.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (SIRMOD, 1986).

SIRMOD	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga)	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	130	217	77.9	72	181.8
Ea (%)	97.40	100	11	100	67.6
Er (%)	97.75	73.67	100	57.38	100
UD (%)	93.92	95	89	95.98	98.36

En el cuadro 10 se muestra el análisis estadístico, en donde se hace una comparación de los programas de simulación en base a los datos de campo. Como se puede observar para los predios: Las Mercedes con textura franco arcilloso, La Purísima y el área experimental CENID RASPA, con textura migajon arcilloso, el programa que mejor simuló el riego por gravedad en base a los datos de campo fue el SIRMOD, y para el predio San Ramiro con textura franca, el programa que mejor simuló el riego en base a los datos de campo fue el RIGRAV. Sin embargo para el predio San Ramiro con textura franco arcillosa se encontró que los dos programas simularon bien el riego.

Cuadro 10.- Análisis estadístico de los programas de simulación.

		RIGRAV	SIRMOD	Análisis estadístico X2	
				RIGRAV	SIRMOD
San Ramiro	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	128	97.66	130	9.43	7.08
Ea	52	90	97.4	16	20.87
Er	84	100	97.75	2.58	1.93
UD	63.6	97	93.92	11.501	9.79
				<b>39.49</b>	<b>39.67</b>
Las Mercedes	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	211	79	217	220.56	80.29
Ea	79	88	100	0.92	4.41
Er	70	100	73.67	9.00	0.18
UD	90	96	95	0.375	0.26
				<b>230.85</b>	<b>85.14</b>
Sta. Bárbara	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	89	32	77.9	101.53	41.71
Ea	50	77	11	9.46	132.27
Er	100	100	100	0	0
UD	77	91	89	2.154	1.62
				<b>113.14</b>	<b>175.6</b>
La Purísima	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	73	33	72	48.48	22.22
Ea	66	100	100	11.56	11.56
Er	38	90	57.38	30.04	6.55
UD	71	92	95.98	4.793	6.50
				94.88	46.83
				<b>94.88</b>	<b>46.83</b>
Cenid - Raspa	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	178	30.3	181.8	719.98	120.00
Ea	36	99	67.6	40.09	14.77
Er	54	89	100	13.76	21.16
UD	63	88	98.36	7.102	12.71
				<b>780.93</b>	<b>168.64</b>

Cabe señalar que para el modelo RIGRAV, para una adecuada calibración, es necesario tener datos confiables del avance del agua y un buen criterio para seleccionar los parámetros de diseño  $K_s$  y  $h_f$ . Se encontró que el modelo, con pendientes menores de 0.03 % afecta la ejecución del programa.

Por su parte, para el modelo SIRMOD se requiere más trabajo de campo, ya que el número de variables que intervienen en tal modelo son muchas, pero por esta razón se puede analizar por separado, una a una, las variables que interviene en el diseño del riego, además éste modelo proporciona una ventana de ayuda donde muestra una familia de curvas de los parámetros  $a, k$  y  $f_0$  de la función de infiltración de kostiakov-Lewis. Para diferentes tipos de suelo. El programa tiene la capacidad de hacer un ajuste en los parámetros de infiltración en base al tiempo de avance (Elliot y Walter 1982).

# **Evaluación de Programas de Simulación Para el Diseño del Riego por Gravedad.**

## **RESUMEN.**

El presente trabajo de investigación se realizó en 3 localidades de la Comarca Lagunera, Santa Bárbara, Las Mercedes y San Ramiro, también se utilizó la información de campo, recabada por Luna (1983), en las localidades La Purísima y el área experimental CENID – RASPA.

El objetivo fue seleccionar el programa de simulación que permita predecir mejor la eficiencia de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución, del riego por gravedad.

Los programas de simulación evaluados fueron el SIRMOD y RIGRAV.

Ambos programas sobreestiman las eficiencias de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución. Además requieren las funciones de infiltración de las pruebas de campo, para mejorar las estimaciones de las eficiencias de riego por gravedad.

El análisis estadístico utilizado para comparar el grado de error para cada uno de los programas de simulación en base a los datos de campo obtenidos en las evaluaciones de riego, fue la prueba de ji – cuadrada, la que determinó que el programa SIRMOD, predijo mejor el riego por gravedad.

## I. INTRODUCCIÓN

Alrededor del 80 % de los recursos del agua en México y a nivel mundial consumidos por la humanidad, se utilizan para riego (Manual de Riego, 1990; Águila, 1997). La actividad agrícola es la que requiere más agua, sin embargo, es la más ineficiente. En un estudio realizado por el Banco Mundial en 1988 (Águila, 1997) se estimó que la eficiencia promedio en uso del agua en la agricultura es de 30 % a nivel mundial. En México se estima que la eficiencia de conducción es del orden de 60 % (Palacios, 1990) y de aplicación a nivel de parcela es 60 % (Águila, 1997), resultando una eficiencia global de 36 %.

Actualmente el riego superficial en la Comarca Lagunera ocupa el primer lugar en cuanto a superficie regada. A pesar de ser el método más extendido y más antiguo, su desarrollo técnico apoyado a un análisis científico se ha iniciado hace unas pocas décadas, (Israelsen 1932; Lewis y Milne, 1938), debido entre otras razones a la complejidad del fenómeno.

Una alternativa actualmente disponible son los modelos de simulación del riego superficial, que permiten conocer el desarrollo de las diferentes fases del riego en corto tiempo y poca inversión, esto para aumentar la eficiencia de riego y producción, bajo cualquier condición de suelo y agua.

A través del modelo RIGRAV, se ha demostrado que el gasto de riego que maximiza las eficiencias de aplicación, requerimiento de riego y uniformidad es único (Rendón *et al.*, 1990). Además, cuando la longitud del riego se duplica o triplica, el gasto de riego debe aumentar en la misma proporción para obtener las máximas eficiencias.

En Guanajuato se evaluaron las eficiencias del riego por melgas y producción en el cultivo de trigo, encontrando que cuando se selecciona adecuadamente el gasto de riego unitario por melga, se obtiene eficiencia de aplicación y uniformidad similares a las obtenidas teóricamente (Rendón *et al.*, 1990). Además el rendimiento es similar al obtenido experimentalmente en estudios de funciones de respuesta al régimen de humedad en el suelo.

El modelo de simulación SIRMOD, provee capacidad analítica con respecto a todas las variables que afectan el diseño y manejo del riego superficial (Walker, 1985). No simplifica ninguna de las variables pero a cambio simula la respuesta del sistema a los valores que se le introducen a cada variable. Se identifica así, un óptimo diseño y manejo del riego.

A través del Modelo SIRMOD, se identifican rápidamente las modificaciones y/o ajustes que el productor o regador tiene que realizar para mejorar la eficiencia de aplicación del agua (Walker y Skogerboe, 1987). Además comentan que dados los grandes problemas de demanda de agua por los diferentes usuarios y baja disponibilidad del recurso, aunado a los problemas de tipo económico que tiene el mundo hoy, el riego superficial continuará teniendo una mayor atención por los profesionistas y agricultores, para mejorar cada día las prácticas de riego.

Utilizando resultados de experimentos anteriores y aplicando el modelo de simulación SIRMOD para el diseño de riego por gravedad en alfalfa a nivel comercial, en la Comarca Lagunera, por medio del modelo se pudo demostrar que se pueden producir 101 ton/ha de forraje verde con una lámina de riego de 1.89 m, siempre que se considere la pendiente, longitud de la melga o surco y tiempo de riego para cada suelo en especial (Catalán, 1993).

## **II. OBJETIVO**

Seleccionar el programa de simulación que permita predecir mejor la eficiencia de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de Distribución (UD).

## **III. HIPÓTESIS**

Ambos programas predicen con similar precisión, las eficiencias de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD), en riego superficial.



## IV. REVISION DE LITERATURA

### 4.1 Riego por gravedad.

El riego superficial o gravedad consiste en la inundación controlada de la superficie del terreno la cual se divide en unidades de riego limitadas por bordos que restringen el flujo lateral del agua, sobresaliendo los métodos de riego por melgas y surcos. Existen dos características generales que distinguen al riego por gravedad: a) el flujo del agua tiene una superficie libre que responde al gradiente gravitacional; b) la superficie del terreno sirve como medio de transporte y distribución del agua (FAO, 1974). En un evento de riego por gravedad se distinguen cuatro fases:

- a) Avance: inicia con la aplicación del gasto y finaliza cuando el frente del agua alcanza el extremo final de la superficie de riego.
- b) Almacenamiento: inicia cuando el frente de agua alcanza el extremo final de la superficie de riego y finaliza cuando cesa el gasto.
- c) Consumo: inicia cuando se suspende el gasto y finaliza cuando alguna parte de la superficie queda expuesta al aire; durante esta fase disminuye el almacenamiento por efecto de la infiltración o por escurrimiento.
- d) Recesión: se caracteriza por una exposición progresiva de la superficie de riego al aire; idealmente comienza cuando reaparece expuesta la superficie del suelo en el extremo inicial de la superficie de riego, continua hacia el extremo final de dicha superficie a medida que el agua se infiltra o escurre, y termina cuando el agua almacenada en el extremo final se absorbe completamente (Walter, 1987).

### 4.2 Diseño del riego.

El diseño del riego por gravedad consiste en la selección de la longitud, ancho de melga o espaciamiento del surco, pendiente longitudinal, así como la dirección y gasto de riego, que permitan distribuir uniformemente la lámina de riego previamente calculada.

Los terrenos aptos para regarse por melgas presentan dos pendientes, una de las cuales es muy pequeña o nula. La dirección del riego se selecciona haciéndola coincidir con la dirección de la máxima pendiente.

Para la pendiente longitudinal de la melga o surco se elige de acuerdo a la pendiente natural del terreno, pues modificarla implica aumentar el volumen de tierra por mover y por lo tanto, los costos de nivelación son mayores, además de que se aumenta la profundidad de los cortes, lo cual no es recomendable desde el punto de vista agronómico, ya que se elimina la capa fértil del suelo. El rango de pendientes recomendadas en la práctica, de 0.05% a 0.5%, no influye significativamente en el diseño (Rendón).

### **4.3 Metodologías de diseño**

En el diseño del riego por gravedad se pueden utilizar dos métodos: a) pruebas de riego y b) modelos matemáticos físicamente fundamentados.

#### **4.3.1 Pruebas de riego.**

Las pruebas de riego consisten en experimentos de campo donde las variables experimentales son el gasto de riego unitario, longitud de la melga o surco y tipo de suelo. Con base en los resultados de los experimentos, para cada tipo de suelo se obtiene una relación empírica en donde se representan la combinación gasto unitario-longitud que permita aplicar uniformemente una cierta lamina de riego. Las desventajas de ellas es que son tardadas, costosas y se requiere de varias repeticiones.

#### **4.3.2 Modelos matemáticos**

Dependiendo del grado de simplificaciones hechas a las ecuaciones iniciales básicas, hay esencialmente, cuatro grandes grupos de modelos disponibles que permiten simular el escurrimiento de agua sobre la superficie del suelo, que han sido utilizados por varios investigadores. En orden decreciente de complejidad, son los siguientes: Hidrodinámico, Cero Inercia, Onda cinemática y

Balance volumétrico (Elliott y Walter, 1982; Strelkoff y Souza, 1984; Rayej y Wallender, 1985; Rayej y Wallender, 1987; Rayej y Walender, 1988; Smerdenson *et al.*, 1988; Wallender y Rayej, 1980; Wallender y Yokokura, 1991; Soares, 1998).

#### 4.3.2.1 Modelo Hidrodinámico total

El hidrodinámico es el más completo de los modelos existentes, ya que no se hacen simplificaciones y se basa en la solución de las ecuaciones 1 y 2 conocidas en el flujo de agua en canales abiertos como ecuaciones de Saint-Venant (CHOW, 1959, WALKER y SKOGERBOE, 1987).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f - \frac{v}{gA} \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Donde:

A = Área de sección transversal de escurrimiento, L<sup>2</sup>;

T = Tiempo acumulado, T;

V = Velocidad media de flujo, L/T;

x = Distancia desde la entrada del surco, L;

Z = Volumen infiltrado acumulado por unidad de longitud, L<sup>3</sup>/L;

t = Tiempo de oportunidad de infiltración, T;

g = Aceleración de gravedad, L/T<sup>2</sup>;

y = Profundidad de flujo, L;

S<sub>0</sub> = Pendiente media longitudinal de flujo, L/L;

S<sub>f</sub> = Pendiente de la línea de energía. L/L;

c' = Constante numérica resultante de la derivación, en el uso del principio de la conservación de cantidad de movimiento o de energía, adimensional.

Las ecuaciones 1 y 2 corresponden respectivamente a las ecuaciones de conservación de masa o continuidad y conservación de energía o momentum; son de tipo diferencial parcial de primer orden, una dimensión, no lineal e hiperbólicas. WALKER y SKOGERBOE (1987) desarrollaron dos procedimientos para solucionar numéricamente estas ecuaciones utilizando el método de las características (BASSETT, 1972; KINCAID et. al., 1972; BASSETT y FITZSIMMONS, 1976; KATAPODES y STRELKOFF, 1977) y el método de integración eulereana (SOUZA, 1981).

#### 4.3.2.2 Modelo Cero inercia

A partir del modelo hidrodinámico STRELKOFF Y KATAPODES (1977) partieron de unas determinaciones para su simplificación, en la que en vista de los valores bajos de velocidad decidieron ignorar los términos de inercia, llegando así al modelo de Cero Inercia, descrito en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f - \frac{v}{gA} \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f = 0 \quad (4)$$

Las simplificaciones que llegan al modelo de Cero inercia fueron hechas inicialmente por STRELKOFF Y KATAPODES (1977) y posteriormente por CLEMMENS (1978), en las que consideraron que para valores del número de Froude menores a 0.2, los términos eliminados de la ecuación de la energía no comprometían la precisión. Estas suposiciones fueron luego comprobadas por los autores de forma experimental y comparando simulaciones hechas con el modelo hidrodinámico.

#### 4.3.2.3 Modelo Onda Cinemática.

El modelo denominado de Onda cinemática conserva la ecuación de continuidad, pero simplifica al máximo la de energía, llegando a la siguiente expresión:

$$S_0 = S_f \quad (5)$$

Es necesario combinar las ecuaciones de continuidad y de energía (Ec. 5) para lograr representar adecuadamente los procesos que se desarrollan en el riego por superficie. En el modelo de onda cinemática se parte del supuesto que el flujo es permanente y uniforme.

#### 4.3.2.4 Modelo de Balance Volumétrico.

Otro de los modelos de simulación de riego por superficie es el de Balance Volumétrico y corresponde al modelo más simple; ha sido descrito y utilizado por diferentes investigadores en la simulación del avance del riego por superficie (WALLENDER y RAYEJ, 1987; WALKER Y SKOGERBOE, 1987, y TAFUR et. al., 2000). El modelo expresa el balance de masa entre los volúmenes de agua aplicado, almacenado en la superficie de flujo y el infiltrado durante la fase de avance. De esta forma el modelo establece que el volumen de agua aplicado es igual al volumen de agua en la superficie más el volumen de agua infiltrada. La expresión general del modelo aplicado a surcos o melgas sería:

$$V_{ap} = V_s + V_i \quad (6)$$

Donde:

$V_{ap}$  = Volumen aplicado

$V_s$  = Volumen superficial

$V_i$  = Volumen infiltrado.

## 4.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN DEL RIEGO POR SUPERFICIE.

### 4.4.1 Software de Simulación RIGRAV.

El modelo de simulación RIGRAV, (Rendón et al, 1990), generado por el IMTA utiliza la función de infiltración de Green-Ampt, (1911).

$$I = K_s t + \lambda \ln \left( 1 + \frac{I}{\lambda} \right) \quad (7)$$

Donde:

$I$  = Velocidad de infiltración

$$\lambda = (h + h_f)(\theta_s - \theta_0)$$

$K_s$  = Conductividad hidráulica a saturación

$\theta_0$  = Contenido de humedad inicial

$\theta_s$  = Contenido de humedad final

$h$  = Tirante de agua en el surco

$h_f$  = Succión en el frente de humedecimiento

EL modelo se basa en simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards. Una de estas simplificaciones consiste en presentar la ecuación de la conservación de la masa de manera integral, que se escribe:

$$QT = \int_0^S A k(x, T) dx + \int_0^S A(x, T) dx \quad (8)$$

Donde:

$S$  = Posición del frente de avance en el tiempo [L]

$T$  = Tiempo

$L$  = Longitud del surco, medida a partir de la cabecera [L]

$Ah$  = Área hidráulica de la sección transversal [ $L^2$ ]

$Ai$  = Área de la sección transversal del escurrimiento subterráneo [ $L^2$ ]

Si se considera que el área hidráulica del escurrimiento superficial es constante en espacio y tiempo, y el suelo es homogéneo, entonces la ecuación (8) se escribe:

$$Q_s T = \overline{Ah} S(T) + \int_0^S Ai(T_0) dx \quad (9)$$

Donde:

$\overline{Ah}$  = Valor medio del área hidráulica

$T_0$  = Tiempo de infiltración definido como:  $T_0 = T - T_x$

$T_x$  = Tiempo que tarda en llegar el avance a un punto situado a una distancia  $x$

Se divide la ecuación (9) entre el perímetro mojado se tiene:

$$Q_u T = \overline{Rh} S(T) + \int_0^S Ri(T_0) dx \quad (10)$$

Donde:

$\overline{Rh}$  = Radio hidráulico medio del escurrimiento superficial [L]

$Ri$  = Lámina infiltrada media en el perímetro mojado [L]

#### 4.4.2 Software de Simulación SIRMOD.

El modelo de simulación SIRMOD (Walker, et al 1987) fue creado por Utah State University en los Estados Unidos de Norteamérica. En el modelo se presentan tres opciones de solución a las ecuaciones de Saint-Venant (1871), siendo: el modelo hidrodinámico total, de cero inercia y el de la onda cinemática.

Este programa de cómputo utiliza la relación de Kostiaikov-Lewis para describir la infiltración acumulada para los regímenes de flujo continuo e intermitente, tal relación es:

$$Z = K\tau^a + f_0\tau \quad (11)$$

Donde:

$k$  = Constante empírica [ $L^3T^{-a}T^{-1}$ ]

$a$  = Exponente empírico [Adim]

$f_0$  = Velocidad de la infiltración básica [ $L^3T^{-1}L^{-1}$ ]

#### 4.5 Evaluación del riego por gravedad

La evaluación del riego por gravedad consiste en determinaciones de campo para obtener parámetros que permitan calcular la Uniformidad de Distribución, eficiencias de aplicación y requerimiento, se definen como sigue (ICID, 1978):

##### 4.5.1 Uniformidad de Distribución.

En riego parcelario, lo ideal es que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua, lo que equivale a aplicar una lámina uniforme en toda el área de la parcela. Para evaluar esta uniformidad en la distribución de la lámina infiltrada se utiliza el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC) se calcula por:

$$CU_C = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |L_i - L_m|}{NL_m} \right) 100 \quad (12)$$

Donde:

$L_i$  = Lámina infiltrada a una distancia dada del surco o melga,

$L_m$  = Lámina promedio de riego infiltrada

$N$  = Número de valores considerados



Generalmente se considera que un CUC mayor o igual a 0.80 es aceptable para el riego por gravedad.

#### 4.5.2 Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación  $E_a$  se expresa como:

$$E_a = \left( \frac{L_{ir}}{L_t} \right) 100 \quad (13)$$

Donde:

$L_{ir}$  = Lámina almacenada en la zona radicular (L)

$L_t$  = Lámina total aplicada a la parcela (L).

Este índice representa generalmente la pérdida de agua por debajo del horizonte de raíces o percolación profunda, y esta en relación con la infiltración, tipo de suelo, tiempo de aplicación de la lámina del riego y tiempo en que tarda el agua de la cabecera al final del surco o melga. En la estimación de este parámetro de eficiencia no se incluyen las pérdidas de agua debido a la infiltración en la red de conducción que lleva el agua al campo

#### 4.5.3 Eficiencia de requerimiento de riego

La eficiencia de requerimiento de riego indica la manera en que se están satisfaciendo las necesidades de agua del cultivo, ( $E_r$ ) esta dada por:

$$E_r = \left( \frac{L_{ir}}{L_r} \right) 100 \quad (14)$$

Donde:

$L_r$  = Lámina requerida por el cultivo (L)

#### **4.6 Trabajos realizados utilizando los modelos de simulación para predecir el riego por superficie**

Utilizando el programa SIRMOD en la Habana Cuba, en evaluaciones de riego para surcos realizadas en el cultivo de la caña de azúcar para diferentes condiciones de suelo y topografía, en el período comprendido entre 1989 y 1998, se obtuvieron longitudes de surcos entre 120 y 250 m, para espaciamiento entre surcos de riego de 1.6 m, longitudes de surcos entre 250 y 333 m, para espaciamiento entre surcos de riego de 3.2 m, con gastos de entrega de 2 lps, valores de eficiencia de aplicación ( $E_a$ ) entre 61 y 87 %, de almacenamiento ( $E_{al}$ ) entre 95 y 100 %, de uniformidad de distribución entre 69 y 81 % y valores de productividad del riego entre 4.5 y 8.1 ha / hombre / jornada (Cabrera, 1999).

En una calibración realizada a los modelos de simulación SIRMOD y RIGRAV, encontró que, utilizando los modelos de simulación para diseñar el riego y aplicando el paquete tecnológico del INIFAP-CALERA, se aplicó una lámina total de 23 cm ha<sup>-1</sup> de agua, para producir 3 ton ha<sup>-1</sup> de frijol, mientras que en una parcela testigo se aplicaron 57 cm ha<sup>-1</sup> para producir solamente 1.5 ton ha<sup>-1</sup> del grano (Alvarado *et al.* 2001).

Utilizando resultados de experimentos anteriores y aplicando el modelo de simulación SIRMOD para el diseño de alfalfa a nivel comercial en la Comarca Lagunera, por medio del modelo pudo demostrar que se puede producir 101 ton / ha de forraje verde con una lámina de riego de 1.89 m, siempre que se considere la pendiente, longitud de la melga o surco y tiempos de riego para cada suelo en especial (Catalán, 1993).

Utilizando el modelo SIRMOD, se demostró un incremento de la eficiencia de riego global a nivel parcelario y de producción del cultivo de un 28 % (de 64 a 92% y de 32 a 45 ton ha<sup>-1</sup> de maíz, respectivamente), esto es debido a que el perfil de humedecimiento ocasionado por el modelo presentó un comportamiento de riego más homogéneo en comparación con el manejo anterior del riego. El avance de riego a nivel parcelario se incrementó de 0.4 ha día<sup>-1</sup> a 2.3 ha día<sup>-1</sup>, esto equivale a un incremento del 575 %, lo cual indica que el tandeo de riego se

reducirá evitando estrés del cultivo en periodos de máxima demanda como lo son los meses de mayo, junio y julio. El consumo de energía por hectárea disminuyó en un 77 %, esto se debe a que se obtuvo una mejor distribución del agua y un mayor avance del riego (Ramírez, 2002).

## **V. MATERIALES Y MÉTODOS**

Este trabajo se realizó en tres localidades de la región lagunera, Santa Bárbara (Nazas Dgo), las Mercedes (San Pedro Coah.) y San Ramiro (Fco. I. Madero Coah.). También se utilizó la información de campo, recabada por Luna (1983), de las localidades del ejido La Purísima (Matamoros Coah.) y el área experimental CENID – RASPA (Gómez Palacio Dgo). En cada predio en estudio se realizaron las siguientes actividades: Caracterización físico-química del suelo, evaluación y simulación de las eficiencias de riego, utilizando los programas SIRMOD (Walker, et al 1987), y RIGRAV (Rendón et al, 1990).

### **5.1 Caracterización físico –química del suelo.**

Se obtuvieron tres muestras de suelo para cada sitio muestreado a las profundidades de suelo de 0-30, 30-60, 60-90 y 90-120. Una vez obtenidas las muestras de suelo se formó una sola muestra compuesta para cada profundidad.

Las determinaciones físicas fueron las siguientes: textura, capacidad de campo (CC), punto de marchites permanente (PMP) y densidad aparente (Da), esta ultima se determino utilizando el método de la barrena para toma de muestras inalteradas; las características químicas fueron: pH y conductividad eléctrica (CE).

### **5.2 Evaluación de las eficiencias de riego**

Para evaluar las eficiencias de riego, se realizó una prueba de avance del riego en las condiciones que opera el productor. Se selecciono una melga representativa de cada sitio experimental, a la cual se le determino lo siguiente: humedad del suelo, pendiente, gasto aplicado y tiempo de avance.

### 5.2.1 Determinación de la humedad del suelo

Se tomaron muestras de suelo en cada melga a diferentes profundidades previamente definidas antes y después del riego, las muestras fueron tomadas mediante barrenas y colocadas en botes de aluminio cerrando herméticamente, posteriormente se llevaron al laboratorio para determinar el peso del suelo húmedo, una vez realizado lo anterior las muestras se metieron a la estufa 24 hrs., a una temperatura de 105 °C, después de ese tiempo se obtiene el peso del suelo seco.

El contenido de humedad de las muestras, se determino dividiendo la diferencia de peso de suelo húmedo y peso del suelo seco entre el peso del suelo seco, este contenido de humedad es expresado en porcentaje de suelo seco o con base a volumen como se indica en la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad \text{o} \quad P_s = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100 \quad . \quad (15)$$

Donde =

$P_s$  = Contenido de humedad en peso de suelo seco %

$P_{ss}$  = Peso de suelo seco gr.

$P_{sh}$  = Peso de suelo húmedo gr.

$P_a$  = Peso de agua gr.

### 5.2.2 Determinación de la pendiente.

Una vez seleccionada la melga se mide el largo y ancho, se colocaron estacas a cada 20 m, para formar estaciones a lo largo de la melga, y obtener las lecturas con un nivel fijo de cada estación, para calcular la pendiente promedio y su variación a lo largo de la melga mediante una regresión lineal.

### **5.2.3 Determinación del gasto aplicado.**

El gasto aplicado se determinó utilizando el molinete digital para medir la velocidad, así como el área de la sección de riego.

$$Q=V/A \quad (16)$$

Donde:

V= Velocidad (m/seg)

A= Área (m<sup>2</sup>)

### **5.2.4 Tiempo de avance.**

Con un cronómetro se registro el tiempo en el instante que se abrió la regadera sobre la melga a regar (tiempo de inicio), después se tomaron los tiempos que tardo el agua en llegar a cada estación, hasta la ultima estación, por último se registra el tiempo de corte. El tiempo de avance es hasta que el agua llegue al final de la melga.

### **5.3 Infiltración del suelo.**

La medición de la infiltración del suelo, se realizó mediante el método del doble cilindro, que consiste en utilizar un par de estructuras metálicas en forma de tubo con diferente diámetro que pueden variar de 40 a 60 cm de largo y 30 cm de diámetro, estos deben ser lo suficientemente resistentes para que penetren en el suelo en forma concéntrica, así mismo los cilindros son introducidos en el suelo a una profundidad de 15 cm. La prueba debe realizarse en lugares representativos del área a estudiar.

Una vez instalado, el inicio de la prueba consiste en aplicar agua en el espacio formado por los dos cilindros con el propósito de evitar el movimiento lateral del agua contenida en el cilindro interior, esto es importante ya que se pueden hacer lecturas de la carga de agua que no corresponden a las reales lo

que afecta la prueba. Posteriormente se agrega agua al cilindro interior procurando que la lamina de agua no exceda la carga esperada durante un riego normal que varia de 10 a 20 cm, en ese momento se procede a la toma de datos como es la profundidad de la lamina de agua desde el borde superior del cilindro interior al espejo de agua en dicho cilindro, así mismo es importante registrar la hora de inicio de la observación, durante este proceso se continua tomando tiempos a criterio repetidamente a intervalos cortos al principio (1 min.).

Después se continúa con espacios mas grandes conforme avanza la prueba hasta concluirla. Es importante registrar las lecturas y tiempos respectivos en cada observación, si es necesario recargar agua al cilindro interior debe registrarse la nueva lectura y continuar con el mismo procedimiento hasta alcanzar la infiltración básica del suelo, se recomienda elaborar un formato para la toma de datos. Otra forma de registrar la velocidad de infiltración, es tomar el tiempo de avance en que tarda cada cm de lámina de agua en el suelo.

#### **5.4 Programas de simulación del riego por gravedad.**

Los Programas de simulación evaluados fueron el SIRMOD (Walter *et al.* 1987) y RIGRAV (Rendón *et al.* 1990), en seguida se presentan los datos de entrada y salida para cada programa.

##### **5.4.1 Programa RIGRAV.**

El programa RIGRAV, para simular el riego por gravedad requiere la siguiente información:

- Longitud de la melga o surco (m).
- Pendiente del terreno en el sentido del riego (%).
- Gasto por ancho unitario (l/seg).
- Contenido volumétrico de humedad inicial en el suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).
- Contenido volumétrico de humedad a saturación ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).
- Conductividad hidráulica del suelo a saturación (cm/hora).
- Tiempo de impresión de avance (min).

- Lamina de riego neta (m).
- Coeficiente de rugosidad de Manning ( $m^{-1/3}$  / seg).
- Parámetro hf de la ecuación de infiltración (cm).

Una vez capturados los datos anteriores, los resultados que obtienen son los siguientes:

- Datos generales introducidos.
- Valores numéricos correspondientes a la fase de avance.
- Grafica de la fase de avance.
- Valores numéricos correspondientes al perfil final de la fase de almacenamiento.
- Grafica de la fase de consumo.
- Valores numéricos correspondientes al perfil final de la fase de consumo.
- Valores numéricos correspondientes de la fase de recesion.
- Laminas infiltradas finales.
- Grafica de las láminas infiltradas finales.
- Eficiencia de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD).

#### **5.4.2 Programa SIRMOD II.**

El programa SIRMOD II, para simular el riego por gravedad requiere la siguiente información:

- Pendiente (m/m)
- Longitud de parcela (m)
- Ancho de parcela (m)
- Textura
- Lamina requerida (m)
- Tiempo de avance (min)
- Profundidad máxima (m)
- Gasto unitario (lps)



- Tiempo de corte (min)

Una vez capturados los datos anteriores, los resultados que se obtienen son los siguientes:

- Valores de los parámetros de entrada
- Perfiles de avance/recesion/infiltración.
- Hidrogramas de escorrentía
- Eficiencia de aplicación (Ea), requerimiento (Er) y Uniformidad de distribución (UD).

## 5.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico utilizado para comparar el grado de error de cada uno de los modelos evaluados fue la prueba de ji – cuadrada, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Dato observado} - \text{Dato esperado})^2}{\text{Dato esperado}} \quad (17)$$

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 6.1 Características físico – químicas de los sitios experimentales.

Las características físico –químicas de los sitios seleccionados en la Comarca Lagunera se presentan en los cuadros 1,2, 3, 4 y 5.

En el cuadro 1, se presentan las características físico –químicas del predio Santa Bárbara a una profundidad de 90 cm. Se observa que en el estrato 0 – 30 se tiene una textura franca, y en los estratos 30 – 60, 60 – 90, se tiene una textura franco arcillosa, el pH se encuentra en un rango de 8.08 a 8.58, y la CE fluctúa de 2.01 a 2.53 ds/m, con una densidad aparente que varía desde 1.3 a 1.4 gr/cm<sup>3</sup>, en los diferentes estratos.

Cuadro 1.- Características Físico - Químicas del predio Santa Bárbara

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)		
	0 - 30	30 – 60	60 - 90
pH	8.08	8.52	8.58
CE (ds/m)	2.38	2.53	2.01
M.O (%)	1.49	0.34	0.48
Arena (%)	41	53	41
Limo (%)	44	36	7
Arcilla (%)	41	48	11
Textura	franco	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso
CC (%)	26.4	19.2	22.5
PMP (%)	12.8	7.5	9.8
Da (gr/cm <sup>3</sup> )	1.4	1.3	1.4

En el cuadro 2, se presentan las características físico –químicas del predio San Ramiro, a una profundidad de 120 cm. La textura predominante es la franca, con un rango de pH de 8.13 a 8.58, la CE varía de 1.7 a 2.76 ds/m, el contenido de M.O se encuentra en un rango de 0.73 a 1.07 %, con una densidad aparente que varía desde 1.2 a 1.4 gr/ cm<sup>3</sup> para los diferentes estratos

Cuadro 2.- Características Físico - Químicas del predio San Ramiro

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.48</b>	<b>8.41</b>	<b>8.58</b>	<b>8.13</b>
<b>CE (ds/m)</b>	1.81	1.7	2.76	1.47
<b>M.O (%)</b>	0.94	0.87	1.07	0.73
<b>Arena (%)</b>	61	43	33	27
<b>Limo (%)</b>	25	39	45	47
<b>Arcilla (%)</b>	14	18	22	26
<b>Textura</b>	Franco	Franco	Franco	Franco
<b>CC (%)</b>	22.5	25.5	29.7	32.5
<b>PMP (%)</b>	11.2	13.2	15.4	17.5
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.2	1.4	1.3	1.3

En el cuadro 3, se presentan las características físico –químicas del predio Las Mercedes, a una profundidad de 120 cm. Se presentan un perfil de suelo con texturas alternadas franco arcillosa y franca, con un rango de CE de 0.39 hasta 1.62 ds/m, el contenido de M.O varia desde 0.6 hasta 1.2 %, y la densidad aparente se encontró de 1.2 a 1.3 gr/cm<sup>3</sup>, para los diferentes estratos.

Cuadro 3.- Características Físico - Químicas del predio Las Mercedes

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>CE (ds/m)</b>	0.39	1.56	1.62	1.3
<b>M.O (%)</b>	1.2	0.7	0.7	0.6
<b>Arena (%)</b>	35	49	41	17
<b>Limo (%)</b>	29	25	29	39
<b>Arcilla (%)</b>	36	26	30	44
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Franco	Fco. Arcilloso	Franco
<b>CC (%)</b>	36.5	28.9	31.2	40.7
<b>PMP (%)</b>	22.3	16.7	18.6	25.6
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.2	1.2	1.3	1.3

En el cuadro 4, se presentan las características físico –químicas del predio La Purísima, a una profundidad de 120 cm. La textura predominante es franco arcillosa, con rangos de pH de 8.1 a 8.6, la CE varía de 0.54 a 3.5 ds/m, con una densidad aparente de 1.23 a 1.37 g/cm<sup>3</sup>, para los diferentes estratos.

Cuadro 4.- Características Físico - Químicas del predio La Purísima

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.6</b>	<b>8.4</b>	<b>8.1</b>	<b>8.1</b>
<b>CE (ds/m)</b>	0.58	0.54	2.5	3.5
<b>M.O (%)</b>	0.89	0.27	0.27	0.21
<b>Arena (%)</b>	30.1	38.1	24.1	30.1
<b>Limo (%)</b>	36	32	40	32
<b>Arcilla (%)</b>	33.8	29.8	35.8	29.8
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso
<b>CC (%)</b>	32.3	32.3	33.8	34.7
<b>PMP (%)</b>	15.7	15.7	18	18.1
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.23	1.37	1.25	1.28

En el cuadro 5, se presentan las características físico –químicas del area experimental CENID-RASPA, a una profundidad de 120 cm. Se presenta un perfil de suelo con texturas alternadas franco arcillosa y franca, los contenidos de pH se encuentran en un rango de 8.4 a 8.6, la CE fluctúa de 0.36 a 0.56 ds/m y la densidad aparente varía de 1.27 a 1.4 g/cm<sup>3</sup>.

Cuadro 5.- Características Físico - Químicas del área experimental CENID RASPA

Características físico - químicas	Profundidad del suelo (cm)			
	0- 30	30 - 60	60 - 90	90 – 120
<b>pH</b>	<b>8.6</b>	<b>8.4</b>	<b>8.5</b>	<b>8.6</b>
<b>CE (ds/m)</b>	0.56	0.36	0.40	0.45
<b>M.O (%)</b>	0.96	0	0.69	0.14
<b>Arena (%)</b>	37.4	43.4	45.4	33.4
<b>Limo (%)</b>	28	26	32	42
<b>Arcilla (%)</b>	34.5	30.5	22.5	24.5
<b>Textura</b>	Fco. Arcilloso	Fco. Arcilloso	Franco	Franco
<b>CC (%)</b>	33.7	31.1	26.1	28
<b>PMP (%)</b>	16	15.2	11.3	14.6
<b>Da (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	1.32	1.4	1.27	1.33

## 6.2 Evaluaciones de las eficiencias de riego en campo

En el cuadro 6, se presentan las evaluaciones hechas en campo, en el se describe las variables obtenidas de cada predio seleccionado, las cuales son, el gasto aplicado (Q), longitud de melga (Lm), ancho de melga (Am), Pendiente (So), Tiempo de riego (Tr), Volumen aplicado (Va), Lamina bruta (Lb), Lamina neta (Ln), Lamina requerida (Lr) y la textura del suelo.

Cuadro 6. Datos de campo de las pruebas de riego de los predios

Datos de campo	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID - RASPA
Gasto aplicado (lps)	50.0	40.2	113.2	36.0	18.0
Longitud de melga (m)	193	174	132	135	105
Ancho de melga (m)	16.8	20.5	21.4	10.0	8.0
Superficie (m <sup>2</sup> )	3242.4	3567.0	2824.8	1350.0	840.0
Pendiente (%)	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05
Tiempo de riego (min)	198	240	130	73	178
Volumen aplicado (m <sup>3</sup> )	594.0	577.4	603.1	157.7	192.2
Lamina bruta (cm)	18.0	16.0	21.0	12.0	23.0
Lamina neta (cm)	16.2	14.4	18.9	10.8	20.7
Lamina requerida a 90 cm.	11.4	13.8	3.3	20.4	15.2
Textura	franco	Franco arcilloso	Franco arenoso	Migajón arcilloso	Migajón arcilloso

## 6.3 Eficiencias de riego obtenidas en campo.

En base al gasto utilizado, ancho de melga, longitud de melga y pendiente del terreno se obtuvieron las eficiencias de aplicación (Ea), requerimiento (Er), uniformidad de distribución del agua (UD), Tiempo de avance (Ta) y gasto unitario (Qu) obtenidos en la evaluación de campo de cada predio, presentados en el cuadro 7.

La eficiencia de aplicación (Ea), varia en un rango del 36 – 79 %, la localidad las Mercedes presenta la eficiencia mas alta (79 %), y la localidad el CENID – RASPA la mas baja. La eficiencia de requerimiento (Er), varia en un rango del 38 – 100 %, presentando la localidad Santa Bárbara la mayor eficiencia

(100 %) y la Purísima la mas baja (38 %). La Uniformidad de Distribución varía en un rango del 63 – 90 %, siendo las Mercedes la que presentó la mayor Uniformidad de Distribución.

Cuadro 7.- Eficiencias de riego obtenidas de las pruebas de riego para cada localidad.

CAMPO	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga)	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	128	211	89	73	178
Ea (%)	52	79	50	66	36
Er (%)	84	70	100	38	54
UD (%)	63.6	90	77	71	63

Una vez obtenidas las eficiencias de riego en campo mostradas en el cuadro anterior, se procedió a utilizar los modelos de simulación RIGRAV y SIRMOD para simular el riego por gravedad.

#### 6.4 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo RIGRAV.

En el cuadro 8, se presentan las eficiencias obtenidas por el modelo de simulación RIGRAV, en base a los datos registrados en las evaluaciones de campo.

Este modelo sobreestima las eficiencias de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución, sin embargo subestima los tiempo de avance.

Cuadro 8.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (RIGRAV, 1987)

RIGRAV	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga).	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	97.66	79	32	33	72
Ea (%)	90	88	77	100	100
Er (%)	100	100	100	90	57.38
UD (%)	97	96	91	92	95.98

## 6.5 Eficiencias de riego obtenidas utilizando el modelo SIRMOD.

En el cuadro 9, se presentan las eficiencias obtenidas por el modelo de simulación SIRMOD, en base a los datos registrados en las evaluaciones de campo.

Al igual que el RIGRAV, el SIRMOD sobreestima las eficiencias de aplicación, requerimiento, Uniformidad de Distribución y el tiempo de avance.

Cuadro 9.- Eficiencias de riego obtenidas al utilizar el modelo de simulación (SIRMOD, 1986).

SIRMOD	San Ramiro	Las Mercedes	Santa Bárbara	La Purísima	CENID-RASPA
Qu (lps/m de ancho de melga)	2.98	1.96	5.29	3.6	2.25
Ta (min.)	130	217	77.9	72	181.8
Ea (%)	97.40	100	11	100	67.6
Er (%)	97.75	73.67	100	57.38	100
UD (%)	93.92	95	89	95.98	98.36

En el cuadro 10 se muestra el análisis estadístico, en donde se hace una comparación de los programas de simulación en base a los datos de campo. Como se puede observar para los predios: Las Mercedes con textura franco arcilloso, San Ramiro con textura franco, La Purísima y el área experimental CENID RASPA, con textura migajon arcilloso, el programa que mejor simuló el riego por gravedad en base a los datos de campo fue el SIRMOD, y para el predio Santa Bárbara con textura franco arenoso el programa que mejor simuló el riego en base a los datos de campo fue el RIGRAV.

Cuadro 10.- Análisis estadístico de los programas de simulación.

				Análisis	estadístico
				X2	
San Ramiro	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	128	97.66	130	9.43	0.03
Ea	52	90	97.4	16	21.16
Er	84	100	97.75	2.58	1.93
UD	63.6	97	93.92	11.50	9.79
				<b>39</b>	<b>33</b>
Las Mercedes	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	211	79	217	220.56	0.16
Ea	79	88	100	0.92	4.41
Er	70	100	73.67	9.00	0.18
UD	90	96	95	0.37	0.26
				<b>231</b>	<b>5.15</b>
Sta. Bárbara	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	89	32	77.9	101.53	1.58
Ea	50	77	11	9.46	138.27
Er	100	100	100	0	0
UD	77	91	89	2.154	1.62
				<b>113</b>	<b>141</b>
La Purísima	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	73	33	72	48.48	1.0
Ea	66	100	100	11.56	11.56
Er	38	90	57.38	30.04	6.55
UD	71	92	95.98	4.793	6.50
				94.88	46.83
				<b>95</b>	<b>25</b>
Cenid - Raspa	Campo	RIGRAV	SIRMOD	RIGRAV	SIRMOD
Ta	178	30.3	181.8	719.98	0.08
Ea	36	99	67.6	40.09	14.77
Er	54	89	100	13.76	21.16
UD	63	88	98.36	7.102	12.71
				<b>781</b>	<b>49</b>



Cabe señalar que para el modelo RIGRAV, para una adecuada calibración, es necesario tener datos confiables del avance del agua y un buen criterio para seleccionar los parámetros de diseño  $K_s$  y  $h_f$ . Se encontró que el modelo, con pendientes menores de 0.03 % afecta la ejecución del programa.

Por su parte, para el modelo SIRMOD se requiere más trabajo de campo, ya que el número de variables que intervienen en tal modelo son muchas, pero por esta razón se puede analizar por separado, una a una, las variables que interviene en el diseño del riego, además éste modelo proporciona una ventana de ayuda donde muestra una familia de curvas de los parámetros  $a, k$  y  $f_0$  de la función de infiltración de kostiakov-Lewis. Para diferentes tipos de suelo. El programa tiene la capacidad de hacer un ajuste en los parámetros de infiltración en base al tiempo de avance (Elliot y Walter 1982).

## **VII. CONCLUSIONES**

Ambos programas sobreestiman la eficiencia de aplicación, requerimiento y Uniformidad de Distribución.

El tiempo de avance es sobreestimado por el SIRMOD, y subestimado por RIGRAV.

El SIRMOD, predice mejor las eficiencias de riego, en suelos de texturas franco, migajon arcilloso y franco arcillosos.

El RIGRAV, predice mejor las eficiencias de riego, en suelos de textura franco arenoso.

El programa que mejor predice las eficiencias de riego fue el SIRMOD.

Ambos modelos requieren las funciones de infiltración de las pruebas de campo, para mejorar las estimaciones de las eficiencias de riego.

## **VIII. RECOMENDACIONES**

Se recomienda que al realizar trabajos posteriores a este, se realice un análisis con varias repeticiones en el mismo predio a evaluar.

## IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado M. P., Mojarro D. F., González T. J. 2001. Calibración in Situ de Dos Modelos de Simulación para el Diseño de Riego Superficial en el D.R. 034 Zacatecas. Página de Internet  
<http://www.ciu.reduaz.mx/investigacion/Ingenieria/TI06.htm>.
- Águila, F. 1997. Alternativa tecnológica y organizacional para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Cabrera, R. 1999. Consideraciones sobre la tecnología del riego superficial en caña de azúcar. Nota técnica. INICA. La Habana, Cuba.
- Catalán V. E. (1998). Guías de Riego (Caso Región Lagunera). CENID-RASPA-INIFAP
- Chow, V. T. Open channel hydraulics. Tokio: Mc Graw Hill International Book Company. 1959, 680 p.
- FAO. 1974. Surface irrigation, by L.J. Booher. Agricultural Development Paper 95. Rome. 160p.
- García, S. 1970. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la republica mexicana). Instituto de Geografía de la UNAM, para la Comisión de estudios del territorio nacional. 235 p.
- García R. M. 2000. Análisis de Escenarios en Riego por Superficie en Melgas Basados en un Modelo de Simulación. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. Pág. 28-36.

KATAPODES, N. D. Y STRELKOFF, T. Hydrodynamics of border irrigation complete model. In: Journal of irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1977 103 (IR3): 309 – 324.

Manual de Riego. 1990. Ed. Agropromizdat, Moscú, URRS, pp. 27-44 (en ruso).

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., México.

Ramírez, H. E. 2002. Análisis de escenarios basados en un modelo de simulación para el diseño de un sistema de riego por superficie. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón, Coahuila. Pág. 20-34.

Luna, D. E. 1987. Evaluación de la eficiencia y uniformidad del riego de presiembra en melgas en la Región Lagunera (Coah. Dgo.) Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo Coah.

Rendón et al. Diseño simplificado de riego por gravedad. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec Morelos, México

Rojas P. L., Ramírez, R. L. 1998. Sistemas de Riego por Superficie. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

SAS Institute Inc. 1999. SAS/STAT User's guide, Version 6, Fourth Edition Volume 2.

SOUZA, F. Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation. (pH.D Dissertation). Davis, University of California. 1981. STRELKOFF Y KATAPODES, 1977

- STRELKOFF, T. Y KATAPODES, N. D. Border irrigation hydraulics with zero inertia. In: Journal of irrigation and Drainage engineering, ASCE, 1977 103 (3): 325-342.
- TAFUR, H; ROJAS, H. y GONZÁLEZ, C. El modelo del balance de volumen en la simulación del riego por superficie. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, 2000.
- W. R. Walker. 1986. SIRMOD. Software for the hydraulic of overland flow analysis based on kinematic-wave, zero-inertia or full hydrodynamic. Biological and irrigation engineering. Utah State University.
- WALKER, W. R. y SKOGERBOE, G. V. Surface irrigation: theory and practice. New Jersey: Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1987, 386p.
- WALLENDER, W. W. y RAYEJ, M. Economic optimization of furrow irrigation with uniform and non-uniform soil. In: Transaction of the ASAE, 1987 30 (5): 1425-1429.
- Wynn R. Walker, Gaylord V. Skogerboe. 1987. Surface irrigation theory and practice. Utah State University.