

**ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL MODELO
HIDRODINÁMICO DEL RIEGO POR SUPERFICIE EN
LA COMARCA LAGUNERA**

GERARDO DELGADO RAMÍREZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS



UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

TORREÓN COAH, MÉXICO. MARZO 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL MODELO HIDRODINÁMICO
DEL RIEGO POR SUPERFICIE EN LA COMARCA LAGUNERA
TESIS**

POR

GERARDO DELGADO RAMÍREZ

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y
aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS

Asesor Principal:

Dr. Vicente de Paul Álvarez Reyna.

Asesor:

M.C. Carlos Efrén Ramírez Contreras.

Asesor:

M.C. Federico Vega Sotelo.

Asesor:

Dr. Juan Estrada Ávalos.

Dr. Pedro Antonio Robles Trillo.
Jefe del Departamento de Postgrado

Dr. Fernando Ruiz Zarate.
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mi padre “DIOS” por darme la oportunidad de terminar y presentar este trabajo de investigación, también por brindarme la dicha de seguir adelante y realizar mis metas, por enseñarme el camino correcto que debo de seguir para ser un hombre de bien.

A mi “ALMA MATER” por darme la oportunidad y brindar el conocimiento para lograr mis estudios profesionales, así como el crecimiento personal.

Al Dr. Juan Estrada Ávalos por su apoyo y asesoría en la elaboración de este trabajo, además por la confianza demostrada hacía mi persona en el ámbito profesional y personal, gracias por todo su apoyo espero nunca defraudarlo “DOC”.

A mis asesores: Dr. Vicente de Paúl Álvarez, M.C. Carlos Efrén Ramírez Contreras y M.C. Federico Vega Sotelo, por sus grandes enseñanzas y aportaciones para la realización de este trabajo de investigación, así como la revisión del mismo.

A todas aquellas personas que ayudaron y estuvieron presentes a lo largo de este trabajo de investigación, sobre todo a mis compañeros de trabajo: Antonio, Osbaldo, Jaime y Diego, de todo corazón gracias.

DEDICATORIAS

A mi Familia:

A mis Padres “Pablo y Margarita”, por darme la vida, por guiarme por el camino del bien, porque ustedes me enseñaron que el único camino para seguir adelante es el de trabajar y ser perseverante, espero que donde quiera que se encuentren se sientan orgullosos de mí.

A mi esposa “Laura”, por apoyarme en todas mis decisiones personales y profesionales, por creer en mí, por estar conmigo en las buenas y en las malas, eres mi principal motivación para conseguir mis metas.

A mi hermana “Carmen” por apoyarme incondicionalmente en todo, eres el respaldo, eres el apoyo al no estar mis padres.

A mis tíos “Tony y Lupita” por todo su cariño que tienen por mí, y por brindarme siempre su apoyo en toda mi carrera profesional.

COMPENDIO

ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO HIDRODINÁMICO DEL RIEGO POR SUPERFICIE EN LA COMARCA LAGUNERA

POR
GERARDO DELGADO RAMÍREZ

MAESTRÍA EN
CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
TORREÓN COAH. MARZO DE 2011.

Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna – Asesor-

Palabras clave: Sistemas de riego por superficie, Modelo hidrodinámico, Sesgo, Ajuste.

Actualmente, se han diseñado e implementado una serie de recomendaciones técnicas encaminadas a incrementar la eficiencia del riego superficial en alrededor de 7 mil 200 ha en la zona agrícola de la Región Lagunera, en los límites de los estados de Durango y Coahuila. A nivel parcelario, estas recomendaciones se fundamentan primordialmente en la teoría del modelo hidrodinámico y las variables que resultan de éste una vez realizados los ajustes correspondientes (largo y ancho de melga, pendiente y

gasto unitario). Sin embargo, de acuerdo a lo observado en campo, existe un sesgo entre las eficiencias de riego proyectadas, y observadas en campo una vez implementadas las recomendaciones.

En el presente trabajo se plantea como objetivo obtener una función de ajuste que permita prever el sesgo entre la eficiencia de riego proyectada y la observada en campo. Así, se evaluaron siete predios agrícolas sujetos a riego superficial, ubicados en la Región Lagunera de Coahuila, con características similares de tipo de suelo y cultivo (alfalfa); y con dos esquemas de distribución del agua de riego: canal revestido y válvula alfalfera.

Los riegos se evaluaron antes y después de la aplicación de la recomendación (diseño de melga), con el fin de observar e identificar el sesgo entre las eficiencias de riego proyectadas y las obtenidas en campo.

ABSTRACT

**ANALYSIS OF THE MODEL HYDRODYNAMIC MATHEMATIC
OF THE IRRIGATION FOR SURFACE IN THE REGION
LAGUNERA**

BY

GERARDO DELGADO RAMÍREZ

**AGRARIAN CIENCIAS MASTERSHIP
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
TORREÓN COAH. MARCH 2011.**

Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna – Advisor-

Key words: Systems of irrigation for surface, Hydrodynamic model, Bias, Adjustment.

Actually, 7200 have been designed you have of the Region Lagunera, with regard to the irrigation for surface, being based basically on the theory of the hydrodynamic model. Nevertheless, a bias exists between the projected with the royal thing.

The present work has as aim obtain a function of adjustment for prever the bias between the projected and the royal thing, on having used the

methodology of design of irrigation for surface of the hydrodynamic model. Evaluated seven agricultural lands located in the Region Lagunera, with regard to irrigations for surface, with similar characteristics of type of soil, I cultivate (alfalfa); in addition these lands presented different systems of distribution of the water of irrigation (redressed channel and valve alfalfera).

The irrigations were evaluated before and after the application of the recommendation (design of the melga), with the purpose of observing and identifying the bias between the projected and the royal thing.

The parameters that influence the bias and in the efficiencies of irrigation parcelario are: longitudinal earring, time of irrigation, unitary expense and length of melga, being the most sensitive first one, for such a motive is important to consider ranges or tolerance in the recommendations generated by the Hydrodynamic Model of the Irrigation by Surface, modal to these parameters for prever the bias and to guarantee to the maximum the efficiency of irrigation proposed in the design.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.....	v
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVO.....	3
III. HIPÓTESIS.....	3
IV. METAS.....	3
V. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
5.1. Modelos de Simulación Matemática.....	4
5.1.1. Modelo Hidrodinámico Total.....	5
5.2. Software de Simulación del Riego por Superficie.....	6
5.2.1. Software de Simulación RIGRAV.....	6
5.2.2. Software de Simulación SIRMOD.....	8
5.3. Análisis de Escenarios en Sistemas de Riego Superficial.....	10
5.4. Metodología de Diseño de Tubería con Compuertas.....	10
VI. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
6.1. Equipo Utilizado.....	11
6.2. Evaluación del Riego por Superficie.....	12
6.2.1. Determinación de la pendiente.....	12
6.2.2. Determinación del contenido de humedad.....	12
6.2.3. Determinación del gasto aplicado.....	12
6.2.4. Tiempo de avance de riego.....	13
6.3. Análisis de la Información de las Evaluaciones del Riego.....	13
VII. RESULTADOS	14
7.1. Evaluación del Riego por Superficie de los Siete Casos.....	14
7.1.1. P.P. El Porvenir.....	14
7.1.2. P.P. Garralda.....	15
7.1.3. P.P. Huitrón.....	15
7.1.4. P.P. La Esperanza II.....	16
7.1.5. P.P. La Partida.....	17
7.1.6. P.P. Marsella.....	18
7.1.7. P.P. Mendi.....	19
7.2. Identificación de los Parámetros.....	19
7.3. Análisis de Sensibilidad de los Parámetros.....	20
7.4. Ajuste al Modelo Hidrodinámico del Riego por Superficie.....	21

	Página
VIII. DISCUSIÓN.....	25
IX. CONCLUSIONES.....	26
X. LITERATURA CITADA.....	28
XI. APÉNDICE.....	32

ÍNDICE FIGURAS

	Página
Figura 1. Sesgo de los tiempos de riego P.P. El Porvenir.....	14
Figura 2. Sesgo de los tiempos de riego P.P. Garralda.....	15
Figura 3. Sesgo de los tiempos de riego P.P. Huitrón.....	16
Figura 4. Sesgo de los tiempos de riego P.P. La Esperanza II.....	17
Figura 5. Sesgo de los tiempos de riego P.P. La Partida.....	18
Figura 6. Sesgo de los tiempos de riego P.P. Marsella.....	18
Figura 7. Sesgo de los tiempos de riego P.P. Mendi.....	19

I. INTRODUCCIÓN.

En 1998 fue creado el Programa de Transferencia de Tecnología Integral en Riegos (PROTTIR), con la finalidad de eficientizar el uso y manejo del agua, dicho programa analiza el proceso a partir de un diagnóstico, diseño de alternativas de solución, implementación y seguimiento, a la fecha se han atendido aproximadamente 9000 ha; de las cuales, el 80 por ciento de la superficie han sido diseñadas a riego por superficie, fundamentándose en la teoría del modelo hidrodinámico. Sin embargo, existe diferencia en campo, por lo que es necesario realizar un ajuste.

La Comarca Lagunera cuenta con infraestructura para regar aproximadamente 223,000 ha, sin embargo, la disponibilidad histórica únicamente ha permitido regar 85,000 ha, que corresponde a forraje, entre otros, lo que revela un superávit en infraestructura de distribución, debido a que la red interparcelaria posee gran cantidad de canales de tierra; aunado a ello, el método de riego empleado (riego por melgas), provoca fuertes pérdidas en la conducción y aplicación. La eficiencia con que se maneja el agua, provoca un derroche de volumen de agua y energía (CONAGUA 2002).

En la región, existen un total de 16,512 aprovechamientos hidráulicos, correspondiendo al agua subterránea 96.6 por ciento y al agua superficial

3.4 por ciento. Sumadas ambas fuentes de agua, el 89.2 por ciento se destina al uso agrícola y el resto a otras actividades.

Al aplicar el modelo hidrodinámico, se han rescatado volúmenes de agua, en base al incremento de la eficiencia de riego global a nivel parcelario, del 52 al 92 por ciento (informes del Programa de Transferencia de Tecnología Integral en Riegos "PROTTIR").

El logro bajo esta metodología es relevante, pero los asentamientos provocados por el riego originan un sesgo entre lo proyectado y lo real, por lo tanto requiere atención en los aspectos básicos de su generación, lo que induce a realizar una investigación básica, con la finalidad de retroalimentar el conocimiento científico.

II. OBJETIVO.

Obtener la función de ajuste para prever el sesgo entre lo real y proyectado, al utilizar la metodología de diseño de riego por superficie del modelo hidrodinámico.

III. HIPÓTESIS.

La evaluación del sesgo entre lo real y proyectado, permite obtener recomendaciones de ajuste para el diseño de riego por superficie en la Comarca Lagunera.

IV. METAS.

- Analizar la información donde se ha aplicado el Modelo Hidrodinámico.
- Evaluar el sesgo entre lo real y proyectado.
- Identificar la función matemática de ajuste al Modelo Hidrodinámico.

V. REVISIÓN DE LITERATURA.

5.1. Modelos de Simulación Matemática.

En la comprensión del análisis de la hidráulica del riego por superficie, es necesario entender ciertos conceptos relacionados básicamente con el avance del frente de agua, infiltración y la recesión.

El movimiento de agua en el suelo y sobre el mismo, es un aspecto que siempre ha llamado la atención, razón por la que se han realizado diversos estudios relacionados entre las características de infiltración y avance del riego. Sin embargo, poco se ha realizado para determinar la relación de estas variables con respecto a la recesión del riego, esto trae como consecuencia que se dificulte el análisis completo de la hidráulica del riego por superficie desde un punto de vista teórico.

En la hidráulica del riego por superficie se consideran tres estados:

1. Un período de avance del frente de agua o periodo de humedecimiento.
2. Un período durante el cual la longitud total del conducto de riego se encuentra inundado y sujeto a infiltración
3. Un período de recesión durante el cual una longitud decreciente del conducto de riego se encuentra semi - inundada.

El análisis, en estos tres estados se ha utilizado la simulación matemática en la hidráulica del riego por superficie, ya que puede conducir a

mejorar la eficiencia y operación de los sistemas de riego, formulación que permite unir variables para predecir su comportamiento y funcionamiento antes de implementarse en el campo.

El uso de modelos matemáticos se ha generalizado como herramienta útil en la predicción de respuestas a los sistemas de riego referente a los parámetros de diseño y operación del riego superficial. La gran cantidad de modelos desarrollados para analizar el comportamiento del flujo de agua en el riego por superficie han sido los propuestos por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de Norteamérica (Rojas y Ramírez, 1998), y se clasifican en:

- Balance de Volumen
- Onda Cinemática
- Hidrodinámica
- Cero – Inercia
- Otros

Para abordar el diseño de riego por superficie es necesario dar a conocer los principios que rigen el movimiento del agua sobre y dentro del suelo, visto éste como un cuerpo poroso (Hernández 1995).

5.1.1. Modelo Hidrodinámico Total.

El movimiento del agua en este contexto, es expresado por las ecuaciones de Saint Venant o de Continuidad y de Momento, las cuales representan el modelo hidrodinámico total, (Strelkolf y Katapodes, 1977).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} \quad (\text{Continuidad}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2 g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{\partial y}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0 \quad (\text{Momento})$$

(2)

Donde:

A = Área de la sección transversal (m^2).

Q = Gasto unitario ($m^3 \text{seg}^{-1}$).

t = Tiempo transcurrido (seg).

x = Distancia desde el inicio del surco o melga (m).

τ = Tiempo de oportunidad de infiltración (m).

Z = Infiltración acumulada (m).

g = Aceleración de la gravedad $9.81 \text{ m} \cdot \text{seg}^{-2}$.

F = Número de Froude (Adim).

S_0 = Pendiente del terreno ($m \cdot m^{-1}$).

S_f = Pendiente de fricción ($m \cdot m^{-1}$).

y = Tirante hidráulico (m).

5.2. Software de Simulación del Riego por Superficie.

5.2.1. Software de Simulación RIGRAV.

El modelo de simulación RIGRAV, (Alvarado et al, 2001), generado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua "IMTA" utiliza la función de infiltración de Green-Ampt, (1911).

$$I = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{I}{\lambda} \right) \quad (3)$$

Donde:

I = Velocidad de infiltración ($m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-1}$).

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

K_s = Conductividad hidráulica a saturación ($\text{min} \cdot m^{-3}$).

θ_0 = Contenido de humedad inicial (%).

θ_s = Contenido de humedad final (%).

h = Tirante de agua en el surco (m).

h_f = Succión en el frente de humedecimiento (m).

Modelo basado en simplificaciones de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards, una de estas simplificaciones consiste en presentar la ecuación de conservación de la masa de manera integral, que se escribe:

$$Q_g t = \int_0^S Ah(x, t) dx + \int_0^S Ai(x, t) dx \quad (4)$$

Donde:

S = Posición del frente de avance en el tiempo (m).

t = Tiempo (seg).

L = Longitud del surco, medida a partir de la cabecera (m).

Ah = Área hidráulica de la sección transversal (m^2).

Ai = Área de la sección transversal del escurrimiento subterráneo (m^2).

Si se considera que el área hidráulica del escurrimiento superficial es constante en espacio y tiempo, y que el suelo es homogéneo, entonces la ecuación (5) se escribe:

$$Q_g t = \overline{Ah}S(t) + \int_0^s Ai(t_0) dx \quad (5)$$

Donde:

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

t_0 = Tiempo de infiltración definido como: $t_0 = t - tx$

tx = Tiempo que tarda en llegar el avance a un punto situado a una distancia x .

Si dividimos la ecuación (5) entre el perímetro mojado tenemos:

$$Q_u t = \overline{Rh}S(t) + \int_0^s Ri(t_0) dx \quad (6)$$

Donde:

\overline{Rh} = Radio hidráulico medio del escurrimiento superficial (m).

Ri = Lámina infiltrada media en el perímetro mojado (m).

5.2.2. Software de Simulación SIRMOD.

El modelo de simulación SIRMOD II (Walker, et al 1987), fue creado en Utah State University en los Estados Unidos de Norteamérica. Modelo que presenta tres opciones de solución a las ecuaciones de Saint-Venant (1871), siendo: el modelo hidrodinámico total, cero inercia y el de onda cinemática (Alvarado et al, 2001).

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

A través del Modelo SIRMOD II (Walker y Skogerboe, 1987), se identifican rápidamente las modificaciones y/o ajustes que el productor o regador tiene que realizar para mejorar la eficiencia de aplicación del agua. Además, 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 tienen, el riego superficial continuará teniendo mayor atención por los profesionistas y agricultores, para mejorar las prácticas de riego parcelario.

El modelo SIRMOD II es un programa que simula la hidráulica del riego por superficie a nivel parcelario, selecciona el tamaño de parcela, los parámetros que maximizan la eficiencia de aplicación y solución al problema. Esto último lo hace considerando que el problema, es inverso, utilizando el método de dos puntos, y permite el cálculo de los parámetros de infiltración partiendo de la información de avance (Walker, 1989).

5.3. Análisis de Escenarios en Sistemas de Riego Superficial por Melgas, basado en un Modelo de Simulación.

Mediante el análisis de escenarios en sistemas de riego superficial por melgas, donde se involucran los factores de infiltración, pendiente, ancho,

tipo de suelo, tipo de cultivo, gasto unitario, avance y recesión del agua, etc., ayuda a incrementar la eficiencia de aplicación, distribución y de requerimientos. En este trabajo se presenta es un análisis de escenarios en sistemas de riego superficial por melgas basado en un modelo de simulación, con las características de ser eficiente y funcional, para incrementar las eficiencias antes mencionadas (García 2000).

5.4. Metodología de Diseño de Tubería con Compuertas.

La metodología de diseño de tubería con compuertas (Manning Modificado), es el único criterio de diseño que parte de un diseño de riego por superficie (SIRMOD), el cual garantiza que la eficiencia de riego global sea alta (Delgado, 2000), dicha metodología determina lo siguiente:

- Gasto parcelario
- Ancho de bordo
- Pendiente
- Tiempo de riego de la parcela
- Láminas de riego
- Turnos de riego
- Diámetros de tubería ciega y tubería con compuertas
- Longitud máxima que puede operar el sistema de riego, aprovechando la carga hidráulica del estanque.

VI. MATERIALES Y MÉTODOS.

Se evaluó el riego por superficie en siete predios agrícolas, ubicados en la Comarca Lagunera, con características similares de suelo, cultivo (alfalfa) y diferentes sistemas de conducción (canal revestido y válvula alfalfera). El riego se evaluó antes y después de la aplicación de la recomendación para observar e identificar el sesgo entre lo proyectado y lo real.

6.1. Equipo utilizado para la evaluación del Riego por Superficie.

El equipo utilizado para la evaluación del riego por superficie, fue el siguiente:

- Nivel fijo automático.
- Dos estadales (altura de 2 m).
- Barrena Veihmeyer.
- Barrena tipo California.
- Jarros de barro.
- Horno de Microondas.
- Cronómetro.
- Cinta métrica (50 m).
- Manguera de albañil.
- Regla de 60 cm.
- Recipiente de volumen conocido.
- Computadora.
- Software SIRMOD II.

- Molinete digital.

6.2. Evaluación del Riego por Superficie.

En la evaluación del riego se necesitan determinar los siguientes datos:

6.2.1. Pendiente.

Consistió en seleccionar una melga, a la cual se le midió el largo y ancho, así mismo, se procuró que tuvieran características representativas del tipo de suelo, por si existen varios tipos. Se colocaron estacas a cada 20 m, para formar estaciones a lo largo de la melga, se obtuvieron lecturas con un nivel fijo de cada estación, para determinar la pendiente promedio y su variación a lo largo de la melga mediante una regresión lineal.

6.2.2. Contenido de humedad.

El contenido de humedad en el suelo, se determinó utilizando el método gravimétrico, con una barrena tipo California, tomando muestras antes y después de riego, en cuatro puntos en la melga a estratos de 30 cm hasta una profundidad de 120 cm.

6.2.3. Gasto aplicado.

El método a emplear fue el volumétrico, que consiste en aforar cada uno de los emisores (sifones, compuertas, mangueras, etc.) en la misma melga que se está evaluando.

6.2.4. Tiempo de avance de riego.

Se registró el tiempo al momento que se aplica el agua en la melga de observación o de evaluación (tiempo de inicio), posteriormente se registró el tiempo que tardó el agua en llegar a cada estación hasta concluir con la última, al final se tomó el tiempo de corte. El tiempo de avance fue hasta que el agua cubra el total de la superficie a regar.

6.3. Análisis de la información de la evaluación del riego por superficie.

Se analizó la evaluación del riego de los siete predios, antes y después de aplicar las recomendaciones generadas por el software SIRMOD II (Diagnóstico y Seguimiento), para evaluar el sesgo entre lo proyectado y lo real, así como identificar los parámetros sensibles que influyen en la eficiencia del riego por superficie, y determinar los rangos de ajuste de aplicación del modelo de simulación.

VII. RESULTADOS.

Los resultados de la evaluación de los siete predios son los siguientes:

7.1. Evaluación del Riego por Superficie.

7.1.1. P.P. El Porvenir.

En este caso se realizaron dos evaluaciones de riego de seguimiento con diferentes características con respecto al diseño propuesto (Cuadro 1), estas son: pendiente longitudinal, longitud de melga y lámina de riego aplicada.

La lámina de riego aplicada en el avance de riego No. 2 es igual a la propuesta por el diseño (15 cm), por esta razón el sesgo en los tiempos de avance de riego y de las eficiencias es menor con respecto al riego de seguimiento No. 2 (Figura 1), concluyendo que la lámina de riego aplicada es lo que influye entre lo proyectado y lo real.

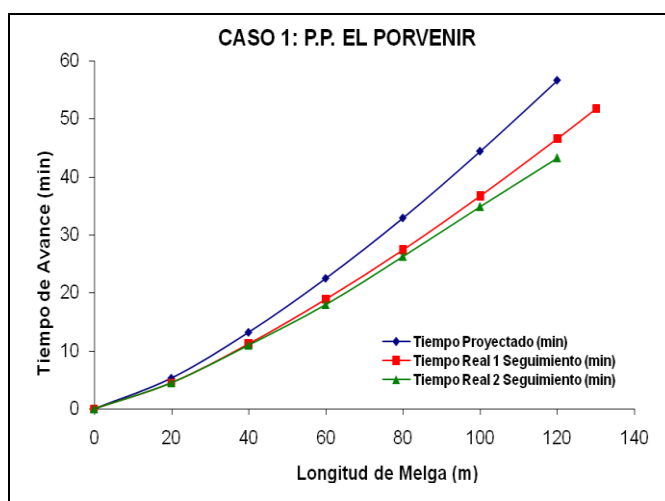


Figura 1. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. El Porvenir.

7.1.2. P.P. Garralda.

En este caso solamente se realizó una sola evaluación del riego de seguimiento con las mismas características propuestas en el diseño, con excepción del gasto unitario, el cual fue diferente, aunque la lámina de riego aplicada fue similar, razón por la cual el tiempo de avance del riego evaluado tiende a ser igual al riego proyectado (Figura 2).

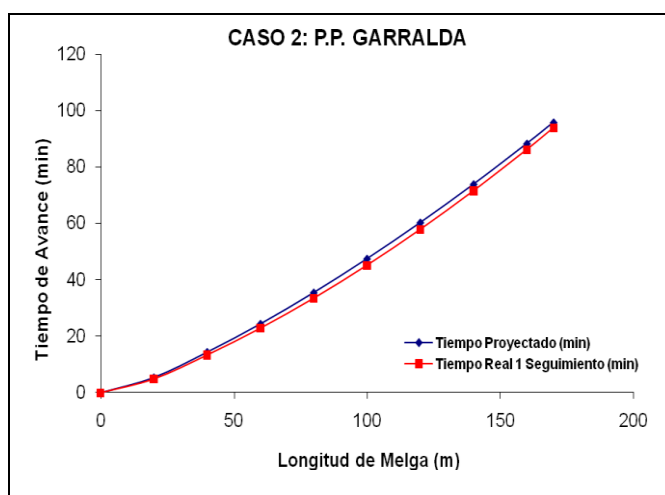


Figura 2. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. Garralda.

7.1.3. P.P. Huitrón.

Se realizaron dos evaluaciones de riego de seguimiento, con diferentes características a las propuestas por el diseño con respecto a la pendiente, longitud de melga y gasto unitario. La lámina de riego aplicada fue similar a la propuesta por el diseño.

Es necesario mencionar que en este predio no se realizó prueba de avance de riego para generar el diseño, debido a que toda la superficie del predio se encontraba vacante (barbechada), por lo que se tomó el diseño de otro predio con características similares de suelo y cultivo. Se puede

observar que los tiempos de avance de riego son muy similares a una longitud de melga de 120 m, que es la longitud total de las melgas evaluadas en los dos riegos de seguimiento, y dicha longitud influye en el sesgo que existe entre lo proyectado y lo real (Figura 3).

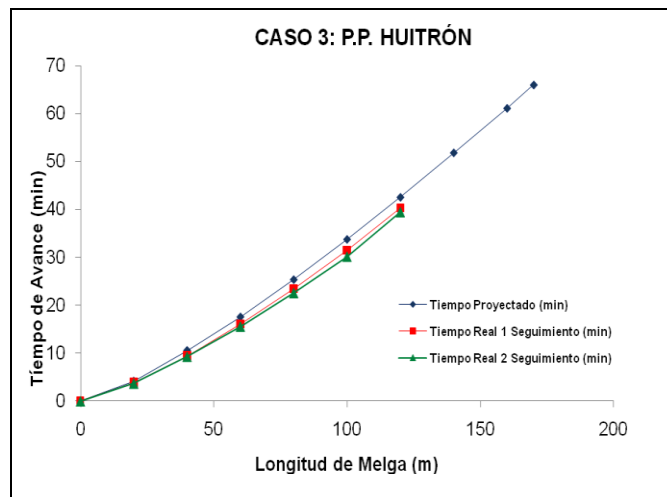


Figura 3. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. Huitrón.

7.1.4. P.P. La Esperanza II.

En este predio se realizó solamente un riego de seguimiento, con características similares al del diseño propuesto, con excepción del gasto unitario, el cual fue menor al propuesto por lo que la lámina de riego aplicada también fue menor a la propuesta (15 cm), concluyendo que al no aplicar el gasto unitario diseñado, este influyó en el sesgo del tiempo de avance de riego y de la eficiencia entre lo proyectado y lo real (Figura 4).

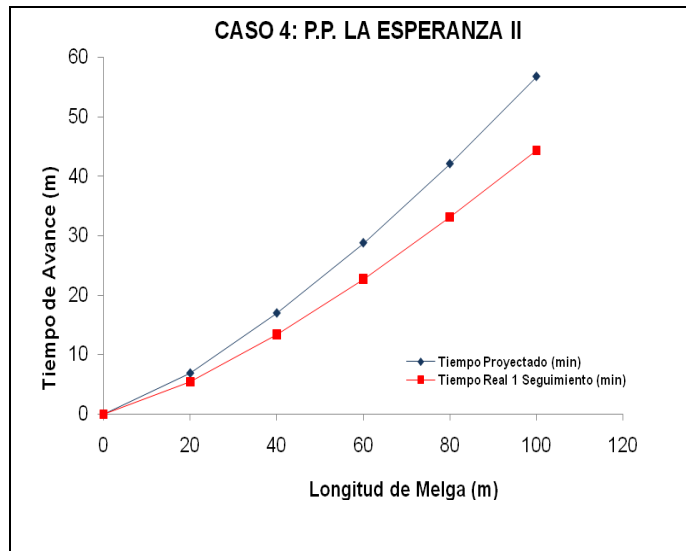


Figura 4. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. La Esperanza II.

7.1.5. P.P. La Partida.

En este caso se realizaron tres riegos de seguimiento con diferentes características a las propuestas por el diseño con respecto a pendiente, longitud de melga, gasto unitario y lámina de riego aplicada.

En la figura 5, se puede observar que los tiempos de avance de riego son mayores a los del diseño, debido a que se aplicó una lámina de riego mayor al propuesto por el diseño (15 cm).

En el riego de seguimiento No. 3 los tiempos de avance de riego son similares a los tiempos del diseño, debido a que la lámina de riego es casi similar a lámina propuesta, por tanto se puede determinar que la lámina de riego aplicada influye para que se presente el sesgo de los tiempos de avance de riego y de las eficiencias.

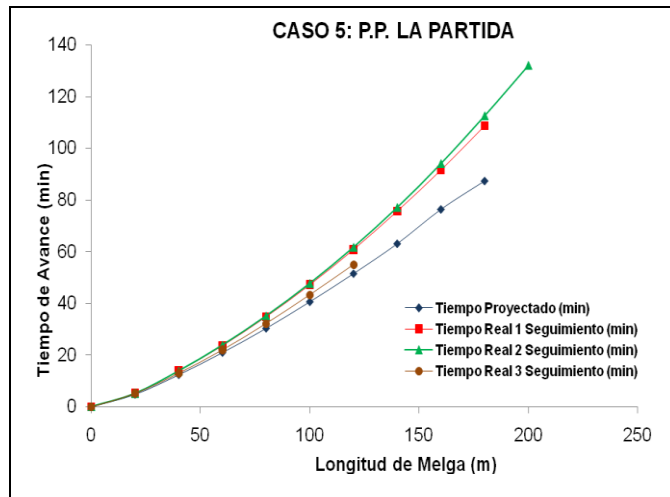


Figura 5. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. La Partida.

7.1.6. P.P. Marsella.

En este caso solamente se realizó una evaluación de riego de seguimiento, con características similares a las propuestas por el diseño, con excepción de la pendiente y tiempo de riego, siendo este último un factor importante para que la lámina de riego aplicada sea mayor o diferente a la propuesta por el diseño (14.9 cm), razón por la cual, se puede concluir que la lámina de riego aplicada influye en el sesgo de lo proyectado y lo real (Figura 6).

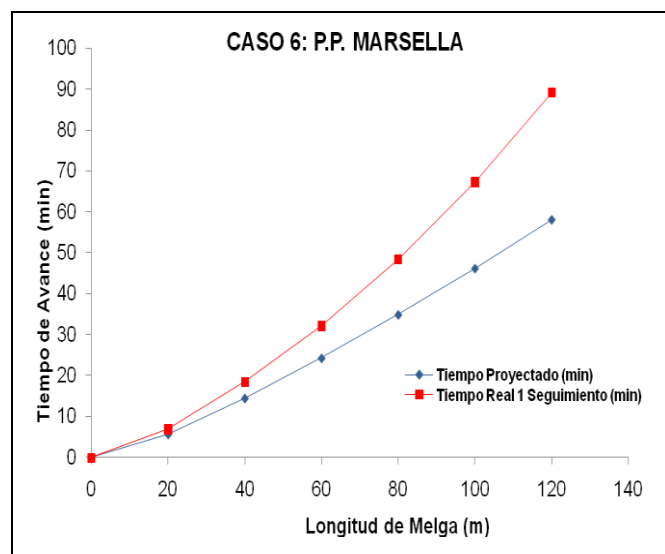


Figura 6. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. Marsella.

7.1.7. P.P. Mendi.

En este caso se realizaron dos riegos de seguimiento con características diferentes con respecto al diseño, esto referente a pendiente, longitud de melga y lámina de riego aplicada. La pendiente de las melgas evaluadas fue alta con respecto a la pendiente longitudinal propuesta por el diseño (3 cm/100m), lo que influyó en el sesgo de lo proyectado con lo real (Figura 7).

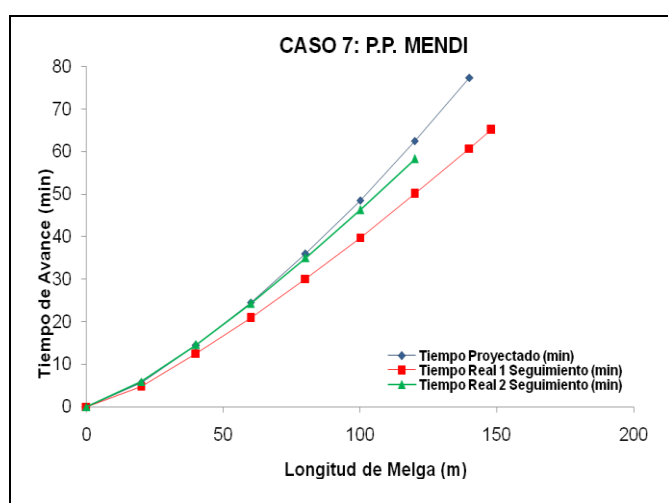


Figura 7. Sesgo de los Tiempos de Riego P.P. Mendi.

7.2. Identificación de los parámetros que intervienen en la eficiencia de Riego por Superficie.

De acuerdo a los análisis anteriores de los riegos por superficie de los siete casos o predios, se identificaron los parámetros que influyen en la eficiencia de riego, dichos parámetros son los siguientes:

- Pendiente Longitudinal.
- Gasto Unitario.
- Tiempo de Riego.

- Longitud de Melga.

Parámetros que intervienen directamente en el sesgo de lo proyectado con lo real, es importante analizar cada parámetro para evaluar su rango de sensibilidad para ajustar el modelo hidrodinámico y determinar su rango de aplicación.

7.3. Análisis de sensibilidad de los parámetros que influyen en la eficiencia del riego por superficie.

Se analizó cada uno de los parámetros evaluados en los siete casos (pendiente, longitud de melga, gasto unitario y tiempo de riego), donde se determinaron los rangos de sensibilidad para cada uno de los parámetros (Anexo Cuadro 15), con el objetivo de mantener la eficiencia de riego parcelario con la que fue diseñado el riego por superficie.

El tiempo de riego, fue el parámetro que presentó rangos de aplicación en cantidades extremas (mínimas y máximas), que influyeron en la disminución de la eficiencia de riego, parámetro que está en función de la lámina de riego que se desea aplicar al cultivo, por lo cual es necesario monitorear los gastos parcelarios para aplicar el tiempo de riego propuesto en el diseño.

El segundo parámetro que presentó sensibilidad en la eficiencia de riego fue la pendiente longitudinal, solamente en dos casos mostró sensibilidad para un solo extremo. Es primordial supervisar la nivelación melga por melga para verificar que la pendiente recomendada se aplique en

campo. Las posibles fallas en la nivelación se deben a dos razones primordiales, una a la mala programación de la preparación del terreno, y la otra a la falta de un mantenimiento preventivo del equipo de nivelación láser, como: calibración del emisor, calibración de llantas de la escrepa, ajuste de patines, afilado de las cuchillas de la escrepa, carga de la batería, condiciones del sistema hidráulico, etc.

El tercer parámetro sensible a la eficiencia fue el gasto unitario, solamente en dos casos presentó sensibilidad para los dos extremos, y en un solo caso no afectó la eficiencia de riego, es importante estandarizar el gasto de operación, considerando si el sistema de riego es operado por bombas directas o por un estanque, o por rebombeo del agua de río.

La longitud de melga es el parámetro que mostró menos sensibilidad a la eficiencia de riego por superficie, solamente mostró sensibilidad si la longitud de melga es mayor a la diseñada de 10 hasta 40 m de longitud, en dos casos no afectó la eficiencia.

7.4. Ajuste al Modelo Matemático Hidrodinámico del Riego por Superficie.

La ecuación original del modelo hidrodinámico del riego por superficie (Strelkolf y Katapodes, 1977), está compuesta por dos expresiones, una de continuidad y otra de momento.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} \quad (\text{Continuidad}) \quad (7)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2 g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{\partial y}{\partial x} - (S_0 - S_f) = 0 \quad \text{(Momento)} \quad (8)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal (m^2).

Q = Gasto unitario ($m^3 \text{seg}^{-1}$).

t = Tiempo transcurrido (seg).

x = Distancia desde el inicio del surco o melga (m).

τ = Tiempo de oportunidad de infiltración (m).

Z = Infiltración acumulada (m).

g = Aceleración de la gravedad 9.81 ($m \cdot \text{seg}^{-2}$).

F = Número de Froude (Adim).

S_0 = Pendiente del terreno ($m \cdot m^{-1}$).

S_f = Pendiente de fricción ($m \cdot m^{-1}$).

y = Tirante hidráulico (m).

La ecuación de Continuidad (7) está compuesta de tres términos: el primero relaciona la variación del área de la sección transversal con el tiempo de riego transcurrido a lo largo de la melga o surco, el segundo término describe la variación del gasto a lo largo de la melga o surco, el tercer y último término de la ecuación se refiere a la variación de la infiltración acumulada del agua de riego con respecto al tiempo de infiltración del suelo.

La ecuación de Momento (8) está conformada de cuatro términos; el primero describe la variación del gasto con respecto al tiempo transcurrido de riego a lo largo de la melga o surco, el segundo término se refiere a la variación del gasto con relación a la distancia de la melga o surco, el tercer término detalla la variación del tirante hidráulico a lo largo de la melga o surco, el último término considera la pendiente de la melga o surco, así como la pendiente de fricción o rugosidad.

En base al análisis de sensibilidad de los cuatro parámetros, se determinó ajustar el modelo hidrodinámico para dos condiciones:

- 1) Rangos mínimos de sensibilidad, la expresión original ó ecuaciones (7) y (8), queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial A}{\partial(t-5)} + \frac{\partial(Q-1.5)}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial(Q-1.5)}{\partial(t-5)} + \frac{2(Q-1.5)}{A^2g} \frac{\partial(Q-1.5)}{\partial x} + (1-F^2) \frac{\partial y}{\partial x} - [(S_0 - S_f) * (0.75)] = 0 \quad (10)$$

- 2) Rangos máximos de sensibilidad, las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial A}{\partial(t+5)} + \frac{\partial(Q+2)}{\partial(x*1.20)} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial(Q+2)}{\partial(t+5)} + \frac{2(Q+2)}{A^2g} \frac{\partial(Q+2)}{\partial(x*1.20)} + (1-F^2) \frac{\partial y}{\partial(x*1.20)} - [(S_0 - S_f) * (1.25)] = 0$$

(12)

Donde:

A = Área de la sección transversal (m^2).

Q = Gasto unitario ($lps \cdot m^{-1}$).

Se observa, a comparación de las ecuaciones originales, los términos cambian donde intervienen los parámetros que influyen en el sesgo de lo proyectado con lo real, para que el Modelo sea aplicable en la Región Lagunera.

VIII. DISCUSIÓN.

El modelo matemático hidrodinámico es el mejor para el diseño de riego por superficie, a diferencia de los modelos cero inercia y onda cinemática, considerándose el más completo en el análisis de las variables que intervienen en el riego (López 2009). Pero al evaluar esta metodología en campo presenta sesgos entre lo proyectado y lo real.

En base, a los resultados de la evaluación del riego en los siete predios, se observó que los tiempos de avance de riego en cada evento (riego de diagnóstico y seguimiento) fueron totalmente diferentes a lo diseñado, por lo tanto, se presentó un sesgo de las eficiencias globales de riego en cada predio entre lo proyectado y lo real.

Las variables de riego que influyeron en el sesgo de las eficiencias son las siguientes: pendiente longitudinal, tiempo de riego, gasto unitario y la longitud de la melga, estas presentan sensibilidad en las eficiencias globales de riego, por tal motivo se obtuvo una función de ajuste del modelo matemático hidrodinámico del riego por superficie, con la finalidad de establecer límites de aplicación para cada variable, y para cada recomendación generada por dicho modelo, por lo tanto el objetivo de este trabajo se cumplió de manera satisfactoria.

IX. CONCLUSIONES.

En base a los datos analizados, se puede establecer las siguientes conclusiones aplicables en el caso de la Región Lagunera:

Para mantener las eficiencias de riego propuestas en el diseño, es necesario establecer rangos o límites de tolerancia para cada uno de las variables que influyen en la eficiencia de riego parcelario.

Es importante supervisar la nivelación de tierras y tomar como criterio de un rango permisible de pendiente longitudinal de más menos 25 por ciento ($\pm 25\%$), de la pendiente diseñada, con la finalidad de no afectar la eficiencia de riego proyectada.

En el tiempo de riego por melga, se sugiere tomar una tolerancia de ± 5 minutos, para garantizar la lámina de riego propuesta en el diseño, y a su vez conservar la eficiencia de riego programada.

Respetar el gasto unitario propuesto en el diseño, tomando un límite máximo de $2 \text{ lps} \cdot \text{m}^{-1}$ de excedencia al gasto diseñado. El gasto unitario de diseño, no deberá reducirse en la operación por más de $1.5 \text{ lps} \cdot \text{m}^{-1}$. Se sugiere periódicamente aforar las fuentes de agua para monitorear los gastos unitarios, para prever al máximo los sesgos entre lo real y proyectado.

La longitud de la melga no deberá exceder 20% más de la longitud diseñada. Por otra parte, y en relación a la experiencia adquirida al momento

de implementar las diferentes recomendaciones emanadas del modelo hidrodinámico, es necesario considerar la capacitación continua de las personas que toman la decisión de cuándo y cuánto regar en un predio agrícola (encargados de predio, mayordomos y regadores), con el objetivo de contribuir a la sustentabilidad del recurso agua a nivel regional.

X. LITERATURA CITADA.

Acosta L. G. 2008. Evaluación de programas de simulación para el diseño del riego por gravedad. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón Coahuila.

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.

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.

<http://www.ciu.reduaz.mx/investigacion/ingenieria/T106.htm>.

Catalán V. E. 1998. Guías de Riego (caso Región Lagunera). CENID – RASPA. INIFAP.

Clemmens A. J., W. R. Walker, D. D. Fangmeir and L. A. Hardy. 1998. “Design of surface systems”. Chapter 14 in: Design and Operation of farm Irrigation Systems. ASAE. Monograph Number 3 (2nd Edition), R. L. Elliott, ed. St. Joseph, Michigan.

CNA. 1990. Uso Pleno de la Infraestructura Hidroagrícola.

<http://www.cna.gob.mx/portal/switch.asp?param=3071180>.

Delgado R. G. 2000. Metodología de diseño de sistemas de riego de tubería con compuerta. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón Coahuila.

García R. M. 2000. Análisis de escenarios en riego por superficie en melgas basado en un modelo de simulación. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón Coahuila.

Katapodes N. D. y Strelkoff, T. 1997. Hydrodynamics of border irrigation complete model. In: journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, 103 (IR3): 300- 365.

López H. G. 2009. Evaluación de modelos matemáticos para el diseño de riego por superficie. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Torreón Coahuila.

McClymont D. J. and R. J. Smith. 1996. A infiltration Parameters from Optimization on Furrow Irrigation Advance Data. Irrigation Science. In: journal of irrigation and drainage engineering, ASCE, 105 (IR3): 182- 225.

- Palacios V. E. 1990. La eficiencia del uso del agua en los Distritos de Riego. Memoria: Análisis de la problemática del agua y perspectiva para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato, Celaya, Gto., México.
- Peña, E. (IMTA, 2007) Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México.
<http://www.imta/distritosderiego/ingenieria/p3589.htm>.
- 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 Coah., México.
- Rendón A. D. 2003. 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.
- Souza F. 1997. Nonlinear Hydrodynamic model of furrow Irrigation. (PH.D Dissertation). Davis, University of the California. Strelkoff y Katapodes.

Walker W. R. and Skogerboe V. G. 1987. Surface Irrigation: "Theory and Practice". Prentice –Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Walker R. W. SIRMOD II. 1999. Surface Irrigation Simulation, Evaluation and Design User's Guide and Technical Documentation. Department of Biological and Irrigation Engineering Utah State University. Logan Utah.

Walker W. R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. FAO. Irrigation and Drainage Paper 45, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Wallander, W.W. y Rayej, M. 1987. Economic optimization of furrow Irrigation with uniform and non-uniform soil. In: transaction of the ASAE, 30 (5): 1425 – 1429.

Wynn, R. W., Gaylord V. Skogerboe. 1987. Surface irrigation theory and practice, Utah State University. Department of Biological and Irrigation Engineering Utah State University. Logan Utah.

XI. APÉNDICE.

Cuadro 1. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. El Porvenir.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO	2 SEGUIMIENTO
Fecha	04/06/1999	29/06/2000	14/03/2002
Pendiente (cm/100m)	3.0	2.6	2.8
Long. Melga (m)	123	130	119
Ancho de Melga (m)	20	20	20
Gasto Parcelario (lps)	120	120	120
Gasto Unitario (lps/m)	6.0	6.0	6.0
Tiempo de riego (min)	52	55	45
Lamina de Riego (cm)	15.2	15.2	13.6
Efic. Riego Parcelario (%)	91.6	88.0	83.3

Cuadro 2. Tiempos de Avance de riego P.P. Porvenir.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 2 (min)
0	0	0	0
20	5	5	5
40	13	11	11
60	23	19	18
80	33	27	26
100	44	37	35
120	57	47	43
130		52	

Cuadro 3. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. Garralda.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO
Fecha	28/06/2000	04/04/2001
Pendiente (cm/100m)	2.0	2.0
Long. Melga (m)	170	170
Ancho de Melga (m)	17.0	17.0
Gasto Parcelario (lps)	72.3	69.7
Gasto Unitario (lps/m)	4.25	4.10
Tiempo de riego (min)	105	110
Lamina de Riego (cm)	15.8	15.9
Efic. Riego Parcelario (%)	94.8	91.2

Cuadro 4. Tiempos de Avance de riego de P.P. Porvenir.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)
0	0	0
20	5	5
40	14	13
60	24	23
80	36	34
100	48	45
120	60	58
140	74	72
160	88	86
170	96	94

Cuadro 5. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. Huitron.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO	2 SEGUIMIENTO
Fecha	28/06/2000	30/04/2004	29/07/2004
Pendiente (cm/100m)	2.0	3.0	2.0
Long. Melga (m)	170	120	123
Ancho de Melga (m)	17.0	17.0	17.0
Gasto Parcelario (lps)	117.3	119	119
Gasto Unitario (lps/m)	6.9	7.0	7.0
Tiempo de riego (min)	61	44	44
Lamina de Riego (cm)	14.9	15.4	15.0
Efic. Riego Parcelario (%)	91.8	87.7	93.5

Cuadro 6. Tiempos de Avance de riego de P.P. Huitron.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 2 (min)
0	0	0	0
20	4	4	4
40	11	9	9
60	18	16	16
80	25	23	23
100	34	32	30
120	43	40	40
140	52		
160	61		
170	66		

Cuadro 7. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. La Esperanza II.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO
Fecha	27/01/2001	05/10/2002
Pendiente (cm/100m)	2.0	2.0
Long. Melga (m)	100	100
Ancho de Melga (m)	15.0	15.0
Gasto Parcelario (lps)	60.00	57
Gasto Unitario (lps/m)	4.00	3.80
Tiempo de riego (min)	63	65
Lamina de Riego (cm)	15.1	14.8
Efic. de Aplicación (%)	99.39	100.00
Efic. de Requerimiento (%)	99.71	98.86
Unif. de Distribución (%)	96.78	96.34
Efic. Riego Parcelario (%)	96.0	95.2

Cuadro 8. Tiempos de Avance de riego de P.P. La Esperanza II.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)
0	0	0
20	7	5
40	17	13
60	29	23
80	42	33
100	57	44

Cuadro 9. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. La Partida.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO	2 SEGUIMIENTO	3 SEGUIMIENTO
Fecha	25/06/2001	18/04/2002	24/07/2003	12/05/2004
Pendiente (cm/100m)	2.0	1.7	1.4	1.6
Long. Melga (m)	189	180	202	120
Ancho de Melga (m)	19.0	19.0	19.0	19.0
Gasto Parcelario (lps)	110.2	110.2	100.7	115.9
Gasto Unitario (lps/m)	5.80	5.80	5.30	6.10
Tiempo de riego (min)	82	95	131	55
Lamina de Riego (cm)	15.1	18.4	20.6	16.8
Efic. Riego Parcelario (%)	97.0	79.8	71.8	88.6

Cuadro 10. Tiempos de Avance de riego de P.P. La Partida.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 2 (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 3 (min)
0	0	0	0	0
20	5	5	5	5
40	12	14	14	13
60	21	24	24	22
80	30	35	35	32
100	41	47	48	43
120	52	61	62	55
140	63	76	77	
160	77	92	94	
180	88	109	113	
200			132	

Cuadro 11. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. Marsella.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO
Fecha	02/05/2003	21/08/2003
Pendiente (cm/100m)	1.5	1.1
Long. Melga (m)	120	120
Ancho de Melga (m)	13.5	13.5
Gasto Parcelario (lps)	48.6	48.6
Gasto Unitario (lps/m)	3.6	3.6
Tiempo de riego (min)	83	98
Lamina de Riego (cm)	14.9	17.6
Efic. Riego Parcelario (%)	93.52	82.8

Cuadro 12. Tiempos de Avance de riego de P.P. Marsella.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)
0	0	0
20	6	7
40	15	19
60	24	32
80	35	48
100	46	67
120	58	89

Cuadro 13. Resultados de las evaluaciones del riego en P.P. Mendi.

PARAMETROS	DISEÑO	1 SEGUIMIENTO	2 SEGUIMIENTO
Fecha	08/02/2000	14/02/2000	23/05/2001
Pendiente (cm/100m)	3.0	5.2	5.6
Long. Melga (m)	140	148	120
Ancho de Melga (m)	18.0	18.0	18.0
Gasto Parcelario (lps)	81.2	81.2	81.2
Gasto Unitario (lps/m)	4.5	4.5	4.5
Tiempo de riego (min)	77	85	66
Lamina de Riego (cm)	14.9	15.5	14.9
Efic. Riego Parcelario (%)	92.5	86.2	85.6

Cuadro 14. Tiempos de Avance de riego de P.P. Mendi.

DISTANCIA (m)	TIEMPO PROYECTADO (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 1 (min)	TIEMPO SEGUIMIENTO 2 (min)
0	0	0	0
20	6	5	6
40	14	13	15
60	25	21	24
80	36	30	35
100	49	40	46
120	63	50	58
140	77	61	
148		65	

Cuadro 15. Rangos de Sensibilidad de los Parámetros para cada Caso.

Parámetros	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Pendiente (cm/100m)	+2	-1.5 a +0.5	-2 a +0.5	-1 a +1.5	-0.5 a +1	+1	-0.5 a +2
Long. Melga (m)	+10	N.A*	N.A*	+25	+40	+30	+20
Gasto Unitario (lps/m)	+1	-2.5 a +1	N.A*	-1	-1.5 a +2	+2	-0.5
Tiempo de Riego (min)	-4 a +2	-12 a +8	-4 a +9	-5 a +5	-5 a +5	-5 a +5	-5 a +10

** N.A = No afecta la eficiencia del riego.