



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL TOPOGRÁFICA Y
GEODÉSIA

**“Método de riego con incremento de gasto en surcos cerrados
y su evaluación en campo”**

T E S I S

Como requisito para obtener el título de

Ingeniero Civil

P r e s e n t a

BERNARDINO CHAGOYA AMADOR

DIRECTOR DE TESIS

DR. ERNESTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ



MÉXICO, D.F.

ENERO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

GRACIAS

*A ti mi Dios, por lo que me has dado y no hasta el día de hoy.
Gracias.*

*A mi madre Isabel, por ser el principal impulso de terminar con la
carrera, por ser esa persona tan maravillosa que siempre ha
estado pendiente de mi. Gracias.*

A mi padre Eusebio, por apoyarme. Gracias.

*A mis hermanos, Maricela, Isabel, pero principalmente a ustedes
Tania, Ricardo, Dorelly y Fernando, que por ustedes también fue
esté esfuerzo. Gracias.*

*A mi segunda familia, Ana, Nemorio, Fernando y Beatriz, que me
brindaron la oportunidad de entrar a su hogar y que cada vez que
necesitaba apoyo y aliento también lo encontré en ustedes.
Gracias.*

*A ti Ray y Celia, por todo lo que compartimos dentro y fuera de la
escuela y esperando que David también sea ingeniero. Gracias.*

*A todos mis amigos y compañeros de la facultad, que no menciono
sus nombres para no omitir a ninguno, por todo lo que convivimos
juntos. Gracias.*

*A ti mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México,
que me abriste tus puertas desde el bachillerato y me diste el
orgullo de ser de sangre azul y piel dorada y ser puma de corazón.
Gracias.*

A ti Facultad de Ingeniería que me diste la oportunidad de estudiar en la mejor escuela de ingeniería del país y con ello poder superarme día tras día. Gracias.

A ti Instituto de Ingeniería, que me diste la oportunidad de formar parte de todo ese conjunto. Gracias.

A usted Ing. Víctor Franco, por permitirme ser parte del Instituto y por apoyarme en la realización de este trabajo. Gracias.

A usted Dr. Ernesto Vázquez Fernández, por el permitirme participar en su proyecto y poder desarrollar este trabajo, por sus consejos y su paciencia. Gracias.

A ustedes los del cubículo 414 –D, Susana, Fidel, Paola, Alicia y Alex, por hacer que la estancia en el Instituto fuera lo más agradable. Gracias.

A todos ustedes GRACIAS, este logro es por todos ustedes y los invito a compartirlo conmigo.

Desde niño soy de la idea de que la vida es como una novela o una serie de televisión, en la cual las personas son protagonistas de cada suceso y acontecimiento diario, cada uno toma un papel en la vida y se convierte en personaje primario o secundario.

Con el paso del tiempo, esa idea no ha cambiado en mi mente, pero a diferencia de ayer, el día de hoy no sólo soy el protagonista sino que también soy el director.

La diferencia entre lo que eres y lo que quieres ser, se encuentra en lo que haces.

Bernardino Chagoya Amador

INDICE

Introducción

1. Generalidades del riego por gravedad.....	1
1.1 Riego por gravedad no tecnificado.....	3
1.2 Riego por gravedad tecnificado.....	4
1.3 Indicadores para medir eficiencias en el riego por gravedad.....	6
1.3.1 Eficiencia de conducción en riegos por gravedad.....	7
1.3.2 Eficiencia de aplicación en riegos por gravedad.....	11
2. El riego tradicional o continuo y sus eficiencias de aplicación.....	14
2.1 El riego por surcos cerrados y abiertos.....	14
2.1.1 Riego por surcos cerrados.....	25
2.1.2 Riego por surcos abiertos.....	25
2.2 Eficiencias parcelarias del riego continuo.....	25
2.2.1 Lámina media aplicada al terreno.....	26
2.2.2 Eficiencia de aplicación.....	26
2.2.3 Eficiencia de uniformidad.....	28
2.2.4 Uniformidad de distribución.....	28
3. Modelación matemática.....	31
3.1 Modelo hidrodinámico completo.....	32
3.1.1 Ecuaciones de Saint-Venant.....	32
3.1.2 Solución a las ecuaciones de Saint-Venant.....	33
4. Métodos de riego eficientes en surcos cerrados.....	39
4.1 Riego Intermitente.....	39
4.1.1 Descripción del Riego Intermitente.....	40
4.1.2 Fases del Riego Intermitente.....	41
4.1.3 Dispositivos de control del Riego Intermitente.....	43
4.1.3.1 Sistema de tuberías con compuertas.....	45
4.1.4 Parámetros de evaluación del Riego Intermitente.....	47
4.2 Riego con Incremento de Gasto.....	48
4.2.1 Descripción del Riego con Incremento de Gasto.....	48
4.2.2 Fases del Riego con Incremento de Gasto.....	50
4.2.4 Parámetros de evaluación del Riego con Incremento de Gasto.....	51
5. Criterio de diseño del Riego con Incremento de Gasto.....	52
5.1 Determinación del tiempo de incremento de gasto con respecto a la longitud.....	52
5.2 Recomendaciones para el empleo del Riego con Incremento de Gasto.....	57

6. Evaluación del Riego con Incremento de Gasto en campo.....	58
6.1 Mediciones de la humedad del suelo.....	59
6.2 Cálculo de las eficiencias.....	62
6.3 Comparación de los riegos.....	63
6.4 Impacto en la conservación del agua.....	66

7. Conclusiones.....	69
----------------------	----

Anexo A. Hidrogramas de ingreso en los ensayos de campo.

Anexo B. Curvas de avance del agua en los ensayos de campo.

Anexo C. Curvas de avance del agua y de láminas infiltradas obtenidas con el modelo numérico

Referencias

Introducción

La manifestación más antigua de la hidráulica la constituye el riego, practicado por la humanidad desde los umbrales de la historia, los descubrimientos arqueológicos han demostrado que en Egipto y Mesopotamia existían canales, presas y embalses en épocas tan remotas como el año 4000 a. de C. También existieron pozos en el mismo periodo, pero los primeros ingenios mecánicos (como las ruedas de paletas para la elevación de agua) aparecieron más tarde 1000 a. de C. El diseño de estos artefactos era casi enteramente intuitivo, basándose en la experiencia y en simples aproximaciones.

Así, con el transcurso de los años la presión demográfica y las necesidades de cantidades adicionales de alimentos imponen a pasos agigantados el desarrollo de técnicas de riego en todo el mundo, ya que las zonas a regar son extensas y se encuentran en todos los continentes. Además con el paso del tiempo se debe lidiar con el problema de la falta de agua en el mundo. Su escasez y en ocasiones su ausencia, han despertado un gran interés en la búsqueda de nuevas técnicas de riego con lo cual se pretende hacer un uso más eficiente del vital líquido.

El uso eficiente del agua de riego por gravedad tiene cada vez mayor atención en nuestro país. Así por ejemplo, se ha puesto énfasis en la tecnificación del campo por medio de la instalación de tuberías con multicompuertas para evitar el desperdicio del agua en las conducciones a nivel parcelario; sin embargo, es necesario emplear métodos alternativos al riego de gasto constante o continuo en las parcelas con surcos cerrado, o diseñar de manera óptima éste, para lograr el uso eficiente en las mismas.

El agua de riego se lleva dos tercios del agua que se consume en el mundo entero, en algunos países en vías de desarrollo se eleva hasta el 90 %. Para satisfacer la demanda agrícola prevista para el año 2025 (se espera que para entonces la población mundial sea de unos 7 200 a 8 000 millones de habitantes) harían falta 800 Km³ de agua más, unas diez veces el caudal de agua del río Nilo. Nadie sabe como se suministrará tanta agua adicional sin que se resientan las reservas para usos futuros. La escasez de agua

encierra la peor amenaza contra la producción de alimentos del mañana. Para que la agricultura de riego dé lo que de ella se espera deberá reorganizarse en torno a dos objetivos básicos: reducir la demanda de agua de las explotaciones agrarias y proporcionar al campesino pobre formas baratas de riego. Por suerte, hay amplio margen para mejorar el rendimiento agrícola del agua. De entrada, maximizar el aprovechamiento del riego. Todavía hoy la mayoría de los agricultores inundan el campo entero o llenan de agua los surcos, que corren por gravedad. De este volumen acopiado, las plantas absorben sólo una pequeña fracción; el resto se infiltra en el acuífero, va a parar a cursos fluviales o se evapora. En muchos lugares este proceder no solo derrocha y contamina el agua, sino que degrada también el suelo porque lo erosiona, anega y saliniza. Hay técnicas más respetuosas con el medio y más eficientes que podrían reducir la demanda agrícola.

Para el caso del sector agrícola en México se hace un uso mayor del vital líquido, debido a que capta 78% de los 25 856 millones de m³ que se consumen anualmente, le sigue el servicio público con 12%; la industria con 8% y el uso pecuario con 2% (CNA, Programa Nacional Hidráulico 2001-2006). De este 78% el 80% de la superficie regada es por métodos tradicionales. El riego por gravedad con surcos es el que predomina en forma tradicional a través de la conducción por canales, aunque en el riego tecnificado (por el uso de tuberías en la conducción del agua hasta las parcelas), también se hace por surcos. Los llamados surcos cerrados, es decir, aquellos que están bloqueados en su parte final para evitar que el agua escape, son los más empleados para proporcionar el mejor aprovechamiento del agua.

En cuanto a métodos de riego por surcos, en general, el riego continuo es el que se usa tanto en los surcos abiertos como en los cerrados. En los primeros, donde existen pérdidas por coleos al escapar el agua a los drenes, la eficiencia de aplicación teórica, definida como la relación dada por el volumen de agua que puede ser aprovechada por las raíces de las plantas dividido entre el volumen aplicado en la cabecera del surco, llega a tener un valor próximo al 55 %. En cambio, para surcos cerrados esta eficiencia es mayor, teóricamente cercana al 90 % en surcos con pendientes suaves si el gasto de diseño es el óptimo.

Se han probado con éxito, tanto en la práctica como en la teoría, métodos de riego alternativos al continuo que incrementan la eficiencia de aplicación, entre ellos el de corte posterior o cutback y el riego intermitente para surcos abiertos; y el de riego con incremento de gasto para surcos cerrados. El riego intermitente es el más eficiente, pero tiene la desventaja de ser el más costoso por el hecho de requerir bombas y válvulas electrónicas o dispositivos especiales para crear la intermitencia del flujo. En cambio, el corte posterior y el riego con incremento de gasto no necesitan dispositivo alguno, sino de un manejo sencillo del agua por parte del regador.

El objetivo de este trabajo es dar a conocer un método de riego eficiente alternativo al riego tradicional o continuo que produce eficiencias cercanas a las obtenidas con el método de riego más eficiente (riego intermitente) en surcos cerrados, y alcanzar ahorros importantes de agua, en tanto se llega al momento de emplear de manera generalizada el riego por goteo, donde se producen ahorros de agua del 50 %.

Según los datos ya mencionados, si tan solo se produjera un ahorro del 8% de agua de riego en México, se podría cubrir la demanda total de agua doméstica. Esto es posible si se emplea un método eficiente como el que aquí se expone.

En el capítulo uno se mencionan los sistemas de riego tradicionales que se emplean en México, así como la diferencia y el intervalo de aplicación de cada método.

En el capítulo dos se dan a conocer los aspectos del riego por gravedad en México, debido a que es el sistema en el cual se presenta el mayor desperdicio de agua, así como los parámetros de evaluación de los sistemas de riego para cuantificar su eficiencia.

En el capítulo tres se dan las bases matemáticas, de las cuales parte el modelo de riego del Instituto de Ingeniería, se explica la intervención de las ecuaciones de Saint-Venant y su desarrollo en un modelo hidrodinámico completo, el cual reproduce fielmente los procesos de riego (avance, llenado y receso).

En el capítulo cuatro se dan a conocer las bases del riego intermitente, que es el método comprobado de riego más eficiente por gravedad, y se hace una descripción del método. Se da también a conocer el método de riego con incremento de gasto, sus bases y se describe la manera en que hay que realizarlo.

En el capítulo cinco se muestran los estudios teóricos a partir de los cuales se establecen las comparaciones entre los métodos de riego, se incluyen los resultados de las simulaciones numéricas que permitieron calibrar los parámetros del modelo con base en las mediciones de campo.

En el capítulo seis se muestran los ensayos de campo que se realizaron utilizando el método de riego con incremento de gasto en surcos experimentales, se muestran los valores de la humedad del suelo, los volúmenes de agua ingresados a la parcela, así como también se hacen las comparaciones entre las eficiencias de los diferentes métodos que se compararon en campo.

Por último en el capítulo siete se establecen las conclusiones y recomendaciones para el empleo del método de riego con incremento de gasto.

Capitulo 1. Generalidades del riego por gravedad

Durante mucho años se ha venido regando en forma empírica en la mayoría de las zonas de riego, el agricultor proporciona la lámina de agua según su costumbre y criterio, con la tendencia a dar un máximo de riegos basada en la creencia de que en esa forma obtendrá los mayores rendimientos en sus parcelas.

En los sistemas de riego por gravedad el agua se conduce a las tierras de labor por medio de canales, que se inician por un “principal” que parte de las fuentes de suministro (una presa, un manantial, un grupo de pozos) y a lo largo del cual se van disponiendo canales laterales y después sublaterales, hasta formar una red abierta que conduce el agua hasta cada una de las tierras. Llegando a ellas, el líquido se suministra de diferentes maneras, la más simple y menos eficiente consiste en formar pequeños estanques llamados melgas, que se repletan para dejar que el agua se vaya infiltrando en el terreno. Para ciertos cultivos como el arroz éste es el método de irrigación más adecuado. Otra forma consiste en construir pequeños canales que recorren la tierra de labor y que están provistos de ampliaciones llamadas cajas, en donde se acumula el agua, humedeciendo las zonas adyacentes a la caja, es un método útil para regar frutales. Una tercera forma consiste en nivelar la tierra de labor y colocar un canal de alimentación que la recorre, en su parte más elevada, en sentido normal a la pendiente. En este canal de alimentación se colocan “regaderas” uniformemente espaciadas, que pueden ser pequeños sifones. Así se consigue que el agua avance y se infiltre en las parcelas. Normalmente, si se dispone de surcos, se coloca una regadera en cada surco.

Las consecuencias de estos modos de regar, son desperdicios de agua debidos a sobrerriego, cuyos efectos perjudiciales son variados, sin embargo debido a su importancia en la economía nacional debemos señalar dos:

1. Disminución de la superficie total de riego, ya que el agua desperdiciada generalmente va a los drenes y a los mantos acuíferos, sin la posibilidad de volver a aprovecharla.
-
-

2. La salinización progresiva de los suelos.

Es indudable que existen otros efectos perjudiciales de suma importancia como son la erosión, el pH, solubilización de los elementos nutritivos, etc., pero no es el fin de este trabajo detallarlos.

De lo anterior podemos deducir que el sobrerriego que produce el dar láminas mayores a las necesarias a intervalos inadecuados, tiene consecuencias funestas para los suelos, por tanto hay que evitarlo por medio del uso racional del agua destinada para tal fin.

En un terreno que se riega por métodos superficiales o de gravedad, el uso ineficiente del agua de riego generalmente se refleja en bajos rendimientos tanto en las partes altas como en las bajas de las parcelas. Esto se debe a que en las partes altas se pierden nutrientes por erosión y reciben además poca agua, en cambio en las partes bajas los nutrientes se lixivian y se mantiene demasiada humedad para un buen crecimiento de los cultivos.

La aplicación del riego a los cultivos sin causar erosión es un problema que tiene que ver con el mejoramiento de la fertilidad y estructura de los suelos. A medida que la infiltración del suelo aumenta, se requiere emplear mayores gastos en los surcos y melgas para lograr un riego uniforme aunque el peligro de erosión puede disminuirse con un manejo adecuado del suelo.

Los sistemas de riego por gravedad se caracterizan por no requerir inversiones en cuanto a equipos de bombeo, tuberías, válvulas, etc., pero sí precisan un alto grado de sistematización previa de los cuadros a regar, esto es en cuanto a la nivelación del terreno y a la manera en que se conduce el agua (en muchos casos se ha sustituido a los canales por tuberías adecuadamente hacia el terreno).

Cuando se riega sin pendiente, la superficie a regar es “llana” y el método consiste en llenar el surco o la melga (figura 1.1) con el volumen deseado de agua, luego se cierra este “recipiente” y se pasa a regar los restantes. El surco o la melga permanecerá con agua hasta que el volumen se infiltre. Las pérdidas por este método suceden por percolación (infiltración) excesiva.



Figura 1.1 Riego por gravedad sin pendiente

Cuando se riega con pendiente, el riego consiste en hacer escurrir el agua durante un tiempo suficientemente para que se infiltre el volumen que se desea aplicar (figura 1.2). Las pérdidas en este sistema además de la infiltración diferencial en cada punto se agregan las pérdidas por escurrimiento al pie de la parcela (cuando se trata de surcos abiertos).



Figura 1.2. Riego por gravedad con pendiente.

Si analizamos lo que ocurre cuando se riega de forma continua observamos que; cuando el agua se introduce en el surco desde la cabecera con un caudal Q , comienza a infiltrar y a avanzar en forma simultánea. Conforme el flujo del agua avance el caudal irá disminuyendo, en un valor que depende de múltiples factores. Se puede decir, que el agua tiene una velocidad bi-direccional. La primera en el sentido del flujo y la segunda perpendicular al mismo, es decir, en cuanto a la profundidad. Ambas íntimamente ligadas ya que en la medida que la capacidad de infiltración sea mayor, menor caudal restará metro a metro para el avance superficial.

Ahora bien, entre los factores de los que depende la velocidad de avance del agua en el surco, se puede mencionar a los siguientes:

- Capacidad de infiltración del suelo
- Textura
- Pendiente
- Forma geométrica del surco
- Humedad residual
- Capacidad de campo

1.1 Riego por gravedad no tecnificado

Este sistema de riego es el sistema más antiguo utilizado en todo el mundo y que en la actualidad muchos países en vías de desarrollo (como es el caso de México) se sigue utilizando. Comprende aquellas actividades en las que la conducción y abastecimiento del agua hacia la parcela se hace por medio de métodos rudimentarios como es el caso de

canales excavados en tierra, con lo cual no se garantiza un buen control y homogeneidad de la humedad del suelo.

En este tipo de riego los problemas más frecuentes se deben a una infiltración excesiva durante la conducción (figura 1.3 Canales excavados), ocasionando con ello pérdidas significativas de agua, además de que no se tiene un distribución de agua hacia los surcos de manera uniforme; así a unos se les podrá estar dando más agua de la necesaria mientras que a otros se les dará menos.



Figura 1.3 Riego utilizando canales excavados en tierra.

1.2 Riego por gravedad tecnificado

Existen otros métodos de riego, que si bien siguen distribuyendo el agua a los cultivos por gravedad, buscan evitar alguna de las pérdidas ya mencionadas, así como mejorar el control y la homogeneidad de la humedad en el suelo (figura 1.4), entre ellos podemos nombrar:

- Conducción por tuberías. Reducen las pérdidas por conducción fuera de los límites de los cuadros de cultivo.
- Dosificadores a los surcos. Son dispositivos que logran que el caudal que recibe cada surco sea el mismo, esto se logra mediante el uso de “sifones” para tomar el agua de riego de canales a cielo abierto o de orificios uniformes y regulables si los surcos son abastecidos desde tuberías.

- Riego discontinuos o con dos caudales (llamado también cutback). Especialmente diseñados para riego con pendiente, buscan mejorar la uniformidad de infiltración a lo largo de los surcos y reducir a un mínimo las pérdidas por escurrimiento al pie. Mediante la interrupción del caudal o el uso de caudales variables ya que con caudal grande logran un mojado más rápido de la totalidad del surco y luego aportan un caudal mínimo que se infiltra casi en su totalidad.



Figura 1.4 Riego a base de tuberías y compuertas ajustables

Otra variante de forma de riego son los llamados métodos presurizados. Se les llama presurizados debido a que la conducción del agua hacia el suelo se realiza por tuberías a presión, una vez conducidos al terreno se pueden dividir de acuerdo al número de emisores que se utilicen.

Ventajas

- Se adaptan mejor a las aplicaciones frecuentes de escaso volumen con lo que las plantas reaccionan mejor.
- Son más eficientes en el uso del agua.
- Manejo más económico por no precisar tanta mano de obra y por no humedecer todo el suelo.

Desventajas:

- Suponen mayor nivel de inversión tanto en los equipos de riego como en infraestructura.

1.3 Indicadores para medir eficiencias en el riego por gravedad

El objetivo del riego por gravedad es aplicar la lámina de riego, de manera uniforme a lo largo de la melga o surco. En el caso de surco, la pendiente transversal del terreno no es importante pues su ancho es muy pequeño y cada surco es independiente de los otros por lo que se requiere que la pendiente longitudinal sea uniforme.

El diseño del riego por gravedad consiste en la selección de la longitud, el espaciamiento de los surcos, la pendiente longitudinal y el gasto de riego, con el fin de distribuir uniformemente la lámina de riego previamente calculada.

La eficiencia de riego es un índice que se utiliza para cuantificar el buen uso del agua derivada con fines de riego a una parcela, campo o sistema. La eficiencia de riego (E_r) incluye sobre todo.

- Decisiones sobre manejo de agua, que abarcan tiempos y láminas de aplicación (programación de riegos).
- Todas las pérdidas que se presentan en la entrega del agua de riego en el área irrigada.

Las decisiones de manejo del agua influyen fuertemente en la E_r en sistemas de riego superficiales, en tanto que las condiciones físicas del sitio y las facilidades para el riego controlan mayormente la uniformidad de la aplicación del agua en sistemas de aspersión, de microaspersión y subsuperficiales. En surcos cerrados, cuando se aplica la lámina mínima que requiere el cultivo se dice que ésta es igual a la uniformidad de distribución del sistema (UD). La eficiencia con que el agua es transportada por canales y líneas de tuberías se define como eficiencia de conducción (E_c).

La eficiencia del riego representa el porcentaje de agua que potencialmente es utilizada para la evapotranspiración, transpiración, control de la calidad del cultivo y el lavado de las sales en el perfil del suelo.

La eficiencia del riego se afecta por la uniformidad de distribución y por las pérdidas. Ya sea que la uniformidad de distribución disminuya o las pérdidas aumenten, la eficiencia total del riego generalmente disminuye. La E_r está relacionada directamente con el porcentaje de área que se riega deficientemente o que es objeto de sobrerriego. Por lo tanto, los diseños de los sistemas de riego deben ser aquellos que maximizan las aplicaciones uniformes, minimizan las pérdidas de agua (por manejos poco adecuados) y producen las eficiencias de riego más altas.

De tal manera se puede mencionar que la eficiencia de riego es una función del método de riego utilizado, las condiciones físicas del sistema de riego, la condición del suelo, el tipo de planta o cultivo, el espaciamiento y densidad de población, programación y cantidades de agua que se aplica, la habilidad para el manejo del agua y las condiciones ambientales al momento del riego. La forma en que estas funciones interactúan con respecto a la uniformidad y las pérdidas determinan la eficiencia en el riego.

Dentro de los sistemas de riego por gravedad no se encuentran pérdidas por arrastre de viento u otros; sin embargo, el escurrimiento superficial y la percolación profunda generalmente son mayores en sistemas superficiales con pendiente que en un sistema por aspersión. Generalmente las pérdidas por percolación y escurrimiento son mayores que las de evaporación del suelo. Sin embargo con una combinación apropiada de suelos, cultivos, pendientes del terreno, volumen de agua y un sistema de riego superficial diseñado, instalado y operado apropiadamente, puede obtenerse una eficiencia más alta que la obtenida en un sistema de riego por aspersión.

1.3.1 Eficiencia de conducción en riegos por gravedad

Si se conoce el volumen entregado a la zona de riego V_e y el volumen total aplicado a las parcelas V_p , la eficiencia de conducción E_c se calcula con:

$$E_c = \frac{V_p}{V_e} \quad (1.1)$$

Algunas veces se está interesado en evaluar la eficiencia de conducción de un tramo de la red de distribución. En este caso se calcula con:

$$E_c = \frac{Q_s}{Q_e} \quad (1.2)$$

En la expresión anterior

Q_e y Q_s son los gastos de entrada y de salida del tramo en estudio.

Las pérdidas de conducción (P_c) por unidad de longitud se obtienen con la siguiente ecuación:

$$P_c = \frac{Q_e - Q_s}{L} \quad (1.3)$$

Donde:

L , es la longitud del tramo considerado.

P_c , es el caudal perdido por unidad de longitud

El uso de P_c permite hacer comparaciones objetivas entre diferentes tramos y tipos de canales, estas comparaciones son más representativas si sus características son similares.

Las pérdidas por conducción de un canal se deben a filtraciones, derrames, fugas en las estructuras y evaporación. Las pérdidas de evaporación son de poca importancia y dependen de la superficie libre del agua.

Para estimar esta eficiencia en la conducción se afora en el inicio y en el final del tramo considerado, de preferencia simultáneamente, asegurándose que se tenga régimen permanente y que se conozcan las extracciones laterales.

A continuación se presenta el registro de la Eficiencia de conducción en Distritos de Riego, correspondientes al Año Agrícola 1999 – 2000, en la República Mexicana.

Tabla 1.1 Eficiencias de conducción de distritos de riego

REGION / DISTRITO		EFICIENCIA DE CONDUCCION
001	PABELLON, AGS.	73.1
002	MANTE, TAMPS.	50.9
003	TULA, HGO.	60.4
004	DON MARTIN, N.L.	40.3
005	DELICIAS, CHIH.	57.4
006	PALESTINA, COAH.	45.1
008	MEZTITLAN, HGO.	75.8
009	CD JUAREZ, CHIH.	59.5
010	CULIACAN Y HUMAYA, SIN.	59.0
011	ALTO RIO LERMA, GTO.	71.8
013	ESTADO DE JALISCO.	67.9
014	RIO COLORADO, B.C.	74.6
016	ESTADO DE MORELOS.	55.4
017	REGION LAGUNERA, DGO. Y COAH.	57.1
018	COLONIAS YAQUIS, SON.	57.5
019	TEHUANTEPEC, OAX.	39.3
020	MORELIA, MICH.	65.7
023	SAN JUAN DEL RIO, QRO.	87.3
024	CIENEGA DE CHÁPALA, MICH.	73.9
025	BAJO RIO BRAVO, TAMPS.	43.8
026	BAJO RIO SAN JUAN, TAMPS.	51.5
028	TULANCINGO, HGO.	76.9
029	XICOTENCATL, TAMP.	52.5
030	VALSEQUILLO, PUE.	59.5
031	LAS LAJAS, N.L.	0.0
033	ESTADO DE MEXICO.	60.8
034	ESTADO DE ZACATECAS.	64.9
035	LA ANTIGUA, VER.	67.7
037	ALTAR PIQUITO, SON.	98.9
038	RIO MAYO, SON.	55.0
041	RIO YAQUI, SON.	67.0

Continuación tabla 1.1

	REGION / DISTRITO	EFICIENCIA DE CONDUCCION
042	BUENAVENTURA, CHIH.	59.8
043	ESTADO DE NAYARIT.	57.6
044	JILOTEPEC, MÉX:	61.7
045	TUXPAN, MICH.	57.4
046	CACAHUATAN, CHIS.	65.2
048	TICUL, YUC.	79.8
049	RIO VERDE, S.L.P.	53.1
050	ACUÑA FALCON, TAMPS.	81.0
051	COSTA DE HERMOSILLO, SON.	100.0
052	ESTADO DE DURANGO.	69.3
053	ESTADO DE COLIMA.	74.9
056	ATOYAC-ZAHUAPAN, TLAX.	56.7
057	AMUCO-CUTZAMALA, GRO.	56.0
059	RIO BALCO, CHIS.	60.5
060	EL HIGO, VER.	60.3
061	ZAMORA, MICH.	67.5
063	GUASAVE, SIN.	59.9
066	SANTO DOMINGO, B.C.S.	100.0
068	TEPECUACUI-QUECH, GRO.	60.9
073	LA CONCEPCION, MÉX:	74.3
074	MOCORITO, SIN.	57.1
075	RIO FUERTE, SIN.	66.7
076	VALLE DEL CARRIZO, SIN.	60.0
081	ESTADO DE CAMPECHE	70.0
082	RIO BLANCO, VER.	60.8
083	PAPIGOCHIC, CHIH.	61.7
084	GUAYMAS, SON.	100.0
085	LA BEGOÑA, GTO.	61.3
086	SOTO LA MARINA, TAMPS.	34.0
087	ROSARIO MEZQUITE, MICH.	85.3
088	CHICONAUTLA, MÉX:	68.9
089	EL CARMEN, CHIH.	70.0
090	BAJO RIO CONCHOS, CHIH.	70.0
092	RIO PANUCO, TAMPS.	53.2
092	RIO PANUCO PUJAL COY, S.L.P.	47.6
092	RIO PANUCO CHICAYAN, VER.	69.5
093	TOMATLAN, JAL.	59.5
094	JALISCO SUR.	60.7
095	ATOYAC, GRO.	60.0
096	ARROYOZARGO, MÉX:	69.2
097	LAZARO CARDENAS, MICH.	64.4
098	JOSE MARIA MORELOS, MICH.	52.5

Continuación tabla 1.1

	REGION / DISTRITO	EFICIENCIA DE CONDUCCION
099	QUIT LA MAGDALENA, MICH.	52.9
100	ALFAYUCAN, HGO.	65.0
101	CUXTEPEQUES, CHIS.	61.8
102	RIO HONDO, Q.R.	68.0
103	RIO FLORIDO, CHIH.	67.7
104	CUAJINICULAPAN, GRO.	67.3
105	NEXPA, GRO.	60.9
107	SAN GREGORIO, CHIS.	64.0
108	ELOTA-PIAXTLA, SIN.	72.8
109	RIO SAN LORENZO, SIN.	55.0
110	PROYECTO RIO VERDE, OAX.	65.0

Normalmente la eficiencia también se presenta como el ingreso o ganancia por unidad de agua aplicada.

Este parámetro puede utilizarse para describir la rentabilidad del agua en la agricultura.

Tabla 1.2 Eficiencia de uso del agua de algunos cultivos en $\$/m^3$, (IMTA – CENID – RASPA, 1993)

Cultivo	$\$/m^3$
Algodón	0.747
Alfalfa	0.160
Sorgo grano	0.322
Maíz grano	0.253
Frijol	0.992

Este parámetro sólo incluye los ingresos netos, por lo que se deben considerar costos de los insumos y las tendencias por los precios de las cosechas para un mejor análisis.

En algunas ocasiones este parámetro se utiliza en estudios económicos para describir la eficiencia de uso del agua. En la siguiente tabla se presentan algunos valores de la eficiencia del agua para diferentes sistemas de riego y diferentes cultivos.

Tabla 1.3 Lámina de riego para diferentes cultivos (IMTA – CENID – RASPA, 1993)

No.	Cultivo	Tipo de tecnificación	Rendimiento Ton/ha	Lámina bruta de riego (m)	Rendimiento Ton/Mm ³
1	Alfalfa	Aspersión fijo	118.88	1.40	8.49
		Power roll	105.60	1.40	7.49
		Superficial	91.69	1.57	5.84
2	Melón	Goteo	113.88	0.68	12.60
		Superficial	29.03	1.28	2.20
3	Sandía	Goteo	79.90	0.88	8.99
		Superficial	24.02	1.28	1.87
4	Lechuga	Goteo	73.06	0.489	14.90
		Superficial	29.38	0.508	5.78
5	Repollo	Superficial	58.84	0.475	12.38
6	Tomate	Goteo	109.92	0.719	15.286
7	Vid	Goteo	37.69	1.013	3.72
		Superficial	43.30	1.787	2.42

1.3.2 Eficiencia de aplicación en riegos por gravedad

Se denomina como eficiencia parcelaria de aplicación al producto resultante de relacionar el agua almacenada por el suelo en la zona radicular, o en una profundidad en que se pretende que se almacene conforme a sus propiedades físicas y el agua de riego que se hace llegar a la entrada de la parcela.

La eficiencia de aplicación de riego (E_a) se define como:

$$E_a = \frac{V_a}{V_d} \quad (1.4)$$

Donde:

V_a y V_d son los volúmenes requeridos y disponibles por los cultivos, respectivamente esta eficiencia indica la manera en que se están satisfaciendo las necesidades de agua del cultivo. Con fines agronómicos se recomienda que V_d sea igual a V_a para satisfacer las necesidades de agua del cultivo. En la práctica esto se logra haciendo que V_d sea mayor que V_a , Para ser congruente con esta recomendación se aplican riegos pesados, en donde V_d es mayor que V_a sobre todo en los casos en que el precio del agua es muy bajo.

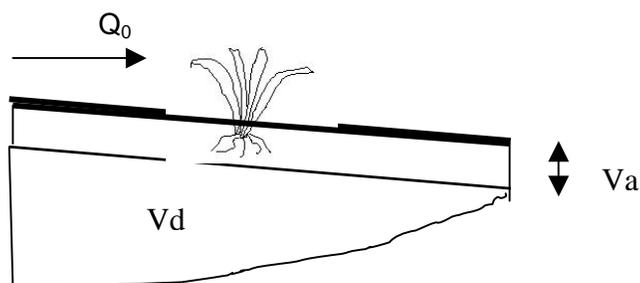


Figura 1.5 Volúmenes requeridos y disponibles para los cultivos.

Entre los problemas a los que se enfrenta el sector agrícola es una nula base de datos en cuanto a eficiencias de aplicación de riego continuo en las parcelas, así podemos hacer mención que las eficiencias de algunos distritos de riego en México son del orden del 59% (IMTA – CENID RASPA 1993, en Suárez 1995). Sin embargo, el rango de valores reales es muy amplio, con eficiencias desde el 40% hasta por arriba del 80% en algunos casos, lo que implica considerar que en muchas ocasiones las eficiencias que se reportan son las medias.

En la siguiente tabla se presentan algunas eficiencias de aplicación en México.

Tabla 1.4 Eficiencia de aplicación de algunos métodos de riego en México, (IMTA – CENID – RASPA, 1993)

Método de riego	Eficiencia de aplicación (%)
Melga	56.3
Surcos	59.2
Aspersión	80.6
Goteo	86.5
Microaspersión	90.6

Las acciones que se pueden realizar para mejorar la eficiencia de aplicación son:

- Mejorar el manejo del agua de riego en la parcela, es decir, no regar muy despacio para que el agua se percole, tampoco regar muy rápido y provocar que el agua escurra hacia los drenes, cuando los surcos son abiertos.

-
-
- Determinar cuando y cuanto regar en forma, determinar en forma precisa la lámina de riego por aplicar.
 - Nivelar los terrenos, sobretodo si el riego es por gravedad.
 - Evitar fugas en las tuberías si el riego es presurizado.

Al producto resultante de multiplicar la Eficiencia de Aplicación (E_a) y la Eficiencia de Conducción (E_c), se le llama Eficiencia Global o Total (E_T).

$$E_T = E_c E_a \quad (1.5)$$

Así, de esta manera el valor reportado por la CNA en cuanto a eficiencia de consumo de agua en el campo del 36%, se refiere a este rubro y por lo que se observa es una eficiencia muy baja. Es por ello que la CNA pretende alcanzar para el año 2006 una eficiencia del 55% en el uso del agua destinado al campo, dicho valor se traduce a que si el campo requiere de 30 mil millones de metros cúbicos de agua anuales en los Distritos de riego, de cumplirse con el objetivo al año se ahorrarían 6 mil millones de metros cúbicos de agua, lo suficiente para regar otras 600 mil hectáreas.

Capitulo 2. El riego tradicional o continuo y sus eficiencias de aplicación

El agua de riego tiene por objeto humedecer la zona radicular del suelo para el crecimiento de la planta. Se aplica cuando el porcentaje de humedad disminuye o es igual a un valor previamente determinado, generalmente por arriba del punto conocido como punto de marchitamiento, pero sin exceder la capacidad de campo del suelo porque entonces el agua se infiltraría por debajo de la zona radicular y no sería utilizada por la planta. Después por el efecto de la evotranspiración, el porcentaje de humedad vuelve a descender hasta que se aplica el siguiente riego. Y así la lámina de agua requerida por la planta desde un cierto porcentaje de humedad hasta la capacidad de campo recibe el nombre de dosis útil, la cual debe quedar almacenada en la zona radicular del suelo para que las raíces las aprovechen en el desarrollo de la planta.

En el riego superficial, las fuentes más importantes de pérdidas de agua comprenden las fugas en la conducción, el manejo poco apropiado del agua, el escurrimiento superficial en surcos abiertos (coleos), la percolación profunda (infiltración) y la evaporación directa de la superficie del agua y del suelo húmedo.

2.1 El riego por surcos cerrados y abiertos

El riego por surcos es seguramente uno de los primeros métodos utilizados por el hombre en la agricultura de riego. En estudios arqueológicos se asegura que nuestros antecesores usaban el riego desde al año 1500 a.C. Los derechos de agua celosamente

guardados entre las comunidades indígenas de Oaxaca de la Mesa Central y de otras zonas de México, son también evidencias del muy antiguo uso agrícola del agua. La escasez relativa del agua y su disponibilidad a lo largo de una parte del año contribuyeron seguramente desde épocas precortesianas, al empleo de riego por surcos. La antigua tradición mexicana en el riego ha sido factor esencial en la rápida utilización de los sistemas de riego construidos en los últimos años.

El riego por surcos ha evolucionado en el correr del siglo XXI. El método tradicional de muy amplias regaderas, transversales a la dirección de los surcos y dispuestas paralelamente a distancias variables con regaderas adyacentes repartidoras de agua a los surcos, mejoró con la introducción de regaderas de dimensiones variables, pequeñas o grandes, además de contar con tubos sifones que reparten el agua directamente a los surcos. Por ejemplo, en Hawai se introdujeron, para el riego de laderas, los ductos o canaletas de aluminio con orificios en el fondo para entregar agua a cada surco; así se alargó la longitud del surco y se disminuyó el terreno perdido en regaderas. Recientemente la introducción de tubos flexibles de plástico ha mejorado considerablemente la factibilidad del riego por surcos en terrenos de escasa o mediana pendiente debido a que se pueden mover y colocar de manera más fácil que los tubos de acero, por ejemplo.

Ya que la mayor erosión ocurre cuando la tierra está sembrada con cultivos regados por medio de surcos, la evaluación de este sistema en la práctica es muy importante, especialmente cuando las pendientes son pronunciadas. Dentro de la evaluación se incluyen la erosionabilidad del suelo, tamaño de la descarga, la pendiente y la forma del surco. El aumento ya sea de la pendiente o de la magnitud del gasto, tienden a aumentar el efecto de la erosión. Disminuyendo la magnitud del gasto, reduciendo la pendiente, usando surcos anchos y poco profundos, tiende a aminorarse la erosión.

Geometría de los surcos

Sección de los surcos

La sección transversal del surco ha de ser suficientemente amplia para conducir el caudal necesario. Los surcos estrechos y de poca profundidad admiten un caudal escaso, que influye negativamente sobre la eficiencia y uniformidad del riego.

La forma más común es la sección "V" abierta, con una altura que varía, sobre todo, con el tipo de cultivo; para cultivos de una sola fila por surcos y esparcimiento reducido se suele dar una altura de 20 cm, mientras que en cultivos a mayor espaciamiento, con una o dos filas de plantas por surco, se puede llegar hasta una altura de 80 cm. Al hacer los surcos hay que tener en cuenta que al humedecer el terreno con el primer riego se reduce la altura.

En suelos arcillosos, con baja velocidad de infiltración, se puede aumentar el perímetro mojado haciendo los surcos en forma de "u", con una anchura de fondo de 20 a 40 cm en hortalizas y hasta 60 cm en frutales. En este tipo de suelos, los surcos de sección en "U"

tienen la ventaja sobre los de la sección en “V” de que el perímetro mojado varía poco con la altura del agua y, por tanto, la infiltración es más uniforme (figura. 2.1). En campo la configuración que pueda tener el surco con la aplicación de los riegos se ve alterada, así podemos encontrar que un surco que inicialmente era triangular ahora es trapecial, esto debido al efecto de erosión y deposito de material.



Figura 2.1 Secciones de los surcos de riego

Separación de los surcos

La separación entre el eje de los surcos depende de los siguientes factores: tipo de suelo, tipo de cultivo y maquinaria que se pretende utilizar.

El objetivo principal al determinar la separación de los surcos es asegurar que el movimiento lateral del agua entre dos surcos consecutivos moje la totalidad de la zona radical de la planta, antes de que alcance profundidades superiores a las previstas en el riego y existan pérdidas de agua por percolación profunda. El movimiento horizontal y vertical del agua en el suelo depende fundamentalmente de su textura.

En la práctica es aconsejable seguir algunas recomendaciones, como por ejemplo:

- En suelos arenosos el agua penetra más verticalmente que lateralmente. En estos suelos la separación máxima de los surcos será de 50 cm.
- En los suelos de textura media se produce infiltración compensada tanto en sentido vertical como en sentido horizontal. Los surcos pueden tener una separación de 50 a 100 cm.
- En suelos arcillosos el agua penetra con más rapidez en sentido horizontal que en sentido vertical, con lo cual los surcos pueden tener una separación de hasta 1.50 m.

En campo, para conocer si la separación de los surcos es la adecuada, se riega un surco con la cantidad de agua que se ha de usar normalmente. Se dejan transcurrir 48 horas para que se establezca el movimiento del agua en el suelo y, a continuación se hace un corte en el terreno para observar el desplazamiento lateral del agua. Conviene que haya una pequeña superposición entre las zonas húmedas de dos surcos consecutivos para asegurar un humedecimiento completo.

En ocasiones no es posible acomodar la separación de los surcos a la textura del suelo, ya que es preciso tener en cuenta el cultivo y la maquinaria. Hay cultivos tales como el maíz, la papa, el algodón, etc., que requieren un surco entre dos filas consecutivas, con una separación entre 60 y 100 cm. En otros cultivos, como la lechuga, la zanahoria, la cebolla, etc., con un solo surco se pueden regar dos filas de plantas que se encuentran sobre el mismo bordo, con unas separaciones respectivas de 40 y 60 cm. Los cultivos con marco de plantación amplio, como los frutales, requieren más de un surco entre cada dos filas de plantas.

Pendiente de los surcos

La uniformidad del riego se consigue, aparte de otras consideraciones, cuando los surcos tienen la misma pendiente en toda su longitud, pues en caso contrario se originan zonas con falta de agua y otras con exceso, pudiendo llegar a encharcamientos y desbordamientos del agua de un surco a otro. Además, en las zonas de mayor pendiente se puede originar erosión.

La velocidad del agua en el surco está en razón directa con el caudal y la pendiente, y en razón inversa a la rugosidad del mismo.

Al aumentar la pendiente de los surcos aumenta la velocidad del agua y existe peligro de erosión. La pendiente óptima está comprendida entre 0.23% y 0.5%, pudiendo llegar hasta un máximo de 2%. Con caudales pequeños y surcos cortos se pueden sobrepasar esas cifras, a condición de que haya una mano de obra experimentada, en la aplicación de riegos.

Cuando la parcela tiene una pendiente excesiva en sentido longitudinal los surcos se orientan en sentido oblicuo. En este caso hay que dar a los surcos el tamaño suficiente para evitar los desbordamientos: Cuando por excesiva pendiente no sea posible conseguir surcos en sentido diagonal se recurre a los surcos en contorno, siguiendo ligeramente las curvas de nivel. Estos surcos en contorno pueden tener mayor pendiente que los surcos rectos y son aceptables en parcelas que tengan hasta el 10% de pendiente máxima.

Longitud de los surcos

La longitud de los surcos viene condicionada por los siguientes factores:

Economía: A medida que disminuye la longitud de los surcos aumenta las necesidades de mano de obra y los costos de instalación, ya que los surcos cortos exigen mayor longitud de acequias o tuberías de abastecimiento, que dificultan el uso de maquinaria, y se incrementa la superficie que queda improductiva.

Textura del suelo: En suelos de textura arenosa hay que limitar la longitud de los surcos, para evitar la larga permanencia del agua en los primeros tramos del surco, con las consiguientes pérdidas por percolación profunda.

Cultivo: Las plantas de raíces profundas necesitan mayor dosis de riego que las de raíces someras; por tanto, en aquellas se puede aumentar la longitud de los surcos, con el fin de incrementar la permanencia de agua en los mismos.

A la vista de estas consideraciones habrá que buscar un equilibrio entre las consecuencias que se derivan de los surcos largos (más económicos) o cortos (mayor eficiencia de riego). Como regla general se puede aconsejar hacer los surcos tan largos como sea posible, a condición de que se tenga controlada la erosión y haya una eficiencia de riego razonable. Los surcos cortos pueden ser convenientes en el cultivo de hortalizas, que requieren una mano de obra abundante y en donde, en muchos casos, los surcos y bordos se construyen a mano.

Por lo general, en suelos arenosos los surcos deben ser más cortos que en suelos arcillosos. Con pendientes suaves (inferiores al 0.3%) la longitud del surco puede aumentar a medida que aumenta la pendiente, pero a partir de esa cifra es preciso disminuir la longitud del surco conforme aumenta la pendiente, ya que debe reducirse el caudal de agua para evitar la erosión.

En la tabla 2.1 se dan unas normas orientativas de longitud de surcos en función de su pendiente, la textura del suelo y la altura de agua aplicada. En la práctica conviene hacer las comprobaciones pertinentes para adecuar esas cifras en cada caso particular.

Tabla 2.1 Longitudes máximas de surcos para diferentes suelos, pendientes y profundidad de agua aplicada.

Pendiente del surco (%)	Arcillas				Limos				Arenas			
	Profundidad media de agua aplicada (cm)											
	7.5	15	22.5	30	5	10	15	20	5	7.5	10	12.5
0.05	300	400	400	400	120	270	400	400	60	90	150	190
0.1	340	440	470	500	180	340	440	470	90	120	190	220
0.2	370	470	530	620	220	370	470	530	120	190	250	300
0.3	400	500	620	800	280	400	500	600	150	220	280	400
0.5	400	500	560	750	280	370	470	530	120	190	250	300
1.0	280	400	500	600	250	300	370	470	90	150	220	250
1.5	250	340	430	500	220	280	340	400	80	120	190	220
2.0	220	270	340	400	180	250	300	340	60	90	150	190

Caudal de riego

El caudal o gasto de cada surco debe ajustarse a la longitud y pendiente del mismo y a la naturaleza del suelo. A mayor caudal corresponde un avance más rápido del agua en el surco. Por lo general, el mayor aprovechamiento del riego se consigue cuando el mojado del surco se hace con el avance más rápido posible, y ello requiere utilizar el máximo caudal que no cause erosión (gasto máximo no erosivo). Una vez que el agua ha llegado al extremo del surco se reduce el caudal de forma que satisfaga únicamente los requerimientos de la velocidad de infiltración y se mantiene hasta el final del riego.

En surcos el gasto máximo no erosivo se puede calcular de manera sencilla con diversos criterios:

- Marr, en 1967, propuso la siguiente relación empírica:

$$Q = \frac{0.6}{S} \quad (2.1)$$

Donde:

Q = Gasto máximo no erosivo expresado en litros/segundo

S= Pendiente del surco expresado en porcentaje

Los valores que se obtienen con esta ecuación son adecuados para suelos de textura media y con pendiente superior al 0.15 %. En suelos arcillosos se puede aumentar el caudal y en los arenosos habrá que disminuirlo.

La ecuación fue analizada por Booher en 1974, obteniéndose la siguiente tabla de conclusiones:

Tabla 2.2 Tabla de gastos máximos no erosivos

Pendiente del surco, en %	Gasto máximo no erosivo en l/s	Observaciones
0.1	6.0	El gasto indicado es, aproximadamente, el doble de la capacidad de conducción de la mayoría de los surcos que normalmente operan con una pendiente de 0.1%; por lo tanto, se recomienda adoptar $Q_{max} = 3$ l/s. La erosión es insignificante en surcos con flujo a plena capacidad sobre esta pendiente.
0.3	2.0	Una pendiente de 0.3% está cercana del limite superior en que el flujo en los surcos a plena capacidad no producirá erosión grave.
0.5	1.2	Los surcos con esta pendiente se erosionarán, a menos que el gasto sea considerablemente menor que la capacidad del surco.
2.0	0.3	Se muestra claramente la reducción de gasto necesaria para evitar erosión grave sobre esta pendiente. Se considera que ésta es la pendiente máxima permisible para surcos cultivados.

- Un criterio menos conservador es el propuesto por Criddle, en 1956 y presentado por el U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service en la publicación "Methods for Evaluation Irrigation Systems", Agricultural Handbook, número 82).

$$Q = \frac{0.75}{S} \quad (2.2)$$

Donde:

Q = Gasto máximo no erosivo expresado en litros/segundo

S= Pendiente del surco expresado en porcentaje

Existen otros criterios basados en la verificación de la velocidad máxima no erosiva.

- En el libro denominado El Riego (Aldárov, 1985), sugiere que antes de adoptar un gasto se verifique que la velocidad del flujo, calculada con una ecuación para flujo uniforme derivada de la ecuación de Chezy, cumpla con la siguiente relación:

$$V \leq 0.2 \text{ m/s} \quad (2.3)$$

- En el libro Surface of irrigation (Walker, 1987), se sugiere la siguiente relación:

$$0.13 \text{ m/s} \leq V \leq 0.22 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

Velocidad de infiltración del suelo

Una sobrestimación de la capacidad de infiltración del suelo para el caso de surcos abiertos, conduce normalmente a que el diseño basado en ciertas eficiencias de aplicación y distribución resulte un sistema de riego con una longitud de surco menor a la que se obtendría con la infiltración correcta y tiempos de riego mayores. Ello origina que en la práctica se presenten mayores pérdidas por el escape del agua al final del surco (coleos), que las esperadas de acuerdo con el diseño preliminar.

Por el contrario, subestimar la capacidad de infiltración conduce a un sistema de riego con una longitud mayor a la que se obtendría considerando la infiltración correcta, por lo tanto, en la práctica se obtienen pérdidas por infiltración profunda mayores a las estimadas.

En ambos casos, los sistemas de riego serán incapaces de suministrar al suelo, volúmenes de agua apropiados para satisfacer adecuadamente las necesidades hídricas de los cultivos, lo que se traduce indirectamente en rendimientos agrícolas menores a los esperados.

En la tabla 2.3, se dan algunos valores obtenidos experimentalmente en cuanto a velocidades de infiltración y capacidades de retención de agua en los suelos.

Tabla 2.3 Velocidades de infiltración y capacidad de retención de agua de distintos tipos de suelo

Textura del suelo	Velocidad de infiltración (cm/min)	Capacidad de retención de agua por cada 30 centímetros de profundidad (cm)
Textura muy gruesa. Arenas muy gruesas (1.0 a 2.0 mm)	0.166	1.5
Textura gruesa. Arenas gruesas, arenas finas y arenosos francos (0.50 a 1.0 mm)	0.083	3.0
Textura moderadamente gruesa. Migajones arenosos y migajones arenosos finos (0.25 a 0.50 mm)	0.066	4.2
Textura media. Migajones arenosos muy finos y migajones limosos (0.10 a 0.25 mm)	0.022	5.5
Textura moderadamente fina. Migajones arcillosos, migajones arcillo-limosos y migajones arcillo-arenosos (0.50 a 0.10 mm)	0.01	6.2
Textura fina. Arcillas arenosas, arcillas limosas y arcillas (menos de 0.05 mm)	0.008	7.5

La velocidad de infiltración del suelo indica la rapidez con que éste absorbe el agua. Si el gasto aplicado es mayor que la capacidad de infiltración, cierta cantidad de agua se estancará o correrá por el surco. El valor de la velocidad de infiltración es básico para determinar la cantidad de agua necesaria para el surco, así mismo es necesaria para verificar si en verdad se está suministrando a la planta la cantidad de agua necesaria para sus funciones (figura 2.2)

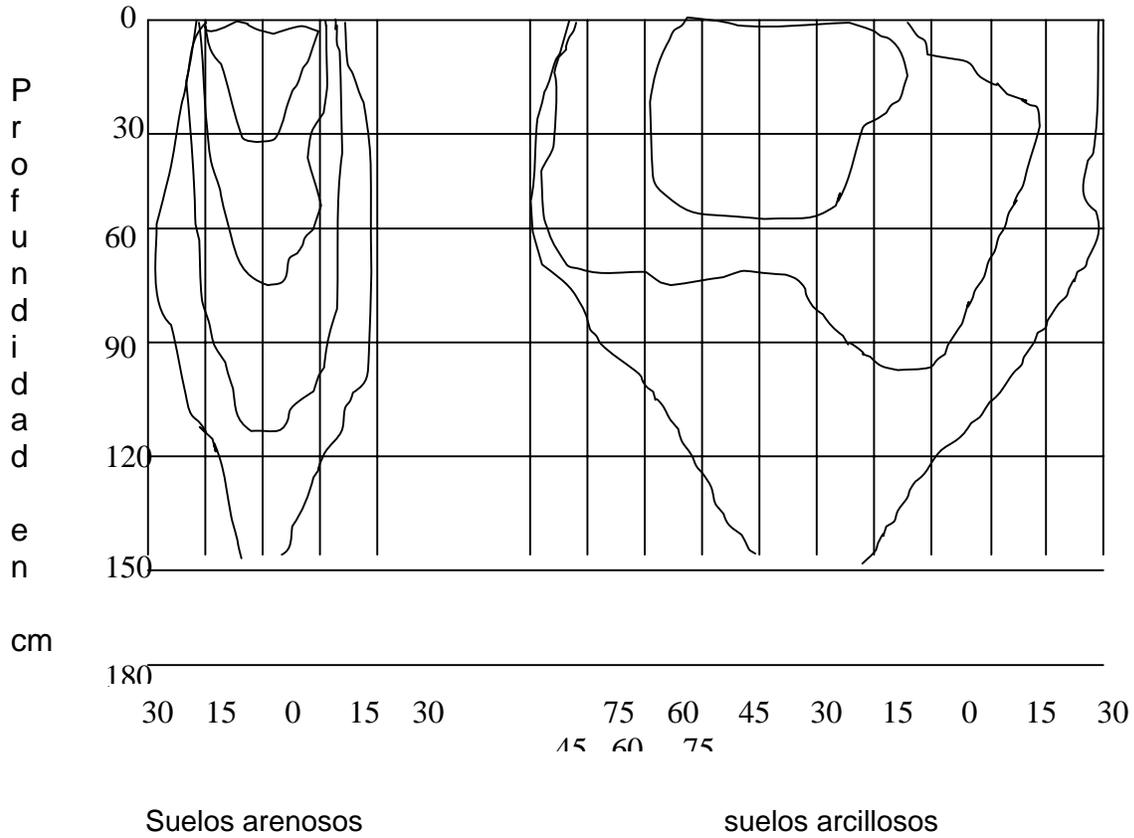
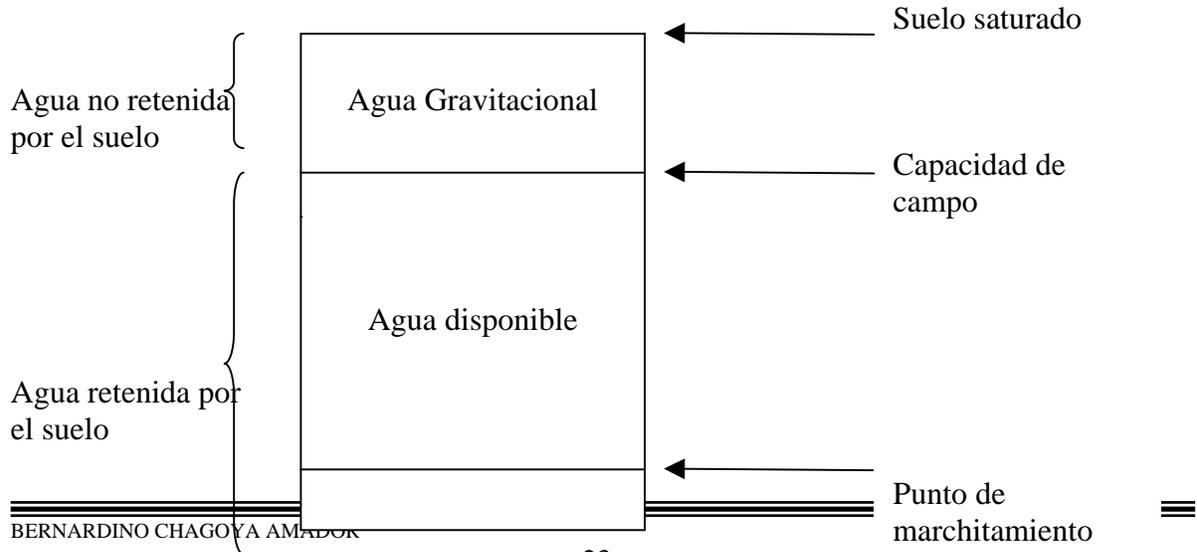


Figura. 2.2 Infiltración de agua en suelos de diferente textura

La capacidad de retención del suelo, llamada también capacidad de campo, es la cantidad de agua que el suelo retiene contra la fuerza de gravedad, y depende de la textura y profundidad del suelo (figura. 2.3). No toda el agua retenida queda a disponibilidad de las plantas, pues ellas absorben el agua según la profundidad y distribución de su sistema radicular y entonces la capacidad de retención del suelo y la profundidad de las raíces del cultivo definen la lámina de riego (tabla 2.4).



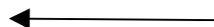


Figura 2.3 Distribución del agua en los suelos de cultivo

Tabla 2.4 Profundidad efectiva del sistema radicular de algunos cultivos

Cultivo	Profundidad radicular (cm)
Aguacate	90 – 100
Alfalfa	90 – 120
Algodón	80 – 120
Almendro	90 – 120
Berenjena	50 – 60
Cacahuate	90 – 100
Café	90 – 120
Camote	60 – 90
Caña de azúcar	100 – 110
Cebada	60 – 100
Cebolla	40 – 50
Chícharo	60 – 90
Ciruelo	90 – 100
Cítricos	90 – 100
Clavel	30 – 40
Durazno	90 – 100
Fresa	30 – 50
Frijol	50 – 80
Frutales de hoja caduca	100 – 120
Girasol	90 – 100
Lechuga	30 – 40
Leguminosas grano	50 – 100
Maíz grano	80 – 120
Maíz verde	80 – 120
Manzano	90 – 100
Melón	80 – 100
Nogal	110 – 120
Olivo	90 – 110
Palmera	80 – 90
Papa	40 – 80
Pepino	60 – 90
Pera	80 – 110
Pimiento	40 – 80
Piña	40 – 60
Plátano	90 – 120
Praderas	60 – 100
Remolacha azucarera	60 – 100
Soya	60 – 100

Sorgo para grano	80 – 90
Tabaco	50 – 90
Tomate	40 – 100
Trébol	70 – 90
Trigo	60 – 120
Vid	80 – 90
Zanahoria	40 – 50

2.1.1 Riego por surcos cerrados

Como ya se mencionó el riego continuo (entendiéndose como aquel método en el que el gasto de alimentación al surco es constante y no se interrumpe durante el tiempo de riego), es el más utilizado en México.

Los surcos se usan para casi todos los cultivos en hileras, que se riegan por métodos superficiales. Los cultivos en que las plantas crecen muy juntas, como alfalfares o los pastos sobre suelos que se endurecen o forman costras nocivas después de ser humedecidos, pueden regarse con surcos pequeños (también llamados corrugaciones).

En los riegos por surcos, el agua es conducida por un canal o por una tubería a lo largo de la orilla superior del campo. De dicho canal el agua se desvía hacia surcos que corren en el sentido de la pendiente. Los surcos deben ser lo suficientemente largos para permitir el manejo económico del equipo agrícola entre regaderas, pero no tan largos que no se pueda asegurar un riego uniforme. Las tendidas deben ser tan largas como la conservación del suelo lo permita. Esto mantendrá los recorridos de las maquinaria y los gastos empleados en los surcos, dentro de un mínimo.

Se entenderá por surco cerrado aquel en el que la parte final del surco se encuentra cerrada o taponeada y con ello se evita que el agua que escurre se escape hacia parcelas vecinas.

2.1.2 Riego por surcos abiertos

Por surcos abiertos se entiende que son aquellos en los cuales su parte inferior se encuentran a descarga libre y el agua puede escapar hacia los terrenos adyacentes. Para este tipo de surcos se tienen las mismas consideraciones que para el caso de surcos cerrados, solo que debe ampliarse el análisis por el hecho de que el agua escapa y este corresponde al caso del drenaje, en el cual se debe tener cuidado de que el agua que escurre hacia él no exceda los canales construidos para tal fin.

2.2 Eficiencias parcelarias del riego continuo

Como ya se mencionó con anterioridad, dependiendo del tipo de evaluación con el que se quiera emplear es la información que se requiere conocer. Para la evaluación del riego continuo se deberán de considerar los siguientes conceptos.

2.2.1 Lámina media aplicada al terreno

Para esta evaluación se requiere conocer el caudal que entra al surco y el tiempo de alimentación al mismo, para calcular el volumen total de agua aplicada. Además, con el dato de área regada, se puede calcular la lámina de riego media, con la expresión.

$$Z = \frac{Q_o Tr}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

\bar{Z} , es la lámina media aplicada al terreno, en cm.

Q_o , es el caudal por el surco, en l/s.

Tr , es el tiempo de riego, en s.

A , es el área en planta del surco, en dm^2 .

2.2.2 Eficiencia de aplicación

Un parámetro que permite definir numéricamente la manera de regar, es la Eficiencia de Aplicación (E_a). Ésta determina la relación entre el volumen de agua que queda disponible para el cultivo en la zona de raíces, y el volumen total aplicado al surco durante el riego, esto es:

$$E_a = \frac{V_a}{V_d} \quad (2.6)$$

Donde:

V_d , es el volumen total aplicado al surco, en m^3/s .

V_a , es el volumen disponible en la zona de las raíces o que será aprovechado por los cultivos, en m^3 .

El volumen aplicado se calcula con la ecuación:

$$Vd = QoTr \quad (2.7)$$

Donde:

Qo , es el gasto de riego aplicado al surco, en m^3/s

Tr , es el tiempo total de alimentación, en s.

En la práctica, Vd es relativamente fácil de estimar, pues de acuerdo con la expresión anterior, únicamente se requiere medir el gasto de riego aplicado y el tiempo utilizado para regar el surco.

El volumen que queda disponible para los cultivos (Va) también se puede estimar con alguna fórmula de evapotranspiración, por ejemplo con Blaney-Criddle.

Para el caso de riego por gravedad en surcos cerrados, Va se define como:

$$Va = Vd - Vi \quad (2.8)$$

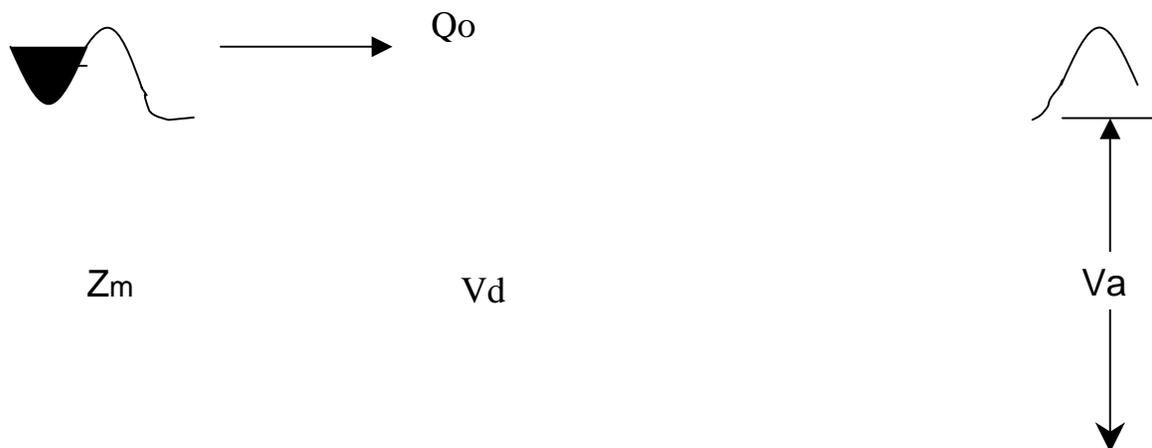
Donde:

Vi , es el volumen que se infiltra más allá de la zona radicular y no es aprovechable por el cultivo, en m^3 .

Si los surcos de una parcela tienen una separación D , una longitud L y la lámina neta que aprovechan las raíces de las plantas es Zm , entonces, Va también puede calcularse como:

$$Va = LDZm \quad (2.9)$$

En la figura 2.7 se presenta un esquema del perfil de humedecimiento del riego por gravedad en una prueba con surcos cerrados, en ella, L es la longitud del surco y Zm la lámina neta o dosis requerida por la planta.



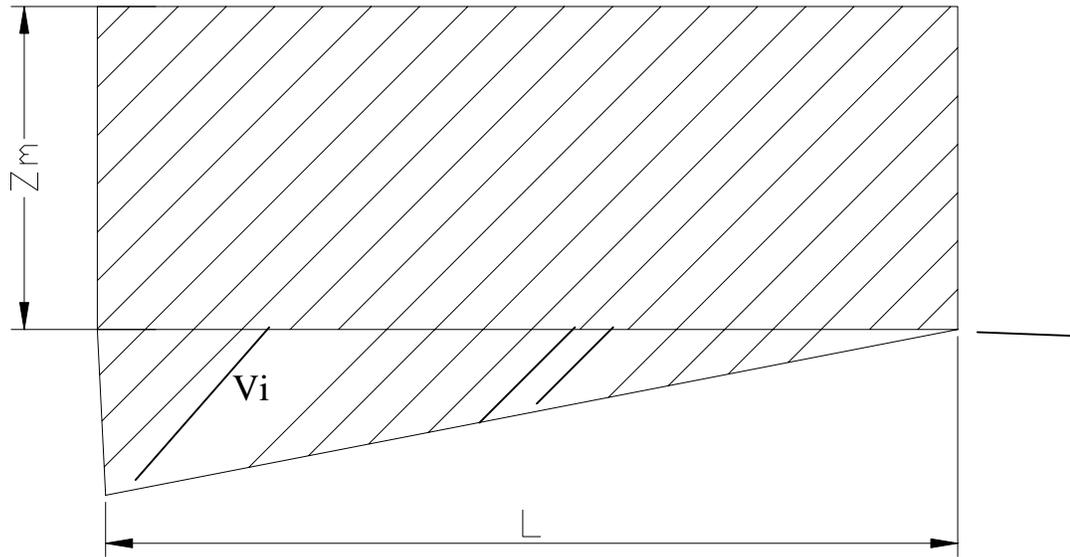


Figura 2.7 Perfil de humedecimiento del riego por gravedad en surcos cerrados

2.2.3 Eficiencia de uniformidad

Al aplicar el riego, lo ideal es que en todas las plantas reciban la misma cantidad de agua, lo que equivale a aplicar una lámina uniforme en toda la longitud del surco. Para evaluar esta uniformidad en la distribución de la lámina infiltrada se utiliza el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (CUC)

$$CUC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n\bar{Z}} \quad (2.10)$$

Donde:

Z_i , es la lámina infiltrada en cualquier sección i , en cm.

\bar{Z} , es la lámina infiltrada media, en cm.

n , es el número de secciones consideradas a lo largo del surco.

Generalmente se considera que un CUC mayor o igual que 0.8 es aceptable en el riego por gravedad.

2.2.4 Uniformidad de distribución

La Uniformidad de Distribución (UD) es un parámetro más reciente (Burt et al., 1997) que permite evaluar de una manera práctica la buena o mala distribución de las láminas de riego infiltradas y se define como:

$$UD = \frac{Z_{\min}}{\bar{Z}} \quad (2.11)$$

Donde :

Z_{\min} , es la lámina de infiltración mínima en alguna sección del surco.

\bar{Z} , es la lámina infiltrada media, en cm.

En surcos cerrados, cuando Z_{\min} coincide con la dosis de riego Z_m , es decir, cuando se riega sin déficit de humedad el suelo y se satisfacer el requerimiento de agua de la planta en toda la longitud del surco, la uniformidad de distribución es igual a la eficiencia de aplicación, esto es, $UD = E_a$.

Las variaciones de las eficiencias que se presentan de un distrito o de una región a otros, o inclusive de una misma zona de riego. Indica que además de un buen diseño del sistema de riego, es necesario corregir las fallas que cometen los regadores en el manejo del agua durante el mismo

Además de todo lo anterior es necesario definir un Índice de Productividad (IP) y el de Utilización del Agua (IUA), son importantes para definir estrategias en la toma de decisiones que destinen inversiones públicas para incrementar las eficiencias y elevar la productividad (Trava, 1984; en Suárez, 1995). Se definen como:

$$IP = \frac{P_p}{V_b} \quad (2.12)$$

Donde:

IP, es el índice de productividad, en miles de \$/Millones de m^3 .

P_p , el valor de la productividad, en miles de \$.

V_b , es el volumen bruto utilizado, en Millones de m^3 (Mm^3).

$$IUA = \frac{IP}{(V_b / L_b)} \quad (2.13)$$

Donde:

IUA, es el índice de utilización del agua/ Millones de m².

Vb, es el volumen bruto utilizado, en Mm³.

Lb, es la lámina bruta utilizada, en m.

Otra característica de importancia igual o mayor que las anteriores, es el correspondiente al ahorro de agua. El cual puede calcularse a partir de los volúmenes de agua empleados en dos métodos de riego, uno menos eficiente, con eficiencia de aplicación (Ea)₁, y otro más eficiente con eficiencia de aplicación (Ea)₂.

El ahorro de agua (Ag) con volúmenes se calcula como:

$$Ag = \frac{(Vd)_1 - (Vd)_2}{(Vd)_1} = 1 - \frac{(Vd)_2}{(Vd)_1} \quad (2.14)$$

Donde:

(Vd)₁, es el volumen de agua empleado con el método menos eficiente.

(Vd)₂, es el volumen de agua empleado con el método más eficiente.

Al multiplicar y dividir el segundo termino de la ecuación anterior por Va que es el volumen que aprovechan las plantas, por la ecuación 2.6 se obtiene el ahorro de agua en términos de las eficiencias.

$$Ag = 1 - \frac{(Vd)_2}{(Vd)_1} \frac{Va}{Va} = 1 - \frac{(Ea)_1}{(Ea)_2} \quad (2.15)$$

Capitulo 3. Modelación matemática

Generalmente, los modelos matemáticos para el riego por surcos se refieren a los abiertos y en muchos casos son simplificados, es decir, que no resuelven las ecuaciones hidrodinámicas completas. Otros, aún sin ser simplificados, usan la fórmula de Kostiakov para calcular la infiltración del suelo, la cual no incluye la humedad inicial del mismo, por ejemplo, el SIRMOD (1987) que, además no emplea el perímetro mojado para determinar la infiltración sino el ancho entre surcos. A la fecha las simulaciones numéricas del flujo en sistemas de riego por gravedad se han realizado con diversos tipos de modelos, como son:

Modelos hidrodinámicos. Basados en versiones completas de las ecuaciones de Saint-Venant. Y que describen al fenómeno en su parte superficial, considerando flujo unidimensional, siendo éste el que mejor representa las fases de riego.

Modelos de inercia-cero. Basándose en versiones simplificadas de las ecuaciones de Saint-Venant, en las cuales a la ecuación de conservación de cantidad de movimiento se le han eliminado los términos inerciales, lo cual es cuestionable cuando se tienen pendientes y gastos considerablemente altos.

Modelos basados en la ecuación de onda cinemática. La cual tiene la limitación de que la ecuación de cantidad de movimiento se reduce a una relación de flujo normalizado (o flujo uniforme), o sea, se supone que las áreas y velocidades del flujo se hallan relacionadas por alguna expresión derivada de las ecuaciones de Chezy, como la de Manning. Esta situación limita directamente los modelos a sistemas de riego con pendiente mayor que cero. Además, los modelos resultantes, generalmente no consideran la influencia de la condición de frontera de aguas debajo de la región del flujo y consecuentemente no se puede tener control sobre el tipo de régimen que se presenta en la región del flujo.

Modelos de Balance de Volumen, basados en la ecuación de conservación de masa y una relación de almacenamiento-descarga que sustituye la ecuación de la energía. Dichos modelos requieren la estimación de una serie de factores de peso que dependen de datos del comportamiento propio del fenómeno, es decir, que en la realidad son modelos calibrados. Se aplican únicamente a los sistemas en que se han calibrado o en otros con características muy semejantes.

Los criterios de diseño para el riego parcelario tiene dos escuelas, la empírica, que prefieren la experiencia de la práctica de riego en el campo, y la teórica, que pretende aplicar el análisis hidráulico sofisticado (Cuenca, 1989). Los adeptos a esta última son cada vez más, pues presenta la gran ventaja de que los ensayos, posteriormente comprobados en el campo, se realizan en pocos minutos con el uso de las computadoras.

El flujo a superficie libre sobre un surco es transitorio y espacialmente variado debido a que el agua se infiltra en el suelo conforme avanza hacia aguas abajo, disminuyendo el caudal. Las ecuaciones que reproducen este tipo de flujo son las de cantidad de movimiento y de continuidad, ambas conocidas como las ecuaciones de Saint-Venant (Wylie y Streeter, 1978).

En el presente capítulo sólo se pretende dar a conocer el modelo hidrodinámico completo, ya que es ampliamente reconocido como el único que reproduce fielmente las etapas de avance del agua dentro de los surcos.

3.1 Modelo hidrodinámico completo.

3.1.1 Ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant (en Chow, 1998) son probablemente las más conocidas y comúnmente empleadas para el análisis del flujo transitoria en canales y su deducción se puede obtener en la forma que se muestra a continuación:

- Se parte de la ecuación de conservación de masa o de continuidad.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (3.1)$$

- También se utiliza la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento o ecuación dinámica.

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{V}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (3.2)$$

Donde:

x, es la longitud del surco.

y, es el tirante del flujo.

V, es la velocidad media del flujo.

S_f , es la pendiente hidráulica calculada con la fórmula de manning.

S_0 , es la pendiente del canal.

Q, es el gasto en una sección hidráulica.

B, es el ancho de la superficie libre del agua.

g, es la aceleración de la gravedad.

q, es el gasto de infiltración por unidad de longitud.

3.1.2 Solución a las ecuaciones de Saint-Venant.

Estas ecuaciones presentan como incógnitas por resolver el gasto y el tirante del flujo en diferentes secciones. Aquí se supone que el canal o surco es prismático, esto es, que no cambia la sección transversal a lo largo del mismo, la pendiente es pequeña, menor al 10 %; y el suelo es homogéneo, es decir, la conductividad hidráulica del mismo es constante a lo largo del surco.

La ecuación dinámica puede escribirse en la forma (Wylie-Streeter, 1978):

$$(1 - F^2) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + S_f - S_0 = 0 \quad (3.3)$$

Donde:

F, es el número de Froude, adimensional.

y, el tirante del flujo, en m.

Q, es el gasto, en m³/s.

A, es el área de la sección transversal, en m².

S_f , la pendiente de fricción, adimensional.

S_0 , la pendiente del canal, adimensional.

x, la dirección del flujo, en m.

t, el tiempo, en s.

A su vez la ecuación de continuidad puede escribirse como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \quad (3.4)$$

Donde:

B, es el ancho de la superficie libre del agua, en m.

Q, el gasto de infiltración por unidad de longitud, en m³/s/m.

Para calcular el gasto de infiltración se emplea la fórmula de Green y Ampt (Chu, 1978)

$$\frac{dZ}{dt} = K \left(1 + \frac{SM}{Z} \right) \quad (3.5)$$

Donde:

dZ/dt, es la velocidad de infiltración, en cm/min.

K, la conductividad hidráulica, en cm/min.

S, la diferencia en tensión capilar antes y después del humedecimiento del suelo, en m.

M, es la diferencia de humedad del suelo antes y después de humedecerse, en %.

Z, es la lámina acumulada de infiltración, en cm.

Se acostumbra identificar al producto SM como el parámetro λ, en m. Así, la ecuación de Green y Ampt tiene dos parámetros: K y λ = SM.

Para resolver las ecuaciones de Saint-Venant se emplea un esquema centrado en diferencias finitas (Vázquez, 1996) como el de la figura 3.1.

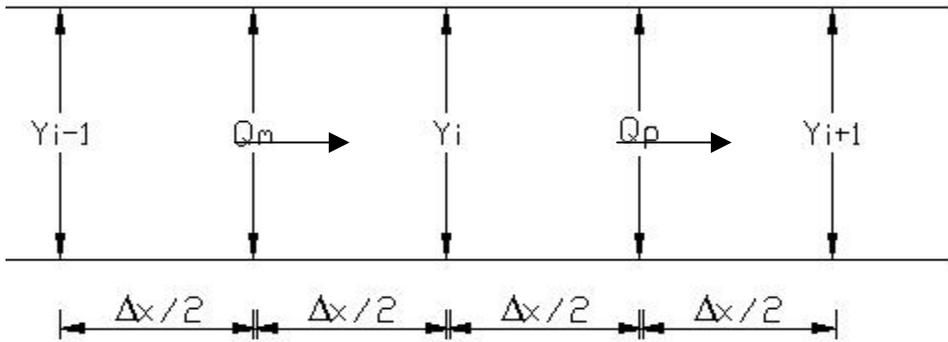


Figura 3.1 Esquema de diferencias finitas

Si la ecuación dinámica se expresa en diferencias finitas, conduce a las dos ecuaciones siguientes:

$$\left[1 - (F_m^j)^2 \right] \frac{\bar{y}_i^{j+1} - \bar{y}_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_m^{j+1}}{g(A_m^j)^2} \frac{Q_i^j - Q_{i-1}^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_m^j} \frac{Q_m^{j+1} - Q_m^j}{\Delta t} + \frac{n^2 |Q_m^j| Q_m^{j+1}}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^{4/3}} = S_0$$

$$\left[1 - (F_p^j)^2\right] \frac{\bar{y}_{i+1}^{j+1} - \bar{y}_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_p^{j+1}}{g(A_p^j)^2} \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x} + \frac{1}{gA_p^j} \frac{Q_p^{j+1} - Q_p^j}{\Delta t} + \frac{n^2 |Q_p^j| Q_p^{j+1}}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^{4/3}} = S_0 \quad (3.6)$$

$$\quad (3.7)$$

Donde se ha empleado como fórmula de fricción la de Manning, con el coeficiente n en s/m^{1/3}; A_m y A_p son las áreas transversales en las secciones m y p, en m²; R_m y R_p los radios hidráulicos, en m; $\bar{y}_i^{j+1} = \theta y_i^{j+1} + (1 - \theta)y_i^j$, θ es un factor de peso que promedia la magnitud local del tirante en el tiempo; los superíndices j identifican el instante de tiempo y los subíndices i la posición.

La discretización en diferencias finitas de la ecuación de continuidad en el tramo central i queda

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta x} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + q = 0 \quad (3.8)$$

Donde:

B_i, es el ancho de la superficie libre en la sección i, en m.

Si se supone que el gasto de infiltración es a través del perímetro mojado por unidad de longitud y se emplea la fórmula de Green y Ampt (3.5), se tiene:

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta x} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + P_i^j K \left\langle 1 + \frac{\lambda}{Z_i^j} \right\rangle = 0 \quad (3.9)$$

Al despejar los gastos Q_p^{j+1} y Q_m^{j+1} se obtiene:

$$Q_m^{j+1} = \frac{1}{C_m^j} \left[S_0 \Delta x + \frac{\Delta x Q_m^j}{g A_m^j \Delta t} + \left(1 - (F_m^j)^2\right) (\bar{y}_{i+1}^{j+1} - \bar{y}_i^{j+1}) \right] \quad (3.10)$$

y

$$Q_p^{j+1} = \frac{1}{C_p^j} \left[S_0 \Delta x + \frac{\Delta x Q_p^j}{g A_p^j \Delta t} + \left(1 - (F_p^j)^2\right) (\bar{y}_{i+1}^{j+1} - \bar{y}_i^{j+1}) \right] \quad (3.11)$$

donde

$$C_m^j = \frac{\Delta x}{gA_m^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_m^j|}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^{4/3}} + \frac{2}{g(A_m^j)^2} (Q_i^j - Q_{i-1}^j) \quad (3.12)$$

y

$$C_p^j = \frac{\Delta x}{gA_p^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_p^j|}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^{4/3}} + \frac{2}{g(A_p^j)^2} (Q_i^j - Q_{i-1}^j) \quad (3.13)$$

Así como se emplea un factor de peso (θ), para promediar los tirantes en el tiempo, se puede usar otro factor de peso para promediar los gastos en le espacio, por tanto, se puede escribir:

$$Q_m^{j+1} = \phi Q_i^{j+1} + (1 - \phi) Q_{i-1}^{j+1} \quad (3.14)$$

y

$$Q_p^{j+1} = \phi Q_{i+1}^{j+1} + (1 - \phi) Q_i^{j+1} \quad (3.15)$$

Los factores de peso θ y ϕ se calibraron de manera que fuera satisfecha la ecuación de continuidad, obteniéndose valores de $\theta = 0.7$ y $\phi = 0.75$ para aproximaciones menores al 3% en la ecuación de continuidad.

La sustitución de las ecuaciones 3.10 y 3.11, en la 3.9 conduce a la ecuación fundamental para cada tramo i.

$$-\frac{\langle 1 - (F_m^j)^2 \rangle}{C_m^j} \bar{y}_{i-1}^{j+1} + \left[\frac{\langle 1 - (F_m^j)^2 \rangle}{C_m^j} + \frac{\langle 1 - (F_p^j)^2 \rangle}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{Y_i^j} \left\langle 1 + \frac{\lambda}{Z_i^j} \right\rangle \right] \bar{y}_i^{j+1} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta T} y_i^{j+1}$$

$$-\frac{\langle 1 - (F_p^j)^2 \rangle}{C_p^j} \bar{y}_i^{j+1} = \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} - \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \quad (3.16)$$

Donde se ha efectuado el artificio de multiplicar el perímetro mojado P_i^j por \bar{y}_i^{j+1} / y_i^j , con el fin expresar \bar{y}_i^{j+1} como factor en el segundo término.

La condición de frontera aguas arriba, donde existe un gasto de alimentación Q_0 por la cabecera del surco, permite sustituir $Q_m^{j+1} = Q_0$ en la ecuación 3.9, obteniéndose:

$$\left[\frac{\langle 1 - (F_p^j) \rangle}{C_p^j} + \frac{P_i^j \Delta x K}{Y_i^j} \left\langle 1 + \frac{\lambda}{Z} \right\rangle \right] \bar{y}_i^{j+1} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta T} y_i^{j+1} - \frac{\langle 1 - (F) \rangle}{C_p^j} \bar{y}_{i+1}^{j+1} = Q_0$$

$$- \frac{S_0 \Delta x}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \quad (3.17)$$

Con el fin de facilitar el cálculo en la etapa de avance del frente de la onda de superficie y evitar problemas de inestabilidad en el último tramo, conviene adoptar las hipótesis de Sánchez y Fuentes (1992.).

- a) Se considera un gasto base pequeño que permite calcular las condiciones iniciales de los tirantes y gastos (de preferencia se usa $Q_b = 0.05$ l/s).
- b) Se supone un tramo ficticio aguas abajo, antes de la descarga con el tirante crítico, donde no se calcula el gasto de infiltración.

En un surco cerrado no hay pérdida real por coleos; sin embargo, por la hipótesis b se supone que el gasto en el tramo final ficticio es el gasto base, por lo que si $Q_p^{j+1} = Q_b$ y se sustituye en la ecuación 3.9, se obtiene la ecuación para la condición de frontera aguas abajo

$$- \frac{(1 - (F_m^j)^2)}{C_m^j} \bar{y}_{i+1}^{j+1} + (1 - (F_m^j)^2) \bar{y}_i^{j+1} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^{j+1} = -Q_b + \frac{S_0 \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta x} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \quad (3.18)$$

Al utilizar las ecuaciones 3.16 en los tramos intermedios del surco, junto con las ecuaciones 3.17 y 3.18, se establece un sistema de ecuaciones tridiagonal con incógnitas $y_1^{j+i}, y_2^{j+1}, \dots, y_{n-1}^{j+1}$ que se resuelve muy rápido por eliminación gaussiana. Posteriormente se usan las ecuaciones 3.10 y 3.11 para determinar, en el mismo intervalo de tiempo, los gastos Q_m^{j+1} y Q_p^{j+1} . El cálculo se continúa hasta que logre infiltrarse la dosis requerida por la planta en algún tramo del surco cerrado, generalmente entre $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la longitud del mismo.

Si se atiende a las fases del proceso del riego por surcos descritas con anterioridad y mostrada en la figura 3.2, durante la fase de avance del agua (Ta) el gasto de infiltración

se calcula solo en aquellos tramos donde el gasto Q_m^{j+1} sea mayor que Q_p^{j+1} . Durante las fases de llenado ($T_r - T_a$) y receso (T_c), el gasto de infiltración se calcula en todos los tramos excepto en el último, según la hipótesis b.

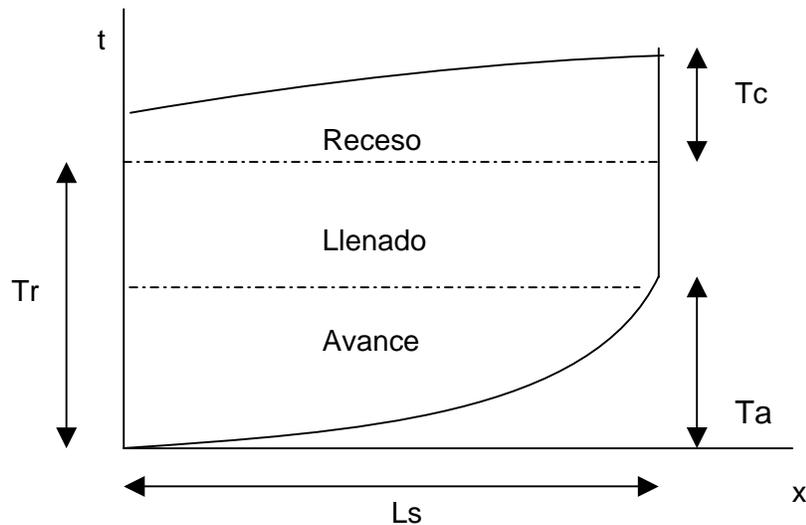


Figura 3.2. Fases del proceso de riego

Una relación conveniente para la convergencia y estabilidad en la solución, obtenida en forma empírica con simulaciones numéricas, es $\Delta t = 1.2 \Delta x$, donde Δx está en m y Δt en s.

Los tirantes iniciales para el cálculo son los correspondientes para un flujo uniforme a lo largo del surco con el gasto base, es decir, el tirante normal es idéntico para todas las secciones, enseguida existe una etapa de calibración donde se calcula un flujo permanente con las ecuaciones de flujo transitorio durante doce intervalos de tiempo con el mismo gasto base. Después se inicia propiamente el cálculo del flujo transitorio donde se incluyen todas las fases del proceso de riego.

Con base en este modelo matemático se realizó la reproducción de los riegos en campo, dichos ensayos se muestran en el capítulo 5 y se analizan en el capítulo 6.

Capitulo 4. Métodos de riego eficientes en surcos cerrados.

4.1 Riego intermitente.

Desde fines del año 1970 en zonas semiáridas de los Estado Unidos (estados de Utah, Texas, California, etc.), se han realizado pruebas que han puesto de manifiesto, tanto en parcelas experimentales como en áreas de producción, las ventajas del riego intermitente frente a los métodos convencionales de descarga continua en sistemas de riego por gravedad.

Stringhan y Keller, en 1979, introducen el concepto de Riego Intermitente o Surge Flow en la Irrigation and Drainage Speciality Conference de la American Society of Civil Engineers. En 1986 la oficina de patentes de Estados Unidos registra esta modalidad de riego como un método y sistema de riego por surcos.

Las investigaciones sobre el novedoso método de riego se ha abordado de forma experimental, así como también desde el punto de vista teórico. Respecto a la investigación de campo, los principales avances y aportaciones han sido obtenidos en las universidades de E.U., ubicadas en las zonas semiáridas mencionadas con anterioridad.

En lo referente a la investigación teórica, los esfuerzos se han encaminado hacia la comprensión física, representación matemática y simulación numérica del fenómeno: algunas de las principales aportaciones han sido obtenidas por Atchinson, Bassett, Clemmens, Bishop, Blair, Edwin, Elliott y Walker, Katopodes y Strelkoff, Keller, Schmitz, Sherman, Singh, Stringham y Wallender, (citados en García V. N., 1994) entre otros. La mayoría de las aportaciones respecto a las simulaciones numéricas están relacionadas con la primera fase del riego, o sea, con el proceso de avance del frente de onda durante

el primer impulso, y es poco lo que existe para la simulación de la etapa de recesión y menos aún en lo que se refiere a impulsos posteriores.

4.1.1 Descripción del riego intermitente.

El riego por impulsos o riego intermitente es un método que emplea, en promedio, el mismo gasto, Q , del riego continuo para un surco, pero con la ventaja que mientras no se aporte caudal en la cabecera el agua avanza y llega más rápido al final del mismo; así, se reduce la etapa de avance del agua y el tiempo de riego. Está basado en un sistema de descargas intermitentes, las cuales son controladas por un dispositivo que administra y suministra el agua a la parcela. Normalmente dicho dispositivo de control es una válvula automatizada que se adapta al hidrante de un sistema de tubería con compuertas. Su fuente de alimentación es un sistema de bombeo de baja presión.

Para aplicar el riego intermitente es necesario que la parcela se divida en dos baterías con igual número de surcos y que el gasto constante de alimentación se oriente a una y otra batería de manera alternada, ya que el sistema está diseñado para suministrar descargas de agua en forma cíclica o intermitente a un lado y a otro de una válvula, atendiendo dos grupos de surcos a la vez (figura 4.1), el agua escurre en cada uno de ellos alternativamente, durante intervalos de tiempo previamente fijados. Estos dependen del avance y recesión del frente de la onda. El agua es aplicada al surco en una serie de ciclos. Cada ciclo consiste en un tiempo de abierto (tiempo en el cual el flujo del agua está dentro del surco, para un ciclo particular), y un tiempo de cerrado (tiempo entre el cese del flujo y el principio del siguiente ciclo).

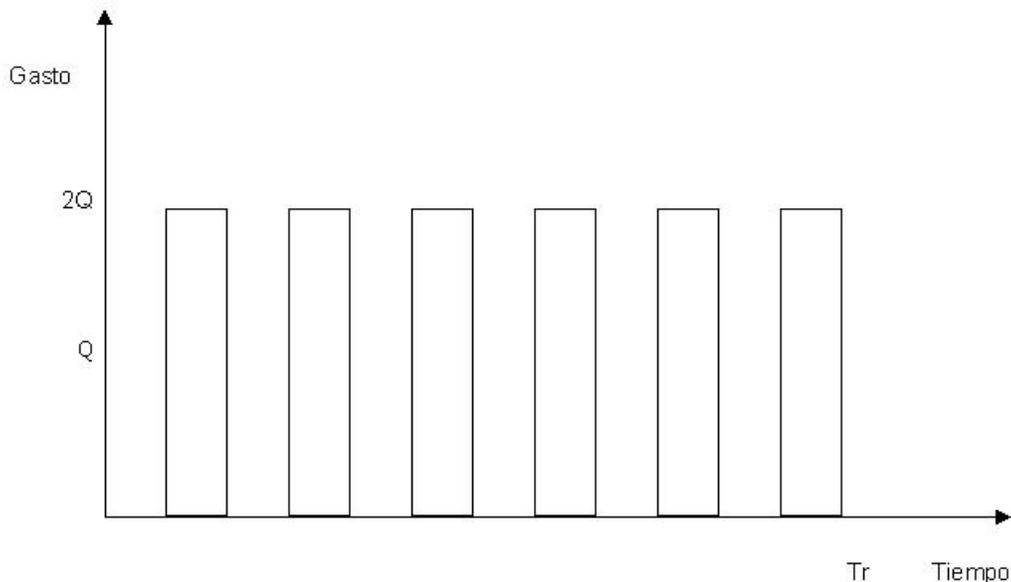


Figura 4.1 Hidrograma para el riego intermitente en un surco de la segunda batería.

En el riego intermitente, el flujo alcanzará el final de los surcos después de varios ciclos de ambos lados de la válvula. Cuando el frente de onda llega al final, no se da por concluido el riego, ya que las descargas intermitentes deben continuarse hasta que en toda la longitud de los surcos se haya infiltrado la dotación del riego.

La superficie que puede ser atendida por una sola válvula depende de:

El volumen disponible en un mismo hidrante o fuente de almacenamiento.

La frecuencia de los riegos que necesite el cultivo, en función de la textura del suelo, de su estado de humedad y de las necesidades hídricas de la planta.

El número de cambios posibles que admita la válvula en función del calendario de riego.

La válvula tiene la posibilidad de adecuarse a terrenos de diferente topografía, basta con variar el número de compuertas operativas en la tubería y dispuestas a ambos lados.

La experiencia práctica (USDA, 1986) indica que en surcos excavados en suelos cuyas longitudes son menores a los 400 m es adecuado utilizar tiempos de cierre y de apertura fijos, o sea, ciclos constantes durante el riego. En surcos con longitudes superiores a los 400 m se justifica establecer una política de variación de la duración de los tiempos de apertura y cierre, por la necesidad operativa de suministrar el agua de manera que el frente de onda alcance su extremo final en el mínimo tiempo posible. Mientras no se haya alcanzado éste, los tiempos de los nuevos ciclos se incrementan. Posteriormente, una vez que se ha llegado al final, deberán reducirse en su duración, en tal tipo de políticas se logran controlar de manera más efectiva tanto las pérdidas por escurrimientos fuera de los surcos, así como aquellos por percolación profunda a lo largo de los mismos.

4.1.2 Fases del riego intermitente.

Poco tiempo después de suspender el suministro del caudal en un surco, se origina una onda de recesión que lo barre aguas abajo hasta alcanzar el frente de la onda. Una vez que aquélla ha llegado a una cierta región y durante el intervalo de tiempo que tarda en volver a ser mojada por la onda de avance del próximo ciclo, en dicha región se producen una serie de transformaciones físico-químicas.

La estructura del suelo se altera, se disuelven parcialmente los terrones acomodándose las partículas y formando una sedimentación que origina aislamiento de la superficie: Aunque el flujo se ha suspendido y consecuentemente también la infiltración superficial, las partículas de arcilla contenidas en el suelo humedecido continúan con su proceso de expansión; tanto el agua como el suelo en contacto con la atmósfera captan aire por atracción capilar y bloquean a las pequeñas superficies de los poros del suelo. El proceso se repite en cada ciclo durante el tiempo del desagüe y, en consecuencia, durante los siguientes suministros de agua la capacidad de infiltración y la resistencia al cortante o rugosidad de la superficie del suelo se va reduciendo, con lo que circula el flujo más rápidamente y se consigue un avance mayor y una mejor uniformidad en el riego.

La clave para que se verifiquen dichos cambios, producto de la interacción agua-suelo, está en seleccionar una adecuada política de operación de las descargas intermitentes que la válvula controla, especialmente en lo que se refiere a la fijación del tiempo de cada ciclo.

La duración de los ciclos depende de:

La rapidez y homogeneidad del avance del agua por los surcos.

La uniformidad de infiltración del agua en el suelo.

El control de la escorrentía en el último tramo de los surcos.

La reducción de la infiltración y la velocidad con que se produce.

Cuando el caudal aportado a un surco cuya longitud es superior a las recomendadas para riego continuo, no se interrumpe hasta que llega al final del mismo, es decir, cuando la descarga es continua, llega un momento en que el avance del frente de onda, aunque constante, se produce en forma lenta. Si el riego se da en tales condiciones, es de esperar que en los primeros tramos del surco se produzcan grandes pérdidas por percolación profunda, o sea que un alto porcentaje del agua suministrada se infiltrará hacia zonas no aprovechables por el sistema radicular de la planta. Por otra parte, según se suministra agua al suelo, la profundidad del perfil de humedad aumenta de manera significativa. Hasta que por la parte final de los surcos se producen escurrimientos del agua de riego que han de seguir un tiempo determinado hasta que se den las mínimas condiciones de perfil húmedo en toda la longitud. Las pérdidas por escorrentía al final del surco y por percolación en los tramos iniciales y medios son las que se busca minimizar con el riego intermitente.

En el riego intermitente con surcos abiertos, cuando las descargas son con ciclos de tiempo fijo, éste debe ser lo suficientemente largo para que el avance del frente de onda, sobre el suelo del surco ya húmedo en toda su longitud, llegue hasta el extremo final del mismo con la descarga de un solo ciclo. Cuanto más largo sea el surco, mayor ha de ser el tiempo único de ciclos que se fije en el dispositivo automático de alimentación. En un primer ciclo, el flujo de agua humedecerá una distancia menor que en los posteriores. En los siguientes, de igual tiempo de duración, el avance en las zonas no humedecidas, durante el ciclo anterior será más lento, y los nuevos tramos regados, en consecuencia, serán más cortos, así sucesivamente en cada ciclo posterior. Por lo anterior, la velocidad de infiltración local sobre una determinada sección del surco, será más grande durante los primeros ciclos en que es humedecida que en los últimos, pues en estos la infiltración se efectúa sobre una sección ya mojada. La consecuencia de todo ello es que el perfil de humedad será menos pronunciado que el conseguido con riego continuo (figura 4.2). No obstante, cuando el final del surco es regado hasta alcanzar capacidad de campo a la profundidad radicular, es de esperarse que existan ciertas pérdidas por percolación profunda, ya que en las zonas cercanas a la cabecera del surco, que fueron humedecidas por los primeros ciclos, se presentara inevitablemente un exceso de agua infiltrada fuera de la zona radicular. Para evitar que al final del surco la escorrentía sea excesiva, puede ajustarse el tiempo de ciclo acortándolo una vez que el frente de onda ha llegado al final.

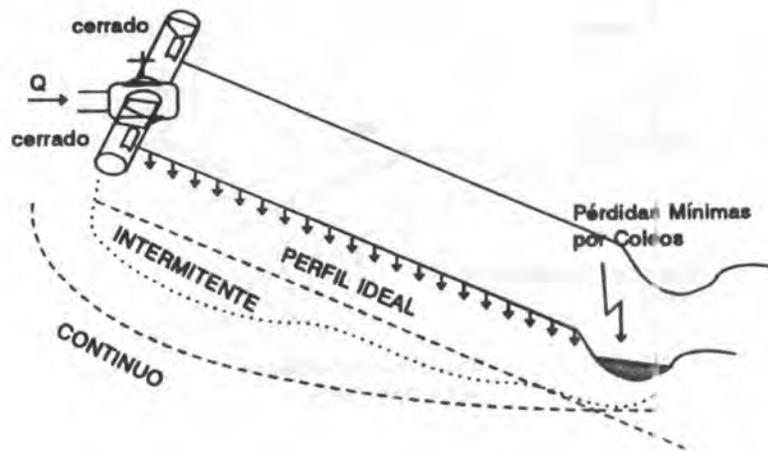


Figura 4.2 Perfil al final del riego de un surco abierto

Para aumentar aún más la eficiencia del riego intermitente y evitar pérdidas excesivas por percolación profunda y por escorrentía o coleos, como consecuencia de los ciclos de tiempo constante, se pueden usar ciclos cuyos tiempos sean variables en función de las condiciones y características del suelo y de la parcela (textura del suelo, longitud de los surcos, pendiente del terreno, tipo de cultivo, condición inicial y final de la humedad del suelo, etc.). Lo conveniente, en general, es emplear ciclos de corta duración en los primeros tramos de los surcos y ampliar los tiempos cada ciclo hasta llegar al final. Una vez obtenido este primer perfil de humedad, se reducirán los tiempos para evitar en lo posible las pérdidas por escorrentía. Operando así, la duración variable de los ciclos traerá como consecuencia:

Avanzar distancias sensiblemente iguales en cada ciclo.

Distribuir el agua de manera más uniforme.

Disminuir las pérdidas por coleos.

En la práctica, se recomienda hacer los ciclos de tiempo iguales a el tiempo en que tarda el agua en llegar a un cuarto de la longitud del surco, está demostrado que al realizar esto, las eficiencias en la parcela son buenas.

4.1.3 Dispositivos de control del riego intermitente.

En una instalación típica, el agua se suministra a una válvula que incluye un controlador automatizado de ciclos de descarga de caudal intermitentes. Las válvulas se encuentran

ubicadas entre dos unidades de riego. La distribución del agua a cada una de las unidades se realiza mediante tuberías con compuertas.

Los tipos de válvulas más comúnmente empleados en la actualidad son:

- Válvulas de membrana operadas hidráulicamente (figura 4.3).
- Válvulas mecánicas tipo mariposa (figura 4.4)..

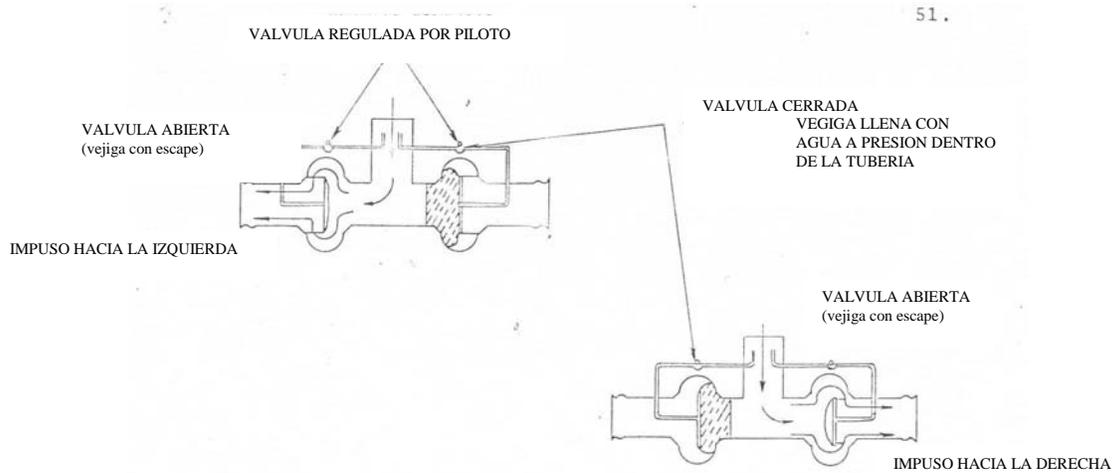


Figura 4.3 Válvulas de membrana operadas hidráulicamente

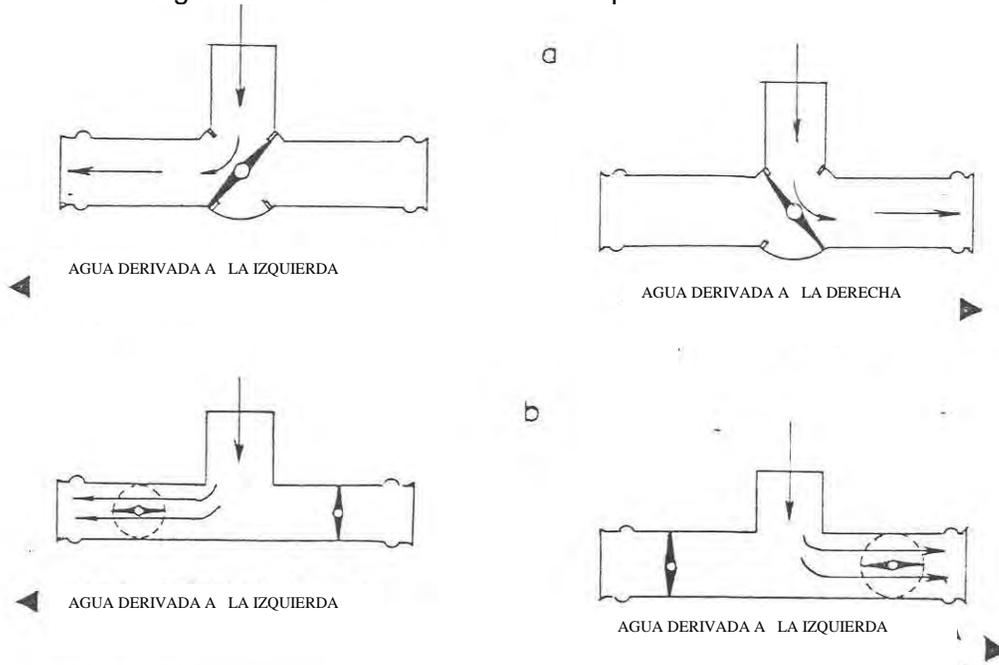


Figura 4.4 Válvulas mecánicas tipo mariposa

Las válvulas de membrana funcionan con la presión del agua de la tubería suministradora que viene del sistema de bombeo. El controlador alterna esa presión entre las dos membranas. Cuando una de ellas está sometida a la presión se expande y corta el paso

del agua hacia ese lado; la otra, no sometida a presión, se desinfla y abre el paso del agua hacia su lado.

Las válvulas mecánicas tipo mariposa se abren y cierran alternadamente permitiendo el paso del agua hacia un lado o al otro. Estas válvulas pueden ser de disco simple o de disco doble.

Normalmente Las Válvulas son operadas por un pequeño controlador automatizado programable, que utiliza energía eléctrica que proviene de baterías convencionales o baterías con paneles solares.

Así mismo, existe una clasificación en cuanto al sistema de distribución y aplicación del riego intermitente, los cuales pueden ser sistemas de tuberías con compuertas de arreglo ranurado y sistemas de tubería sencilla.

4.1.3.1 Sistema de tuberías con compuertas.

Estos sistemas usan un diseño convencional de compuertas en un arreglo ranurado, para distribuir el agua en surcos individuales. La tubería de compuertas para un arreglo de intermitencia, está dividido en dos bloques de surcos de ancho igual, con una válvula automática para la intermitencia entre los dos bloques en el centro de la línea de la tubería. La válvula tiene una configuración "T"; y el flujo de agua es desviado alternadamente de una sección de la tubería a otra.

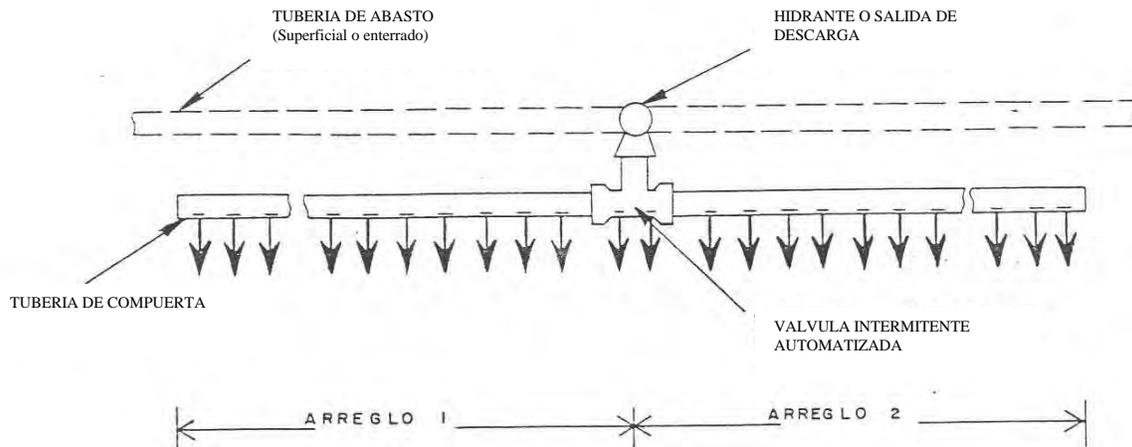


Figura 4.5 Diagrama del sistema de tubería con compuertas

Como alternativas para la aplicación de este tipo de riego, en el Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA, 1994) se desarrolló un dispositivo de control de riego intermitente, denominado Diabeto, el cual no requiere energía externa durante su operación. En dicho dispositivo las descargas de caudal intermitente se producen por la

automatización fluidica del cebado y descebado de una serie de sifones durante cada ciclo de riego.

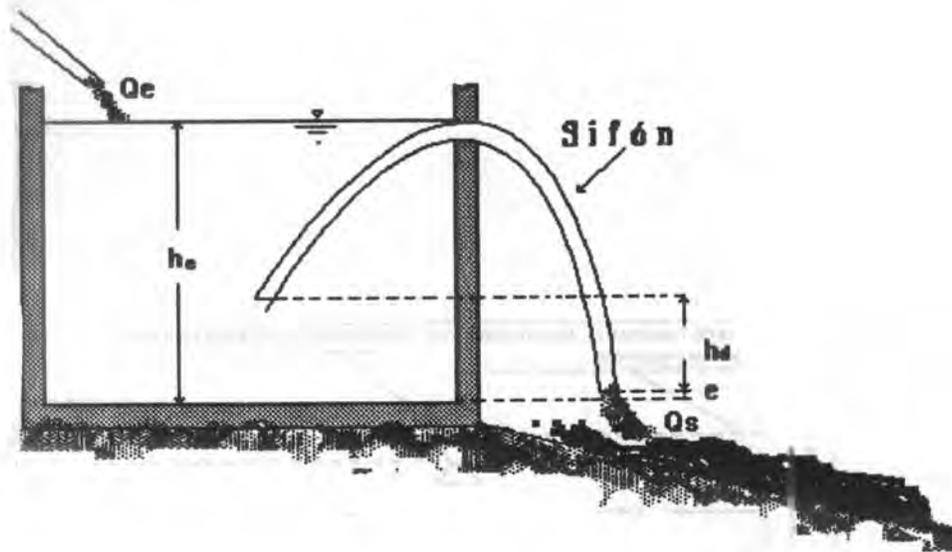


Figura 4.7 Diabeto

El Diabeto trabaja únicamente con ciclos de tiempo constante. Atiende una sola unidad de riego, el hidrograma de caudal que produce está regulado por la ley de descarga de los sifones, y su diseño y dimensión dependen de las características de la unidad que se va a regar con el mismo.

Recientemente, también en el IMTA, se diseñó otro dispositivo denominado Tanque de Descargas de Fondo en el cual los ciclos se dan a través de un sistema de descargas de fondo controlado por un sistema de cierre y apertura automatizado fluidicamente a través de la aplicación de principios de flotación hidrostática.

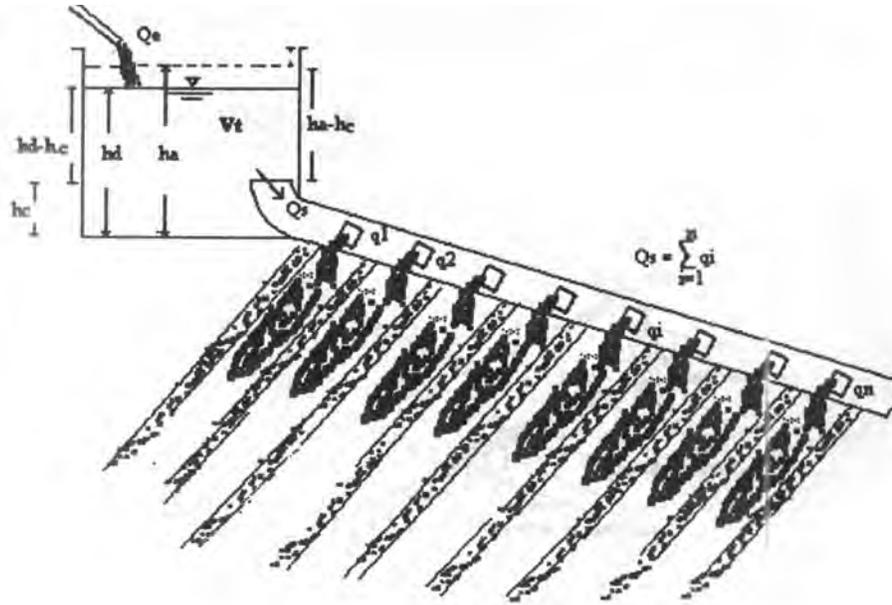


Figura 4.8 Dispositivo de descarga de fondo

Tanto el Diabeto como el Tanque de Descargas de Fondo son aplicables, por limitaciones en cuanto a desplazamiento de una parcela a otra, en aquellas cuya longitud de riego es inferior a los 250 m.

4.1.4 Parámetros de evaluación del riego intermitente.

Merriam et al (1983), definen las normas requeridas para realizar la evaluación de cualquier sistema de riego ya descritas en el capítulo 2, estas son:

la eficiencia de aplicación (ecuaciones 2.6 a 2.9).

uniformidad de distribución (ecuación 2.11).

4.2 Riego con incremento de gasto.

4.2.1 Descripción del riego con incremento de gasto.

De manera semejante al riego intermitente, el riego con incremento de gasto requiere de una serie de pasos, los cuales se describen a continuación.

En primer lugar a la parcela se le divide por mitad en sentido transversal, a cada mitad se le conoce como batería, en sentido longitudinal a la parcela se le divide en cuartos (figura 4.9a), al comienzo del riego se inicia introduciendo agua a todos los surcos como si se tratara de un riego continuo. Una vez que el agua llega a un cuarto de la longitud del surco se cierran las compuertas de una batería de surcos (figura 4.9b), ocasionando que el gasto en la otra mitad de la parcela se incremente al doble, por lo que en éste momento solo se tendrá regando una parte de la parcela (figura 4.9c). En la mitad donde el gasto fue duplicado se continua regando hasta que el agua llegue al extremo inferior de la parcela y se infiltre la lámina de agua que requiere el cultivo, hay que observar que aunque en la otra batería ya no ingresa agua la zona mojada avanza unos metros más (figura 4.9d). Una vez que el agua llegue al extremo de la batería que se encuentre regando, se procede a cerrar ahora las compuertas de ésta y se abren las compuertas de la otra mitad de la parcela (figura 4.9e), se continua con el riego hasta que la otra mitad quede humedecida por completo y al igual que en la primera mitad, se alcance la dosis que requiere el cultivo (figura 4.9f).

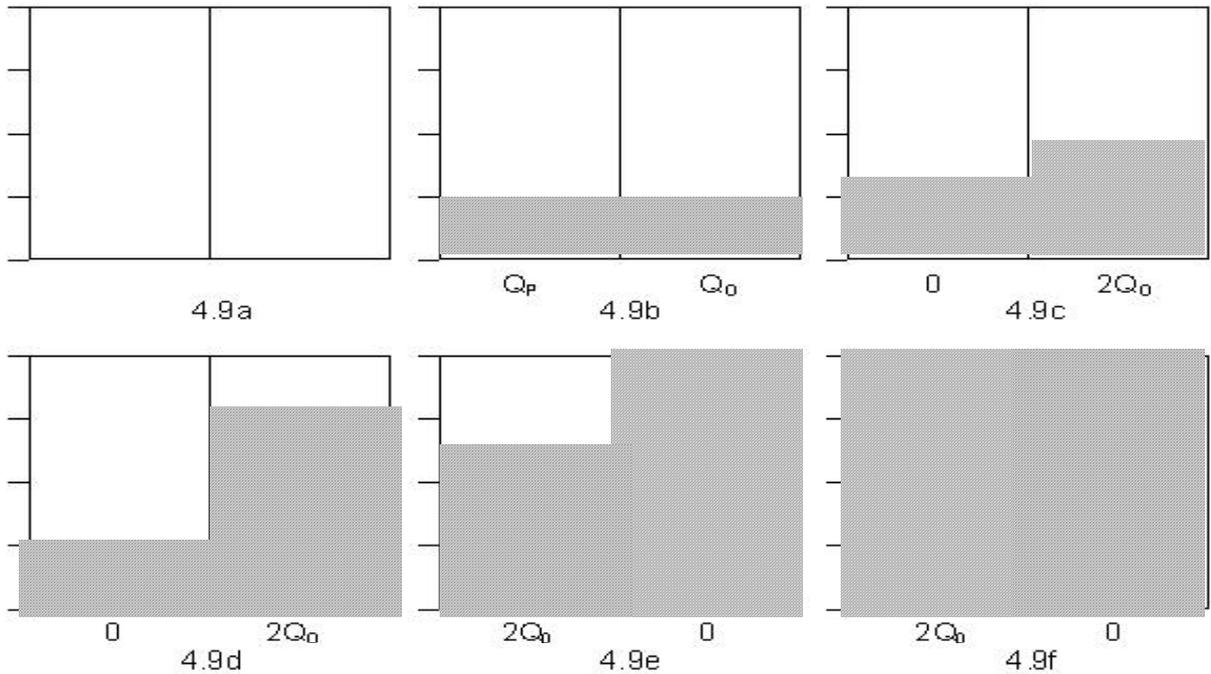


Figura 4.9 Método de riego con incremento de gasto

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran los hidrogramas de ingresos a las dos unidades de la parcela. En éstas, Q_0 es el gasto inicial; T_a la duración de la etapa de avance del agua, T_m es el tiempo de inicio del riego complementario en la segunda mitad de la batería de surcos y tiempo de riego de la primera mitad; T_r es el tiempo de riego total de la parcela.

Al riego de la primera mitad de la parcela se denomina riego con incremento de gasto normal, y el de la segunda riego con incremento de gasto discontinuo. En este tipo de riego cabe señalar que no se requiere el empleo de válvulas o dispositivos especiales de control del agua, el sistema opera basado en tuberías con compuertas que se abren y cierran dependiendo de la batería que se esta regando, por lo cual es un método económico.

Es discutible que en este método se incremente el gasto en vez de reducirlo, dado que la velocidad de infiltración disminuye una vez humedecido parte del surco; sin embargo, la razón de que se incremente la eficiencia aún más que con el riego continuo para gastos pequeños, es que al llenarse el surco con la duplicación del gasto, aumenta el perímetro mojado y con ello la velocidad de infiltración en la parte alta del surco. Además, en surcos cerrados no hay pérdidas por coleos y no es importante que el tiempo de receso sea grande. El aspecto que debe cuidarse es que en la primera mitad de la parcela no desborden los surcos.

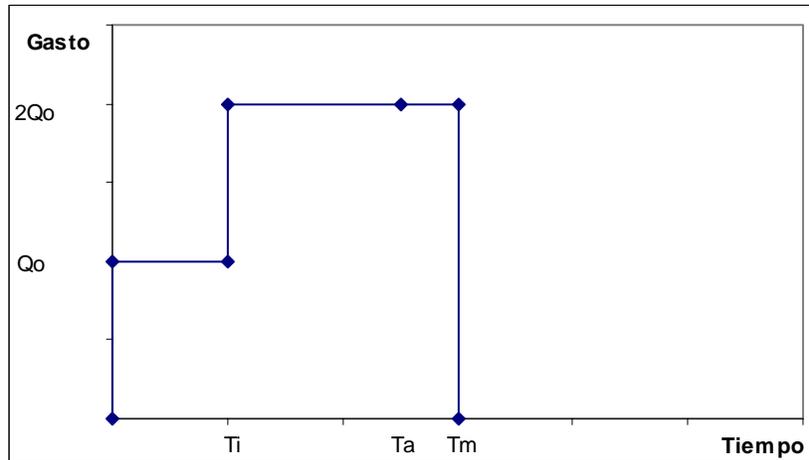


Figura 4.10 Hidrograma de ingreso en la primera mitad de la parcela.

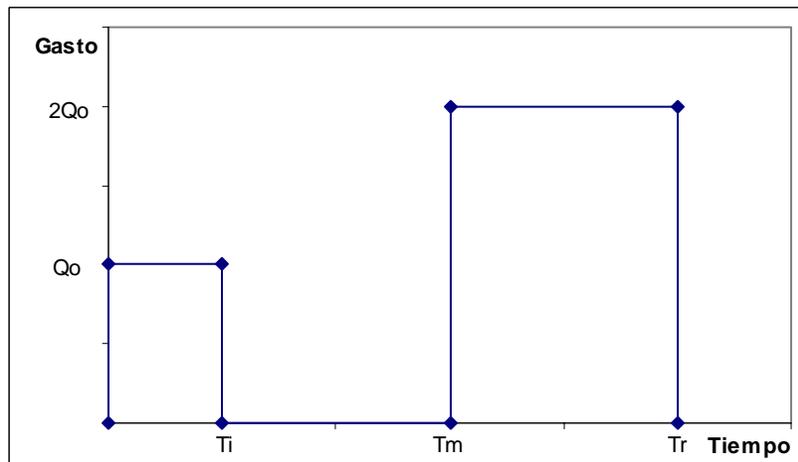


Figura 4.11 Hidrograma de ingreso en la segunda mitad de la parcela

4.2.2 Fases del riego con incremento de gasto.

En este tipo de riego al aumentar la Uniformidad de Distribución los tiempos de riego en las parcelas son menores que con el riego continuo, el aumento de este indicador se explica porque durante el proceso de infiltración, en la fase de avance, las láminas son mayores en la cabecera; después, en la fase de almacenamiento, por ser mayor el gasto de alimentación, los tirantes y los perímetros mojados en la cola del surco aumentan, así como el gasto de infiltración vertical; finalmente, en la fase de receso, el gasto de infiltración vertical es mayor en la cola del surco compensando la distribución de las láminas. En múltiples simulaciones numéricas se ha comprobado que el tirante máximo al final del surco sea menor que la profundidad del mismo, lo cual hace suponer que en el campo no existirá desbordamiento.

Como ya se mencionó este tipo de riego no requiere de dispositivos especiales, como es el caso del riego intermitente, los sistemas de abastecimiento de agua pueden estar formados a base de tuberías con compuertas (aunque también puede disponerse de canales excavados en el lugar para la alimentación del agua al surco) lo que hace muy sencilla su manera de operar. Así mismo, se recomienda el empleo de “calcetines” que no son más que bolsas o costales abiertos en su extremo inferior que envuelven a la tubería sobre la compuerta con el fin de que el chorro de agua no erosione al surco y con lo cual el agua puede conducirse de forma tranquila durante toda su longitud (figura 4.12).



Figura 4.12 Empleo de “calcetines”

La fuente de alimentación a las parcelas puede hacerse mediante tuberías que cuenten con hidrante para el acoplamiento de la tubería con compuertas o en su defecto a base de canales excavados en el terreno pero con las irremediables pérdidas por conducción debido a las infiltraciones.

4.2.3 Parámetros de evaluación del riego con incremento de gasto.

Para este tipo de riego es necesario evaluar tres características para poder compararlo con otro método de riego, dichas características son:

- La eficiencia de aplicación, (ecuación 2.6 a 2.9).
- La uniformidad de distribución (ecuación 2.11).
- El ahorro de agua (ecuación 2.15).

Capitulo 5. Criterio de diseño del Riego con Incremento de Gasto.

La búsqueda de métodos eficientes de riego por surcos que sustituyan al método tradicional o continuo ha dado lugar a la creación de los métodos de recorte o cutback y el intermitente (descrito en el capítulo anterior); sin lugar a dudas este último es el más eficiente pero requiere el empleo de válvulas y controladores electrónicos costosos que muchos agricultores no pueden comprar, sobre todo en países en desarrollo.

El riego con incremento de gasto es una opción que, en teoría, ha mostrado ser también un método alternativo a los dos mencionados y que, en comparación con el riego con recorte, no utiliza válvulas electrónicas. En trabajos previos, las eficiencias de aplicación teóricas del riego con incremento de gasto fueron comparadas con el riego continuo, donde las eficiencias son mayores entre el 3 y 6 % a este último; con el riego de recorte o cutback, donde las eficiencias son aproximadamente iguales, siendo que el método de recorte ha sido probado en campo desde hace muchos años como uno de los más eficientes del riego por surcos (Martínez-Elizondo, 1980); (Walker y Skogerboe, 1987). Asimismo, se ha establecido que los gastos iniciales por emplear deben ser menores a los gastos óptimos del riego continuo para que haya un incremento de la eficiencia del orden del 7 % en promedio y que, en comparación con el riego intermitente, las eficiencias son muy próximas y aún superiores si la pendiente es menor a 0.25 %.

5.1 Determinación del tiempo de incremento de gasto con respecto a la longitud.

Como ya se ha mencionado el riego con incremento de gasto pretende ser un método alternativo al de riego continuo e intermitente, el cual permita una distribución uniforme de humedad del suelo gracias a un manejo adecuado del agua y que puede traducirse en ahorros importantes de agua para otros usos para aumentar la extensión de tierras de cultivo.

Este método permite reducir la duración de avance del agua, en comparación con un riego continuo con gastos iniciales iguales.

El método se origina de un modelo matemático que ya se presentó en el capítulo 3 y que con la ayuda de una computadora se pueden realizar múltiples simulaciones numéricas.

Y para utilizar este modelo se establece la siguiente metodología de diseño:

- 1) Se definen los parámetros de la geometría del surco con base en las siguientes ecuaciones.

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \quad (5.1)$$

$$R = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (5.2)$$

Donde:

A, es el área del surco en m².

y, el tirante del flujo en m.

R, el radio hidráulico, en m.

σ_1 , σ_2 , ρ_1 , ρ_2 , parámetros que se determinan con un ajuste de regresión lineal simple.

- 2) Se realiza una prueba de avance de agua para calibrar los parámetros K, λ de la fórmula de Green y Ampt y n de la fórmula de rugosidad de Manning. K se introduce al programa en cm/min y λ en cm.
- 3) Conocer el porcentaje de humedad del suelo (en volumen) antes del riego, para determinar la diferencia de humedades DH con respecto al porcentaje a capacidad de campo, la cual previamente debe calcularse.
- 4) Determinar la humedad inicial del suelo en lámina de agua como

$$SW = \frac{W_i}{100} hr \quad (5.3)$$

Donde:

SW, es la humedad inicial del suelo, en cm.

W_i, la humedad inicial del suelo en volumen antes del riego, en %.

hr, la profundidad radicular de la planta, en cm.

5) Establecer la dosis que se quiere aplicar al cultivo. Puede calcularse como

$$Z_m = \frac{(W_{cc} - W_i)}{100} hr \quad (5.4)$$

Donde:

Z_m es la dosis o lámina de agua requerida por la planta, en cm.

W_{cc} , es la humedad a capacidad de campo, en %.

H_r , la profundidad radicular, en cm.

6) Conocer la longitud del surco, L , y la pendiente longitudinal del mismo, S_o en %.

7) Introducir los datos anteriores al programa y proponer un tiempo de riego con un gasto de diseño por surcos, correr el programa y verificar que se satisfaga la dosis por infiltrar; si no es el caso, ajustar el tiempo de riego hasta lograrlo y anotar la eficiencia de aplicación (ecuaciones 2.6 a 2.9).

Enseguida se propone otro gasto de diseño, con el cual también debe satisfacerse la dosis al ajustar el tiempo de riego, hasta que se obtenga el gasto óptimo cuando se alcance la máxima eficiencia.

8) Determinar, con base en el gasto de alimentación a la parcela, el número de surcos que se regará, esto es,

$$N_s = \frac{Q_p}{Q_o} \quad (5.5)$$

Donde:

N_s , es el número total de surcos en la parcela.

Q_p , es el gasto de alimentación a la misma en l/s.

Q_o es el gasto óptimo por surco, en l/s.

El programa de computadora corre bajo el lenguaje de programación fortran, en la cual se necesita una ventana auxiliar con los datos de entrada con el nombre ricig.dat y a su vez genera un archivo de salida con el nombre de ricig.res, en la figura 5.1 se muestran las ventanas activas del programa, además el programa crea dos archivos más en Excel, en donde da los valores de los puntos de las gráficas longitud a lo largo del surco vs. Tiempo de avance y longitud a lo largo del surco vs. Lámina de agua infiltrada; así, se obtiene una representación de la manera en que se comporta el modelo teórico, con el fin de realizar una comparación con los resultados obtenidos en campo.

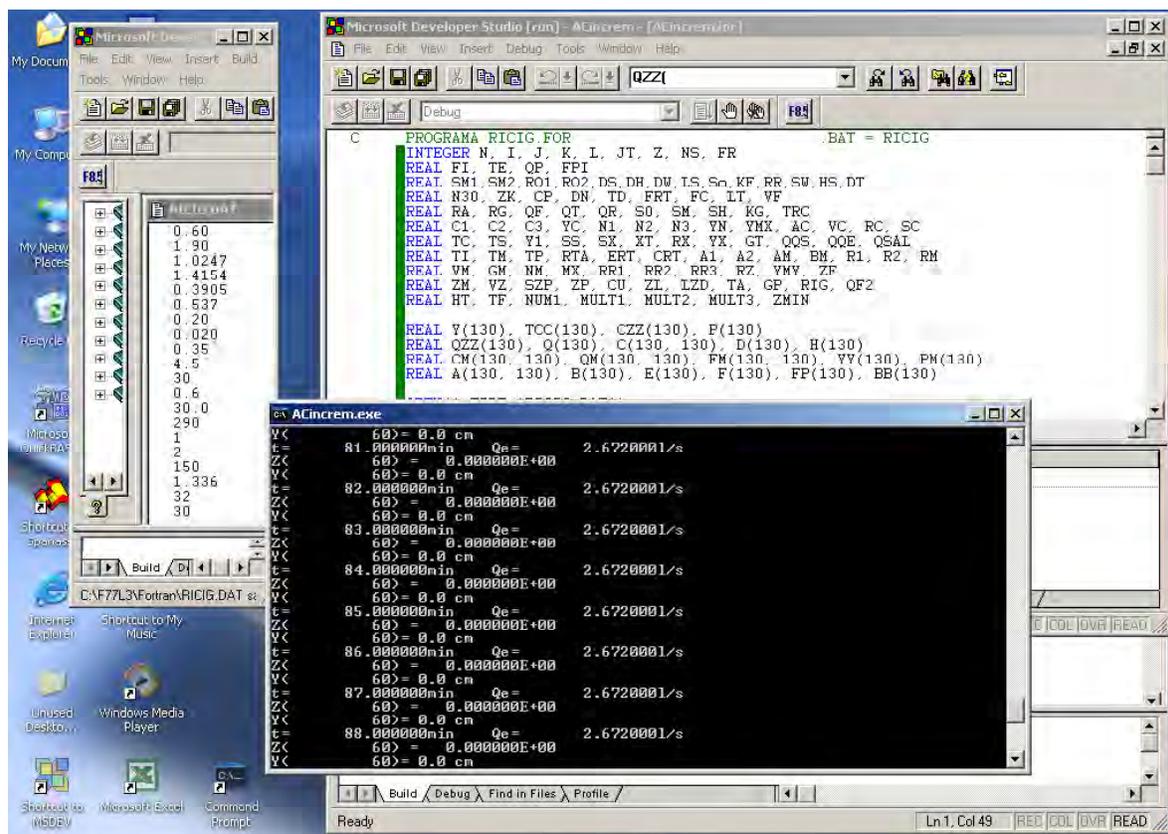


Figura 5.1 Ventanas activas durante el programa

Lo sobresaliente de este método es que se determina la distancia óptima a la cual deberá de hacerse el incremento de gasto con el fin de reducir la duración de la etapa de avance, así el operador puede determinar por medio de ensayo y error la distancia óptima. De los resultados obtenidos en el Instituto de Ingeniería se ha determinado que la distancia óptima para el incremento de gasto deberá de encontrarse entre un cuarto y un tercio de la longitud total del surco.

En la tabla 5.1 se muestra a manera de resumen, los datos de entrada en cada uno de los riegos, así como los resultados obtenidos al utilizar el programa. Cabe señalar que el riego número 2 no se simuló debido a que no se obtuvieron valores con los cuales compararlo.

Tabla 5.1 Datos ingresados al programa numérico.

Riego número	Gasto inicial (RIG) o constante (RC) (l/s)	Duración de la etapa de avance del agua (min)	Tiempo De riego (min)	Volumen ingresado (m ³)	Volumen infiltrado (m ³)	Lámina mínima infiltrada (cm)	Uniformidad es de distribución (%)
RIG-1	2.375	78	94	15.883	15.508	4.850	0.854
RIG-3	0.95	46	70	6.442	6.480	2.180	0.943
RC-3	1.48	61	74	6.571	6.598	1.987	0.858
RIG-4	1.40	43	63	8.358	8.316	2.711	0.815
RC-4	1.54	50	90	8.316	8.308	3.119	0.881
RIG-5	0.895	84	90	8.074	8.071	1.75	0.780
RC-5	1.03	240	240	14.831	14.849	1.467	0.782
RIG-6	1.336	124	150	21.619	21.377	6.554	0.8557
RIG-7	0.584	231	244	15.094	15.068	4.633	0.889
RC-8	1.12	212	216	14.513	14.533	2.48	0.779
RIG-9	0.895	125	140	13.140	13.105	4.940	0.957

En la tabla 5.2 se muestran los valores obtenidos en las simulaciones de láminas de agua infiltradas, como si se tratara de un muestreo físico a lo largo del surco.

Tabla 5.2 Láminas de agua infiltradas

Riego número	Distancia en el surco [m]					Promedio en el surco	Uniformidad de distribución
	50	100	145	190	240		
RIG-1	6.3	7.2		8	8	7.375	0.854
RIG-3	2.9	3.2		3.3	2.9	3.075	0.943
RC-3	3.4	2.3		2.9	2.66	3.097	0.858
RIG-4	3.2	4		4.3	4.2	3.925	0.815
RC-4	4.3	4.1		3.7	3.4	3.902	0.881
RC-5	7.2		4.7		4.2	5.36	0.782
RIG-5	3		4.25		4.3	3.85	0.779
RIG-6	8.7		10.6		11.15	10.166	0.855
RIG-7	6.4	7.5		7.63	7.45	7.255	0.889
RC-8	6.7	6.6		6.0	4.7	6.032	0.779
RIG-9	6.32	6.535		6.74	6.82	6.603	0.957

5.2 Recomendaciones para el empleo del Riego con Incremento de gasto.

Para el riego con incremento de gasto existen diversas premisas en cuanto a la manera de realizarse, la principal tiene que ver con la pregunta ¿Cuándo debe de hacerse el incremento de gasto?, ya que no es fácil aún realizando múltiples simulaciones del proceso de avance de la onda de agua dentro del surco, ya que entre otras cosas no se tienen las condiciones ideales del modelo en campo y por lo cual es en éste en donde se hacen las correcciones que uno considera pertinentes.

Como ya se mencionó, se recomienda como norma que el incremento de gasto se realice a una distancia comprendida entre un cuarto y un tercio de la longitud total del surco, con ello se garantiza que existe una mejor distribución de la humedad del suelo en estas condiciones, en comparación del riego continuo. Cabe señalar que se garantiza la uniformidad distribución, pero no se garantiza que se haya infiltrado la dosis que el cultivo requiere, a menos que se conozca previamente la humedad inicial del suelo y se aplique la ecuación 5.4.

Es recomendable el empleo de “calcetines”, para evitar que los surcos se erosionen en su parte inicial y ocasione que el agua se pase de un surco a otro. Además, que el gasto no sea erosivo más allá del tramo que se cubre con el calcetín.

Además se debe de garantizar que el suministro de agua sea de forma constante, con el fin de cumplir con las condiciones del incremento de gasto.

Capitulo 6. Evaluación del Riego con Incremento de Gasto en Campo

Los métodos de riego por gravedad diferentes al continuo como el de recorte o cutback, principalmente en los surcos abiertos en su parte final y el intermitente, utilizado en éstos como en los cerrados, son más eficientes que el riego continuo, pero no han tenido un gran impacto en México, el primero porque la mayoría de los surcos son cerrados y el segundo debido al costo de bombeo y de la válvula electrónica necesaria para lograr la intermitencia.

De manera teórica se ha estudiado el riego con incremento de gasto en surcos cerrados, mostrándose que es alternativo al riego continuo, que presenta eficiencias muy aproximadas al riego con recorte en surcos cerrados y que, en algunos casos, compite con el riego intermitente.

Por lo anterior se consideró conveniente realizar una evaluación en campo del riego con incremento de gasto, solicitándose la colaboración de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), a través del Departamento de Irrigación. En este capítulo se presentan los resultados de dicho estudio experimental realizado a una parcela de 23 surcos con pendiente de 0.6%, separación entre surcos de 75 cm, localizados en un suelo franco-arcilloso, con longitud de 290 m, donde se cultivó zanahoria de la variedad Nantes, durante el ciclo otoño-invierno de los años 2002 y 2003. El objetivo fue evaluar en campo el método de riego con incremento de gasto y hacer la comparación con el riego continuo en cuanto a uniformidad de distribución, además de comprobar que el método de riego con incremento de gasto es un método alternativo en la forma de regar logrando con ello ahorros importantes de agua.

De un análisis realizado en el laboratorio de la UACH en una muestra representativa del suelo de la parcela donde se cultivó la zanahoria se obtuvieron los siguientes resultados.

Densidad aparente.	= 1.35g/cm ³ ,
Densidad real.	= 2.40 g/cm ³ ,
Conductividad hidráulica.	= 0.018 cm/min,
Humedad a capacidad de campo.	= 30.45% en peso,
Humedad a punto de marchitamiento permanente.	= 16.40% en peso.

.La evaluación consistió en hacer mediciones para comparar la uniformidad de distribución de las láminas de agua infiltradas, así como la comparación de los volúmenes de agua ingresados y el tiempo de duración de la etapa de avance del agua, después de nueve riegos aplicados con los tres métodos mencionados durante el cultivo de la zanahoria.

Estos resultados experimentales superan las expectativas que, con base en resultados teóricos previos, se tenían del método con incremento de gasto, por lo que no sólo se debe continuar el estudio en parcelas con pendientes más suaves y longitudes menores, sino transferir, de forma inmediata, la tecnología a los agricultores que aún emplean el riego tradicional o continuo en surcos cerrados.

6.1 Mediciones de la humedad del suelo.

Con base en resultados de simulaciones numéricas previas se estimó que los gastos de diseño para el riego de la zanahoria serían del orden de 1 a 3 l/s; sin embargo, debido a las limitaciones de uso de agua en los campos de cultivo de la UACH, se tuvieron que realizar ajustes en campo a través de maniobras en la válvula de alimentación (hidrante) y con el número de surcos servidos.

Con el fin de establecer comparaciones entre los volúmenes de ingreso de los diferentes métodos de riego que se aplicaron al cultivo de la zanahoria se presentan las fechas de riego y las temperaturas medias mensuales en la tabla 6.1.

Los hidrogramas de ingreso del riego con incremento de gasto se presentan en las figuras A.1 a A.8 del nexa A. Los volúmenes de ingreso se muestran en la tabla 6.2

Los volúmenes de ingreso para los riegos con gasto constante o continuo se muestran en la tabla 6.3. En ella se incluyen los gastos y los tiempos de riego.

Tabla 6.1 Fechas de riego en el cultivo de la zanahoria

Riego Número	Fecha	Diferencia en días	Días acumulados	Temperatura media mensual [°C]	Método de riego
	Nov-16-2002	0		12.8	RIG
1	Nov-19-2002	3	3	”	RIG
2	Nov-30-2002	11	14	”	RIG, RC
3	Dic-10-2002	10	24	11.5	RIG, RC
4	Dic-24-2002	14	38	”	RIG, RC
5	Ene-16-2003	23	61	11.4	RIG, RC
6	Feb-13-2003	28	89	13.0	RIG
7	Mar-06-2003	21	110	15.5	RIG
8	Mar-21-2003	15	125	”	RC
9	Mar-27-2003	6	131	”	RIG

Tabla 6.2 Volúmenes de ingreso. Riegos con incremento de gasto e intermitente, cultivo zanahoria

Riego Número	Método de riego	Volumen de ingreso (m ³)
1	RIG	15.675
2	RIG	8.593
3	RIG	6.498
4	RIG	8.316
5	RIG	8.055
6	RIG	21.643
7	RIG	15.137
9	RIG	13.151

Tabla 6.3 Volúmenes de ingreso en los riegos con gasto constante o continuo, cultivo zanahoria

Riego Número	Gasto (l/s)	Tiempo de riego (min)	Volumen de ingreso (m ³)
3	1.48	74	6.571
4	1.54	90	8.316
5	1.03	240	14.832
8	1.12	216	14.515

Los valores de las humedades del suelo se obtuvieron con el método gravimétrico. Para lo cual se tomaron muestras a lo largo del surco. En la tabla 6.4 se presentan los resultados de las humedades antes de los riegos y en la tabla 6.5 las correspondientes después de los riegos.

Tabla 6.4 Humedades del suelo antes de los riegos (% en peso seco), cultivo zanahoria, a una profundidad de 60 cm.

Riego número	Profundidad (cm)	Distancia en el surco (m)					Promedio a lo largo del surco	Uniformidad de distribución
		50	100	145	190	240		
(RIG-1)	0-60	16.40	16.40	16.40	16.40	16.40	16.40	1.000
(RIG-3)	0-60	21.73	20.19		21.16	23.98	21.77	0.928
(RC-3)	0-60	23.29	25.14		25.33	28.42	25.54	0.912
(RIG-4)	0-60	21.41	23.12		23.29	26.13	23.49	0.912
(RC-4)	0-60	22.62	21.02		22.03	24.96	22.66	0.928
(RIG-5)	0-60	23.13		22.64		27.22	24.33	0.931
(RC-5)	0-60	19.76		19.34		23.25	20.78	0.931
(RIG-6)	0-60	15.04		16.44		17.12	16.20	0.928
(RIG-7)	0-60	18.93	19.26		21.94	22.94	20.77	0.911
(RC-8)	0-60	17.89	18.57		19.04	19.48	18.74	0.954
(RIG-9)	0-60	21.63	20.95		22.80	23.24	22.16	0.946

Tabla 6.5 Humedades del suelo después de los riegos (% en peso seco), cultivo zanahoria

Riego número	Profundidad (cm)	Distancia en el surco (m)					Promedio a lo largo del surco	Uniformidad de distribución
		50	100	145	190	240		
(RIG-1)	0-60	24.77	24.22	27.39	23.50	27.06	25.39	0.930
(RIG-3)	0-60	25.16	23.37		24.50	27.76	25.19	0.930
(RC-3)	0-60	29.35	30.20		29.39	32.76	30.43	0.960
(RIG-4)	0-60	28.70	27.79		28.51	34.10	29.78	0.930
(RC-4)	0-60	26.58	25.96		27.03	28.42	27.00	0.960

(RIG-5)	0-60	26.48		27.87		31.27	28.54	0.930
(RC-5)	0-60	25.72		27.90		29.35	27.66	0.930
(RIG-6)	0-60	27.22	27.07		27.08	27.88	27.31	0.990
(RIG-7)	0-60	27.46	28.51	29.80	29.23	29.90	28.98	0.950
(RC-8)	0-60	25.62	24.81		27.00	27.53	26.24	0.950
(RIG-9)	0-60	27.69	28.65	28.30	29.12	30.20	28.79	0.960

6.2 Calculo de las eficiencias.

Para el cálculo de las uniformidades de distribución, se tomaron los valores de humedad del suelo antes y después de los riegos tablas 6.4 y 6.5, se calcularon las láminas de agua infiltradas al terreno las cuales se presentan en la tabla 6.6, donde se utilizo la siguiente expresión:

$$Z = h\rho_s \left(\frac{W_f - W_i}{100} \right) \quad (6.1)$$

Donde:

Z, es la lámina de agua infiltrada, en cm.

h, es la profundidad máxima del muestreo, en cm.

W_f , es la humedad del suelo medida 48 ó 72 horas después del riego, en % de peso seco.

W_i , es la humedad del suelo antes del riego, en % de peso seco.

ρ_s , es la densidad relativa aparente del suelo, adimensional.

Una vez calculadas las láminas infiltradas al suelo, también es necesario conocer la Uniformidad de Distribución (UD), para ello con la ayuda de la tabla 6.6 y con la ecuación 2.11 se obtuvieron los valores presentados en las tablas 6.4 y 6.5, en la columna 9.

Tabla 6.6 Cálculo de las láminas de agua infiltradas (riego con incremento de gasto).

Riego número	Profundidad (cm)	Distancia en el surco (m)					Promedio a lo largo del surco	Uniformidad de distribución
		50	100	145	190	240		
(RIG-1)	0-60	6.78	6.33		5.75	8.63	6.87	0.84
(RIG-3)	0-60	2.77	2.58		2.70	3.06	2.78	0.93
(RIG-4)	0-60	2.95	2.59		2.72	3.23	2.87	0.90
(RIG-5)	0-60	2.71		4.24		3.28	3.41	0.79
(RIG-6)	0-60	9.87		8.61		8.71	9.06	0.95
(RIG-7)	0-60	6.91	7.49		5.90	5.64	6.49	0.87

(RIG-9)	0-60	4.91	6.23		5.12	5.64	5.47	0.90
---------	------	------	------	--	------	------	------	------

Uniformidad promedio = 0.883

Tabla 6.7 Cálculo de las láminas de agua infiltradas (riego con incremento de gasto).

Riego número	Profundidad (cm)	Distancia en el surco (m)					Promedio a lo largo del surco	Uniformidad de distribución
		50	100	145	190	240		
(RC-3)	0-60	2.45	2.05		1.65	1.76	1.98	0.83
(RC-4)	0-60	3.21	4.00		4.05	2.80	3.51	0.80
(RC-5)	0-60	2.41		4.08		2.47	2.99	0.81
(RC-8)	0-60	6.26	5.06		6.45	6.52	6.07	0.83

Uniformidad promedio = 0.817

6.3 Comparación de los riegos.

Comparación de los riegos con incremento de gasto

En la tabla 6.8 se resumen las duraciones de las etapas de avance para los riegos con incremento de gasto y continuo aplicados en el cultivo de zanahoria, así como las distancias a partir de las cuales se realizó el incremento de gasto. Se puede observar que se ensayó el incremento de gasto a distancias diversas, con el fin de contrastar las pruebas de campo con las simulaciones numéricas (tabla 5.1)

Tabla 6.8 Duraciones de las etapas de avance y distancias de incremento de gasto, cultivo zanahoria

Riego Número	Gasto inicial (RIG) o constante (RC) (l/s)	Duración de la etapa de avance del agua (min)	Tiempo de riego (min)	Distancia recorrida hasta el incremento de gasto (m)	Fracción de longitud del surco en el incremento
RIG-1	2.375	78	94	290	1.00
RIG-3	0.95	46	70	150	0.52
RC-3	1.48	53 (hasta 260 m)	74		
RIG-4	1.40	44 (hasta 260 m)	63	145	0.5

RC-4	1.54	50	90		
RIG-5	0.895	90	90	97	0.33
RC-5	1.03	240	240		
RIG-6	1.336	129 (hasta 280 m)	150	72.5	0.25
RIG-7	0.584	240 (hasta 280 m)	244	72.5	0.25
RC-8	1.12	216 (hasta 280 m)	216		
RIG-9	0.895	127	140	72.5	0.25

Se puede observar que mientras se reduce la distancia del incremento de gasto el tiempo de riego aumenta, lo que erróneamente se puede traducir en que se estaría dando un riego excesivo. Por lo cual es necesario recurrir a las láminas de agua infiltradas y con ellas calcular su uniformidad de distribución para comprobar que tan eficientemente se ha estado regando. Los tiempos de riego son mayores por el aumento de la rugosidad en los surcos, debido al crecimiento de maleza en los surcos.

Por ejemplo podemos comparar a los riegos con incremento de gasto 4 y 6, en donde sus gastos fueron de 1.40 y 1.336 l/s respectivamente (muy parecidos), teniendo el siguiente cuadro resumen.

Tabla 6.9 Comparación de los riegos con incremento de gasto 4 y 6

Riego número	Profundidad (cm)	Uniformidad de Distribución láminas de agua (%)	Tiempo de riego (min)	Distancia del Incremento (m)
4	0-30	0.902	63	145
(RIG-4)	30-60	0.482		
[48 h]	0-60	0.669		
6	0-30	0.940	150	75
(RIG-6)	30-60	0.750		
[48 h]	0-60	0.950		

Se observa que en el riego 6 se presentan mejores uniformidades de distribución, no obstante que se utilizó más tiempo de riego, por lo que se nota la influencia de la distancia a la que hay que realizar el incremento de gasto y se ve que es conveniente el incremento a un cuarto de la longitud el surco. Esto se observa en los riegos 3 y 9, en donde se tienen gasto de 0.95 y 0.895 l/s y en donde los resultados son favorables para el riego 9.

Tabla 6.10 Comparación de los riegos con incremento de gasto 3 y 9

Riego número	Profundidad (cm)	Uniformidades de distribución láminas de agua (%)	Tiempo de riego (min)	Distancia del incremento (m)
3	0-30	0.699	70	150
(RIG-3)	30-60	0.216		
[48 h]	0-60	0.928		
9	0-30	0.856	140	75
(RIG-9)	30-60	0.650		
[48 h]	0-60	0.896		

Por otra parte, con el fin de comparar las láminas de riego promedio infiltradas en el riego 5 a través de un cálculo simple, se tiene: $8.055/(290 \cdot 0.75) = 0.037$ m para el riego con incremento de gasto y $14.832/(290 \cdot 0.75) = 0.062$ m para el riego continuo. Cabe la pregunta: ¿cuál es la dosis que requería el cultivo el día del riego? De los valores presentados en las tablas 6.4 y 6.5, se toman los valores de humedades antes y después del riego (24.3 % y 28.5 % respectivamente), con una profundidad radicular de 60 cm en la zanahoria, y con los datos del análisis del suelo presentados al inicio de este capítulo, según la ecuación 5.4 la dosis se puede calcular como

$$Z_m = 60 \left(\frac{28.5 - 24.3}{100} \right) 1.35 = 3.4 \text{ cm} = 0.034 \text{ m}$$

Este resultado indica que la lámina de agua promedio infiltrada en el riego con incremento de gasto es más adecuada que la del riego continuo. Por tanto, se demuestra que el beneficio en la reducción de los volúmenes de agua es muy significativo si se emplea el riego con incremento de gasto en vez del riego continuo, con un ahorro de agua del orden de la mitad con respecto al continuo, a menos que en éste se empleara un gasto más alto que redujera la duración de la etapa de avance del agua, pero con las consecuencias de la posible erosión del surco y una lámina de agua infiltrada que no cumpliera con la dosis requerida por el cultivo, además de un aumento en el volumen de ingreso.

En los últimos tres riegos ya no hubo comparación de los dos métodos el mismo día; pero puede observarse que los volúmenes aplicados en los riegos 7 y 8 son muy semejantes, aunque ligeramente mayor el del riego con incremento de gasto. Por ello, con los datos de la tabla 4 se calcula una relación $15.137/14.515 = 1.04$; sin embargo, debe considerarse que la diferencia en días entre los riegos 6 y 7 es de 21 y entre los riegos 7 y 8 es de 15

(tabla 6.1), además de que las temperaturas en los días previos al riego 7 del 21 de marzo de 2003 fueron en extremo altas, lo cual exigió la aplicación del riego en esa fecha.

Comparación de los riegos con incremento de gasto y continuo obtenidos teóricamente con los recopilados en campo.

Con los datos obtenidos en campo y presentados en las tablas 6.6 y 6.7 (láminas de agua nfiltradas) y con la tabla 5.2 (láminas de agua infiltradas) calculadas por medio del modelo numérico se llega a los siguientes resultados comparativos mostrados en la tabla 6.11.

Tabla 6.11 Láminas de agua y uniformidades de distribución de los riego.

Riego número	Lámina promedio de agua en el surco en campo (cm)	Uniformidad de distribución en campo	Lámina promedio de agua en el surco con el modelo numérico (cm)	Uniformidad de distribución con el modelo numérico
RIG-1	6.870	0.840	7.370	0.850
RIG-3	2.780	0.930	3.070	0.940
RC-3	1.980	0.830	3.090	0.850
RIG-4	2.870	0.902	3.920	0.815
RC-4	3.510	0.800	3.902	0.881
RIG-5	3.410	0.790	5.360	0.782
RC-5	2.990	0.810	3.850	0.780
RIG-6	9.060	0.950	10.166	0.850
RIG-7	6.490	0.870	7.255	0.890
RC-8	6.070	0.830	6.032	0.780
RIG-9	5.470	0.900	6.603	0.960

De la tabla anterior se observa que las láminas de agua son muy próximas, a excepción del riego 5 en el cual existe una diferencia de 2 cm de lámina de agua, además del modelo numérico las láminas de agua infiltradas son mayores que las obtenidas en campo, las uniformidades de distribución en el caso de los resultados teóricos resultan superiores a los de campo, esto a causa de que existe una mayor infiltración en los primeros.

6.4 Impacto en la conservación del agua.

De los resultados presentados en este trabajo, en caso de emplearse el riego con incremento de gasto en sustitución del método tradicional o continuo, el ahorro de agua por la mejor distribución a lo largo del surco puede ser significativa en los países en desarrollo, sin olvidar que la tendencia es hacia el empleo de tecnologías modernas como el riego presurizado. Sin embargo, en tanto éste no sustituya en un 100 % al riego por gravedad, debe propiciarse el uso eficiente del agua en las parcelas. De los resultados obtenidos el valor promedio de la Uniformidad de Distribución en los riegos con incremento de gasto fue de 0.883 y aceptando que se satisfaga la dosis que requiera el cultivo, al ahorro de agua con respecto al riego continuo (con una uniformidad de distribución del 59 %, mencionada al principio), podemos calcularla con la ecuación 2.15

$$Ag = \left(1 - \frac{0.59}{0.883}\right) * 100 = 33.17 \%$$

Con este simple cálculo se intuye que el agua ahorrada puede emplearse tanto para el incremento de las tierras de cultivo, así como para otros usos. Por ejemplo, si el uso fuera exclusivo para el servicio público en México, donde se dedica el 12 % del total de agua aprovechada, se tendría $0.33.17 * 62.4 \% = 20.69 \%$ (recordando que el 62.4 % del total de agua se dedica al riego por métodos tradicionales), es decir, podría cubrirse una cantidad próxima al doble de la demanda de agua para el servicio público.

Si se comparan los promedios de las Uniformidades de distribución promedio se tiene

$$Ag = \left(1 - \frac{0.817}{0.883}\right) * 100 = 7.40 \%$$

Por tanto, sin ser una diferencia tan significativa, debido a que los riegos con gasto constante fueron bien aplicados, es suficiente para concluir como resultado de la evaluación, que el riego con incremento de gasto es alternativo al riego continuo. Por lo que se recomienda un cambio en la manera de regar en México, el cual podría tener resultados impactantes en el abasto de agua.

Capitulo 7. Conclusiones

De los resultados obtenidos se desprenden los siguientes puntos.

1. De acuerdo con la comparación de las uniformidades de distribución del riego con incremento de gasto en campo (0.883) y el promedio de las mismas para los riegos con gasto constante (0.817), se concluye que el riego con incremento de gasto es factible de ser empleado en vez del riego continuo, con un ahorro de agua aproximado del 7.4%. Este valor puede parecer muy pequeño pero al realizar el cálculo se está pensando en que de acuerdo al Programa Nacional Hidráulico 20001-2006, el agua de riego por gravedad ocupa 16 134 millones de m³, el servicio público toma 3 103 millones de m³, si se regara con el método de incremento de gasto (tomando en cuenta el ahorro del 7.4 % de agua) el agua ahorrada es del orden de 1 194 millones de m³, lo cual da idea de que es cerca de la mitad del agua destinada al servicio público (38.48%), con lo cual se podría aminorar el abasto del líquido en zonas donde es insuficiente el suministro. Pero además se podría extender un poco más las zonas de riego.
2. La disminución de los volúmenes de agua aplicados en el riego con incremento de gasto, en comparación con el riego continuo, cuando los gastos iniciales son muy aproximados, se debe a la reducción en la duración de la etapa de avance del agua. En la actualidad en muchos lugares de México se sigue cortando el riego cuando se concluye ésta sin considerar la dosis por infiltrar, el método puede producir ahorros importantes de agua.
3. Es recomendable realizar el incremento de gasto cuando el agua haya llegado a un cuarto de la longitud del surco, con ello se garantiza una buena uniformidad de distribución de las láminas de agua.

-
-
4. El procedimiento para aplicar el riego con incremento de gasto no ofrece mayores dificultades, ya sea que se utilice una tubería con compuertas en la cabecera de los surcos para ingresar agua, sifones o boquillas desde un canal o regadera. Es decir, se puede realizar sin importar la forma de alimentación de los surcos, lo que lo hace versátil en comparación del riego intermitente.
 5. El modelo numérico que se utilizó para las simulaciones de los riegos dio muestra de que reproduce los riegos con suficiente aproximación, por lo que es una herramienta auxiliar muy útil para el caso de que se quiera conocer el gasto y el tiempo de riego en un diseño de riego por gravedad. Aunque con las consideraciones previas de tener que calibrar primero el modelo con datos reales de campo y en este caso es primordial tener datos de la forma del surco y conocer la rugosidad verdadera en campo.
 6. Es recomendable llevar a cabo otras evaluaciones en surcos con diferentes pendientes y longitudes, con el fin de tener más fuentes de comparación entre el riego con incremento de gasto y el riego continuo, además de realizar otras más comparando el riego con incremento de gasto y el riego intermitente, ya que como se mencionó antes éste último es reconocido como el método más eficiente en riegos por gravedad y por lo observado y calculado se puede pensar en que incluso el riego con incremento de gasto presente mejores uniformidades de distribución que las obtenidas con riego intermitente.

**ANEXO A. HIDROGRAMAS DE INGRESO EN LOS
ENSAYOS DE CAMPO**

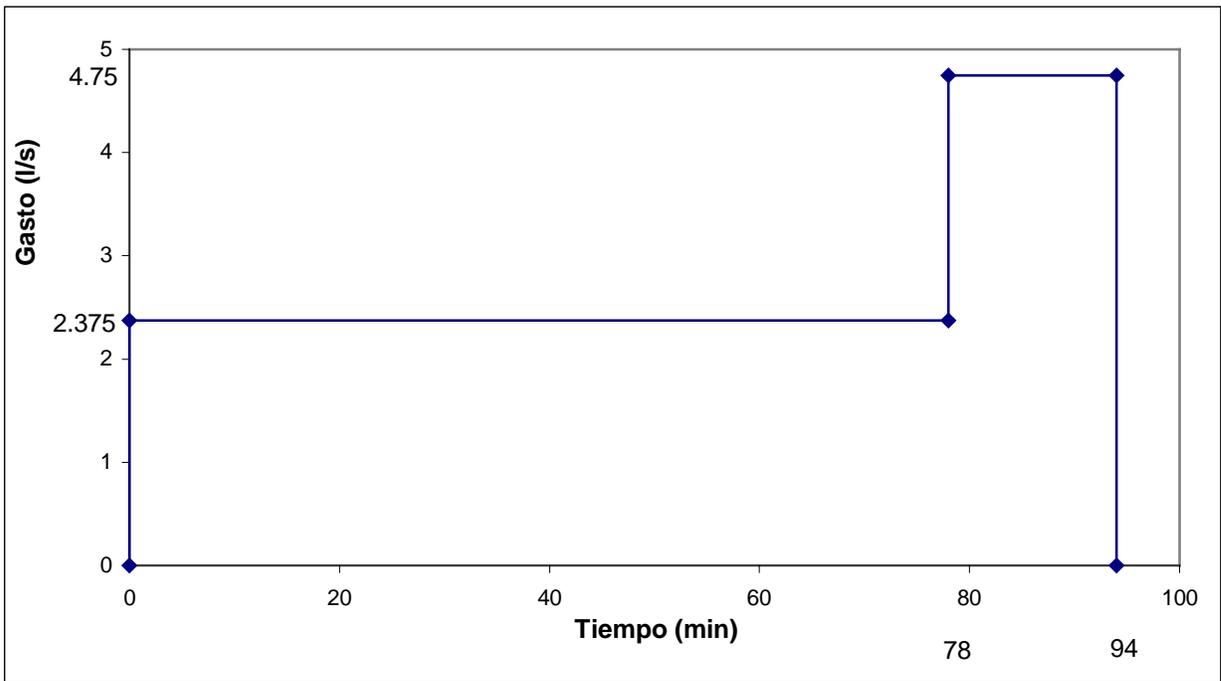


Figura A.1. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 1, cultivo zanahoria

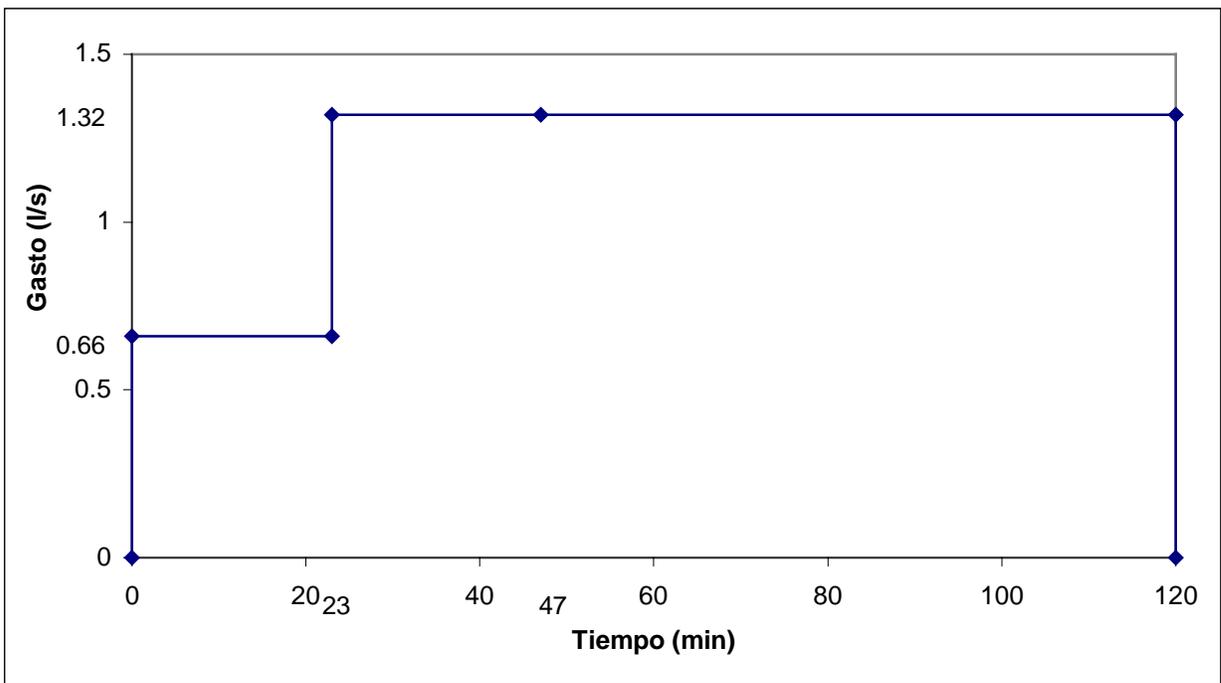


Figura A.2. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 2, cultivo zanahoria

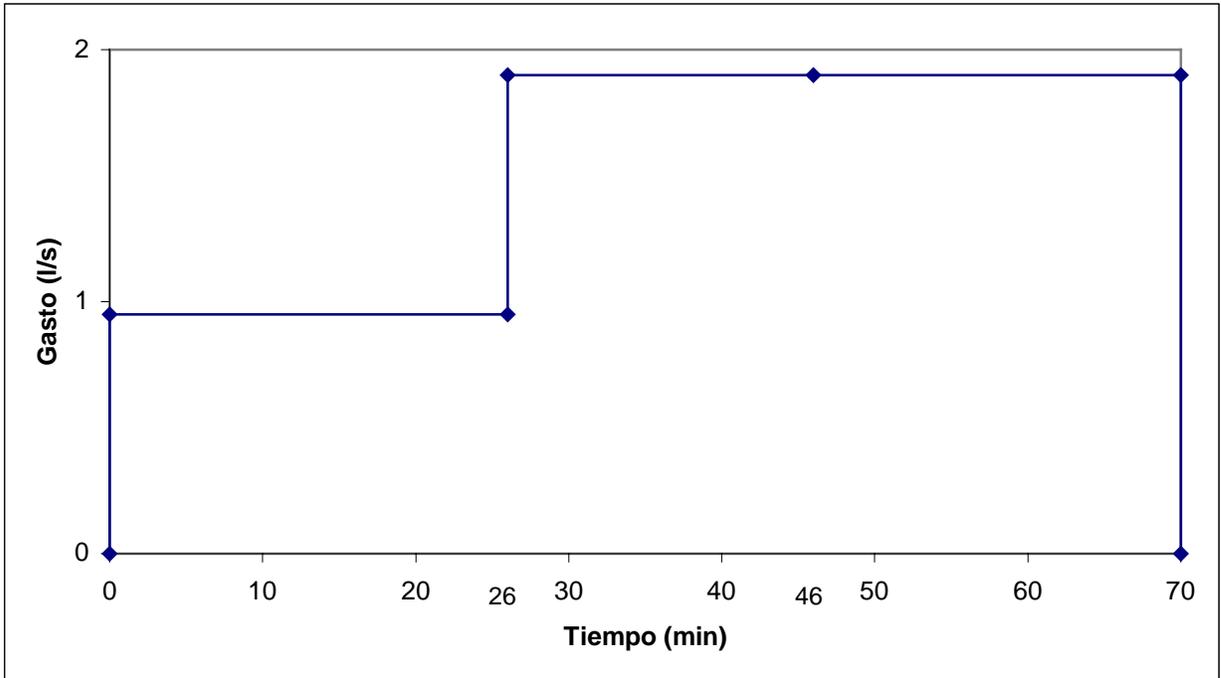


Figura A.3. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 3, cultivo zanahoria

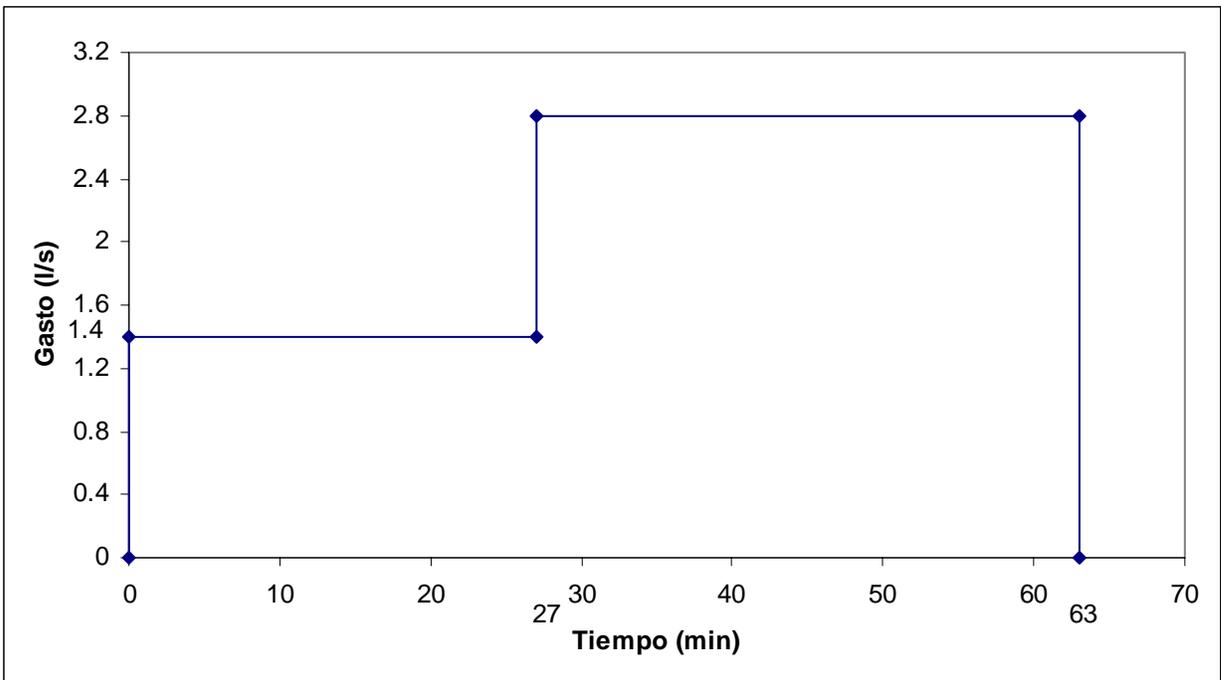


Figura A.4. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 4, cultivo zanahoria

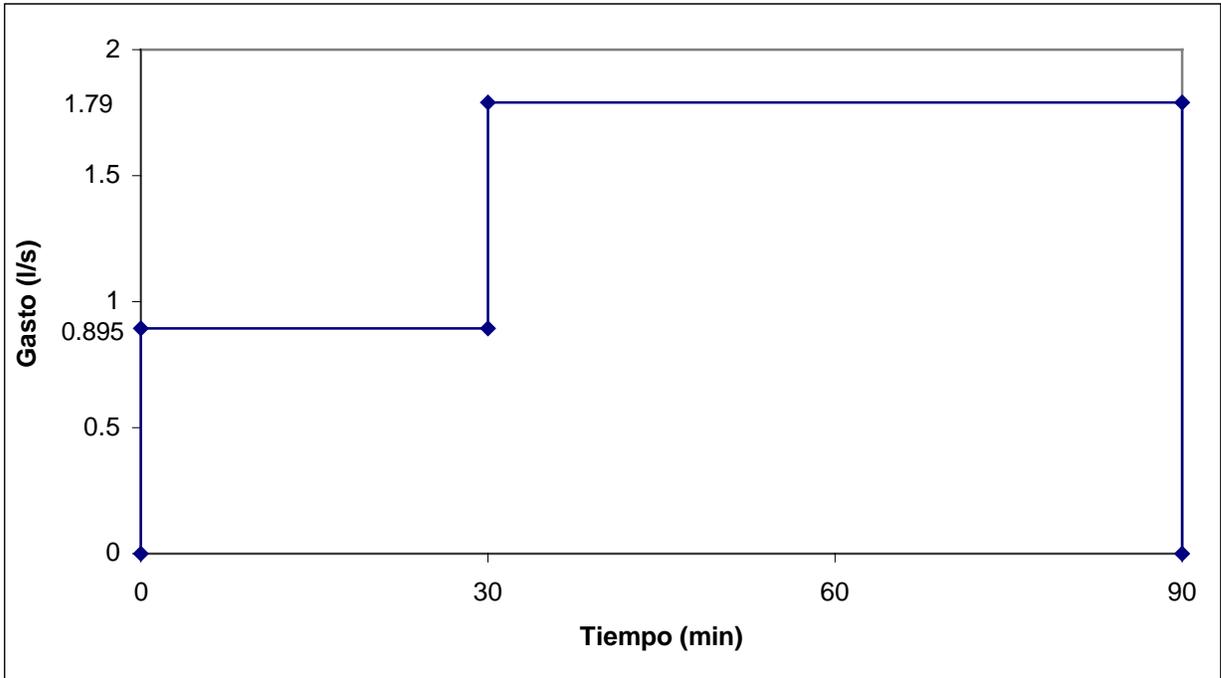


Figura A.5. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 5, cultivo zanahoria

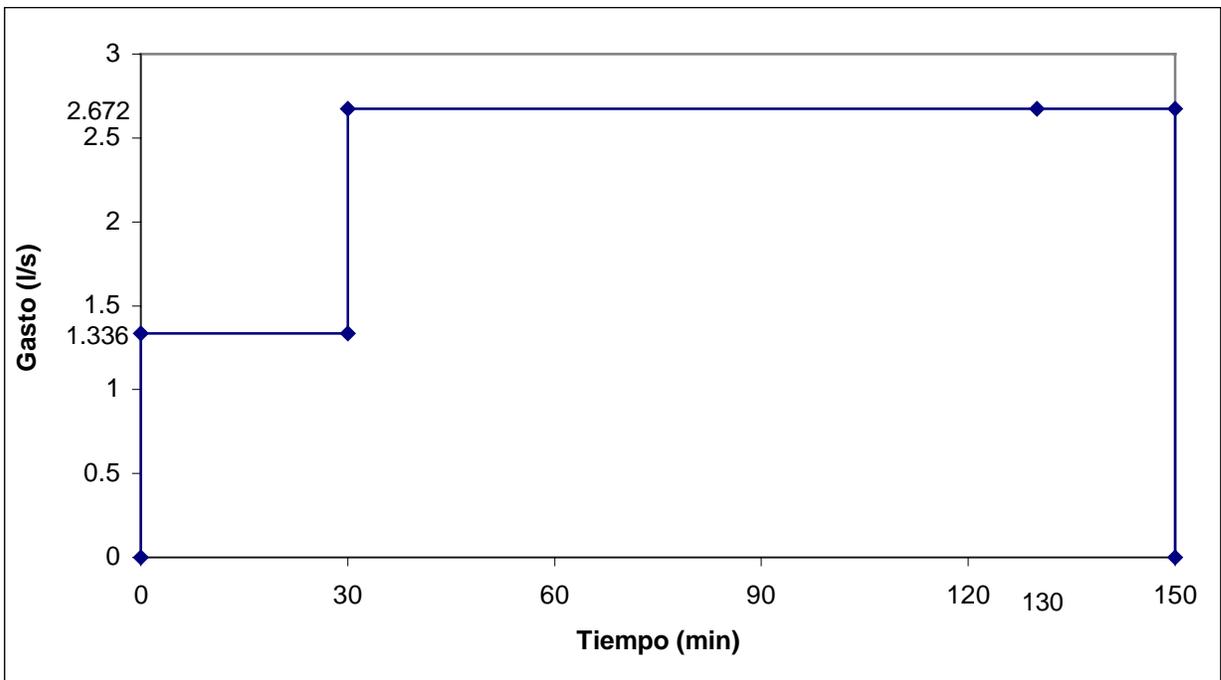


Figura A.6. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 6, cultivo zanahoria

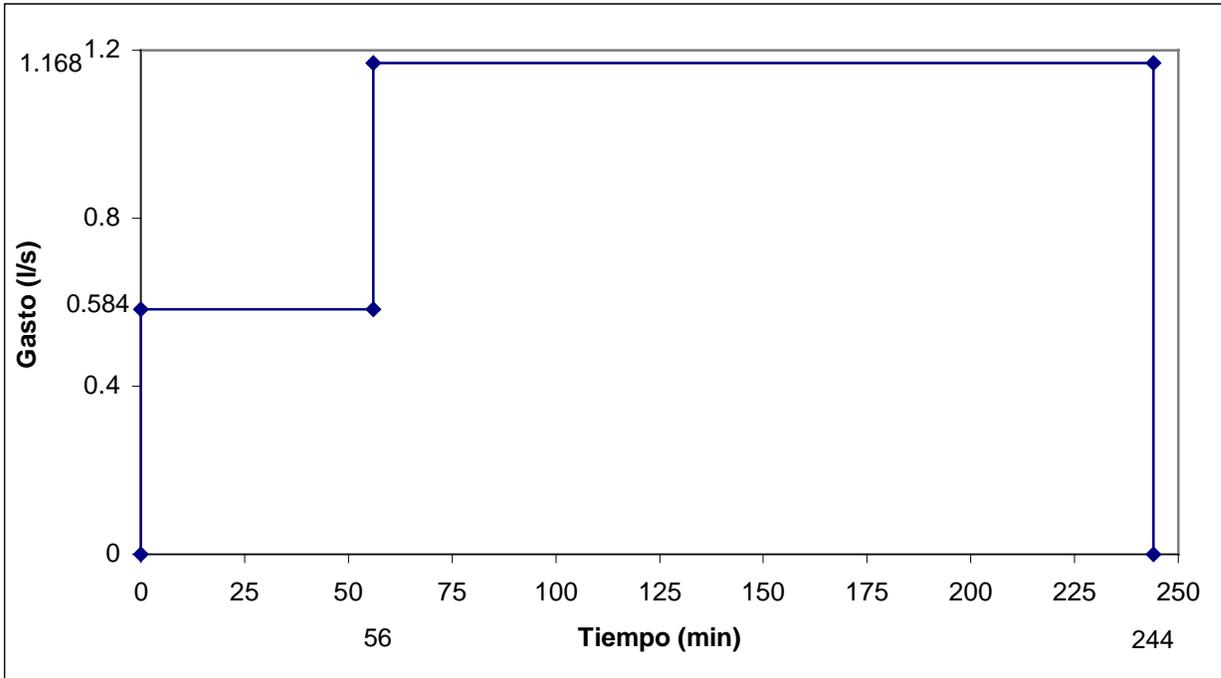


Figura A.7. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 7, cultivo zanahoria

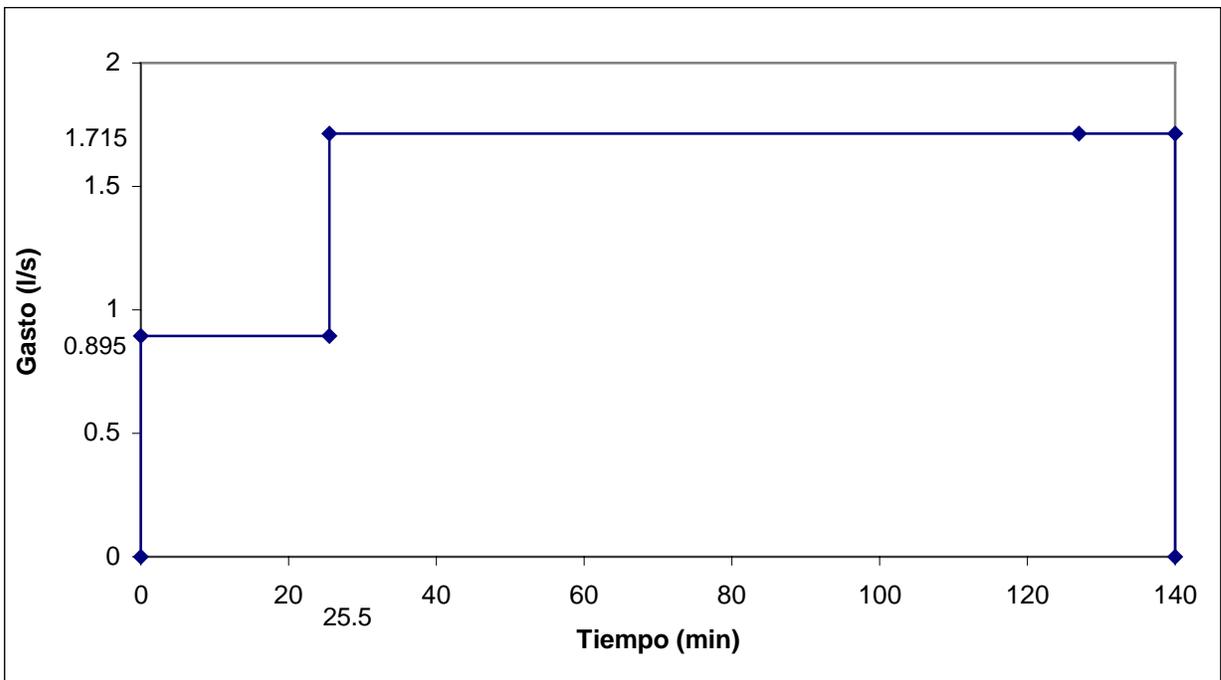


Figura A.8. Hidrograma de ingreso para la primera mitad de la batería de surcos (localización del surco de muestreo). Riego 9, cultivo zanahoria

**ANEXO B. CURVAS DEL AVANCE DEL AGUA EN LOS
ENSAYOS DE CAMPO**

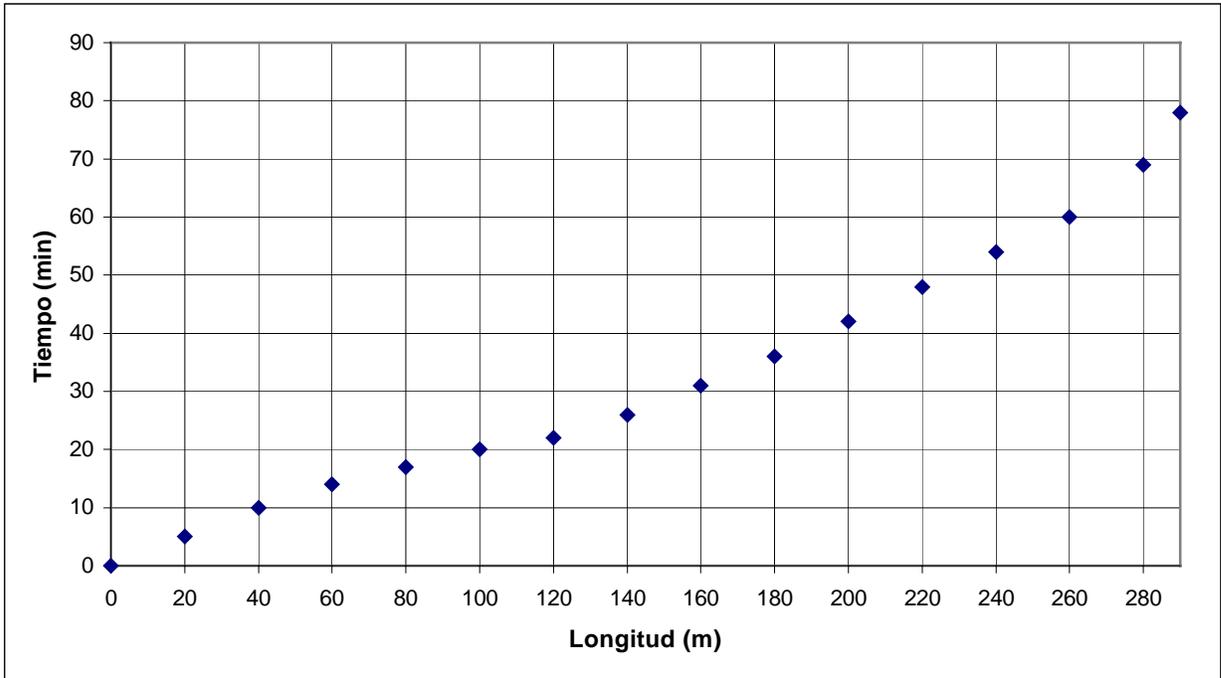


Figura B.1 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos . Riego 1 con incremento de gasto, cultivo zanahoria

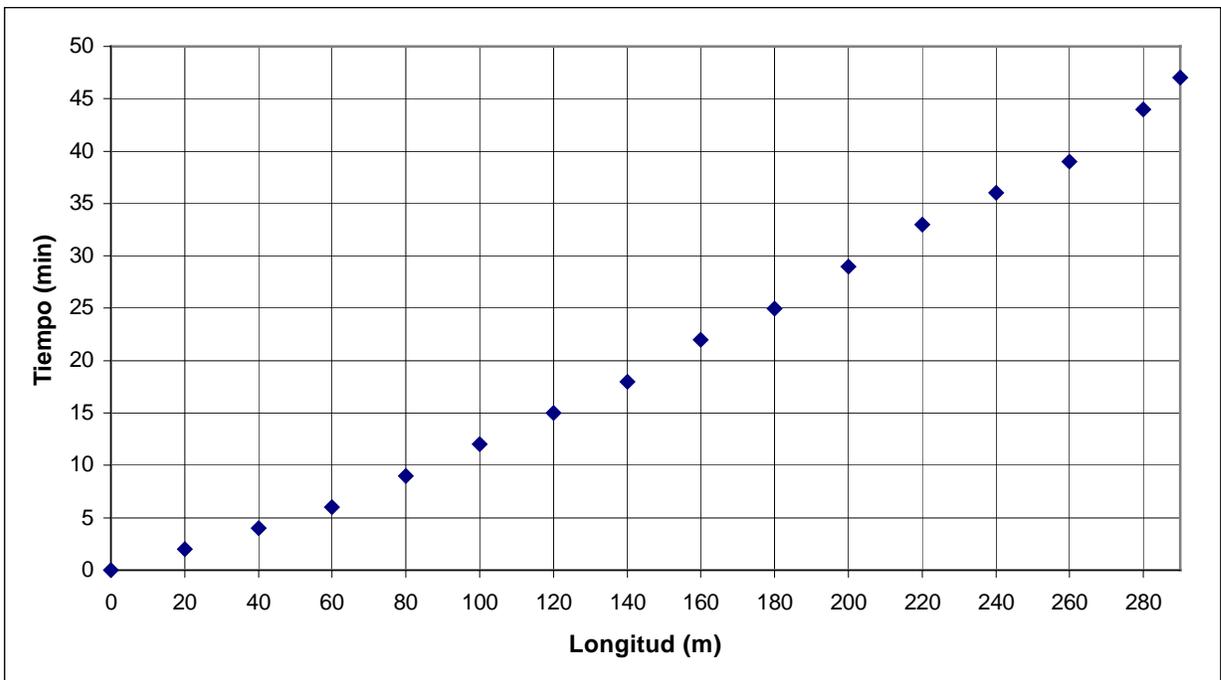


Figura B.2 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 2 con incremento de gasto, cultivo zanahoria

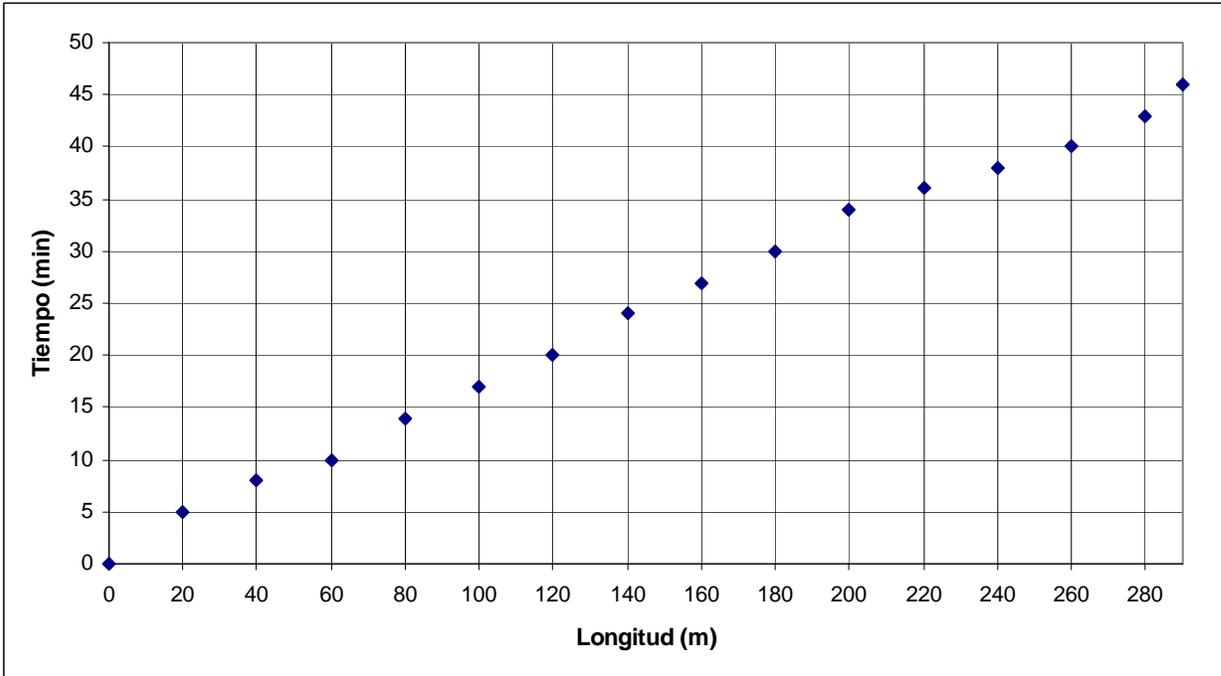


Figura B.3 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 3 con incremento de gasto, cultivo zanahoria

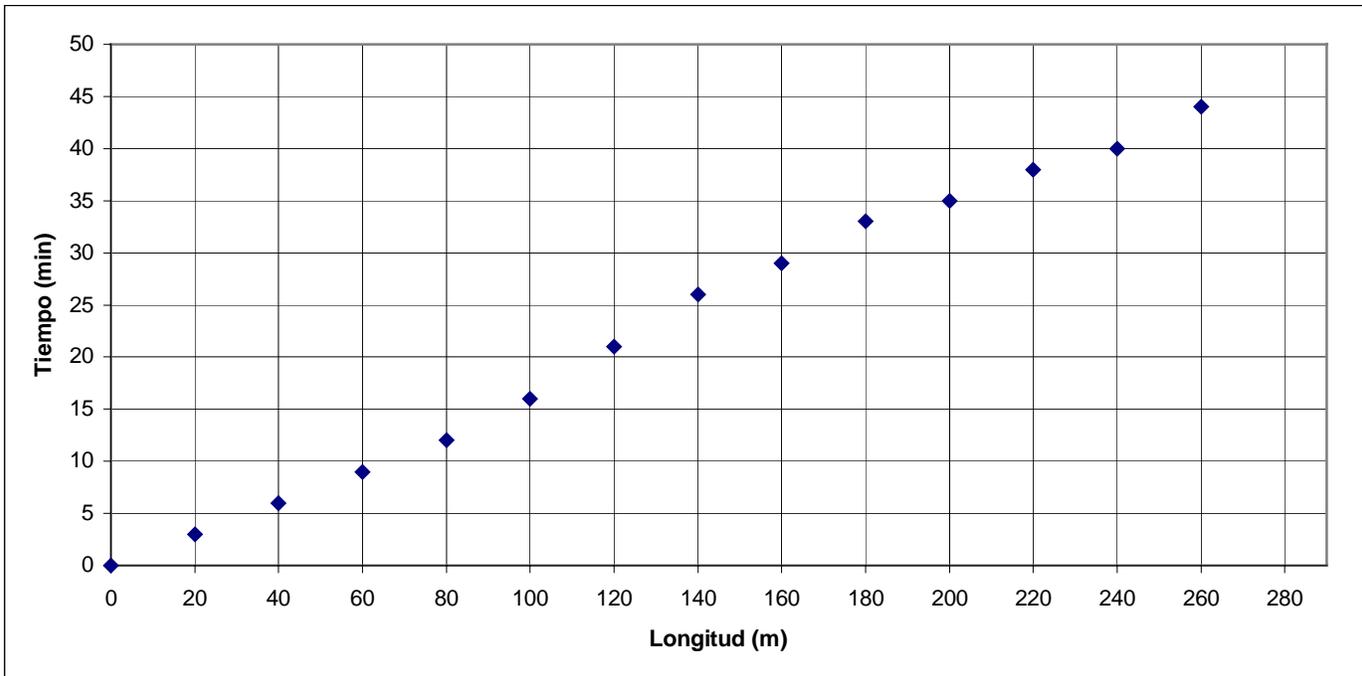


Figura B.4 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 4 con incremento de gasto, cultivo zanahoria.
No se midieron los tiempos hasta la longitud total de 290 m

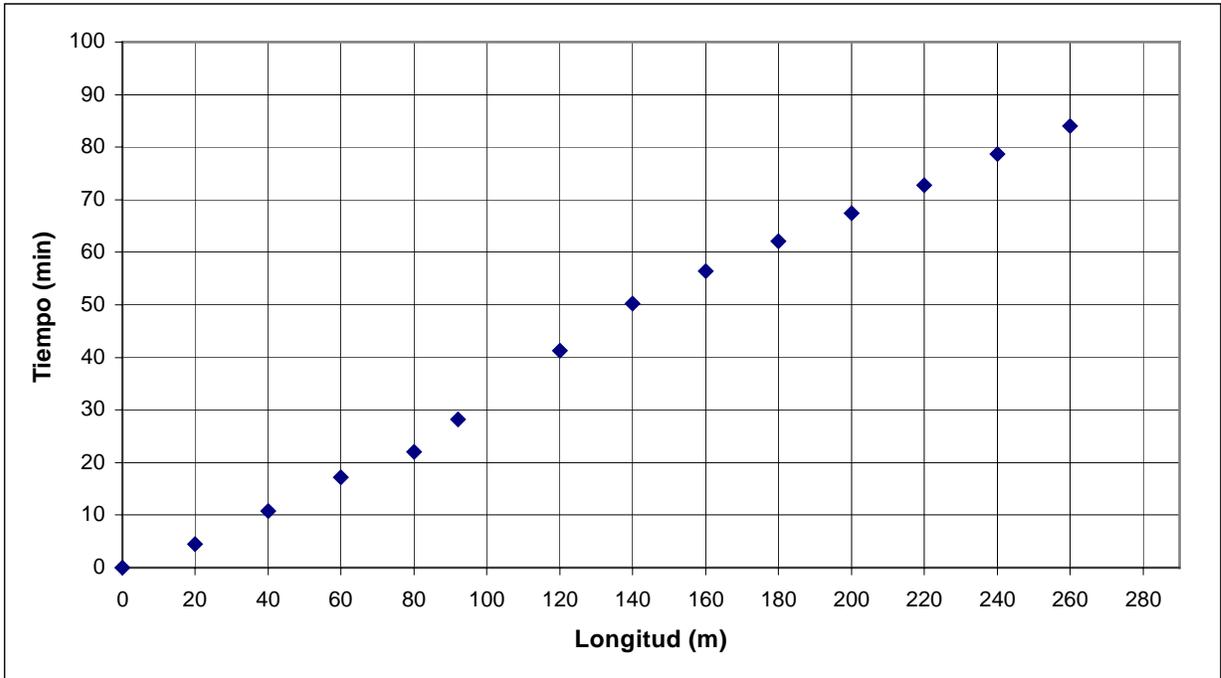


Figura B.5 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 5 con incremento de gasto, cultivo zanahoria.
No se midieron los tiempos hasta la longitud total de 290 m

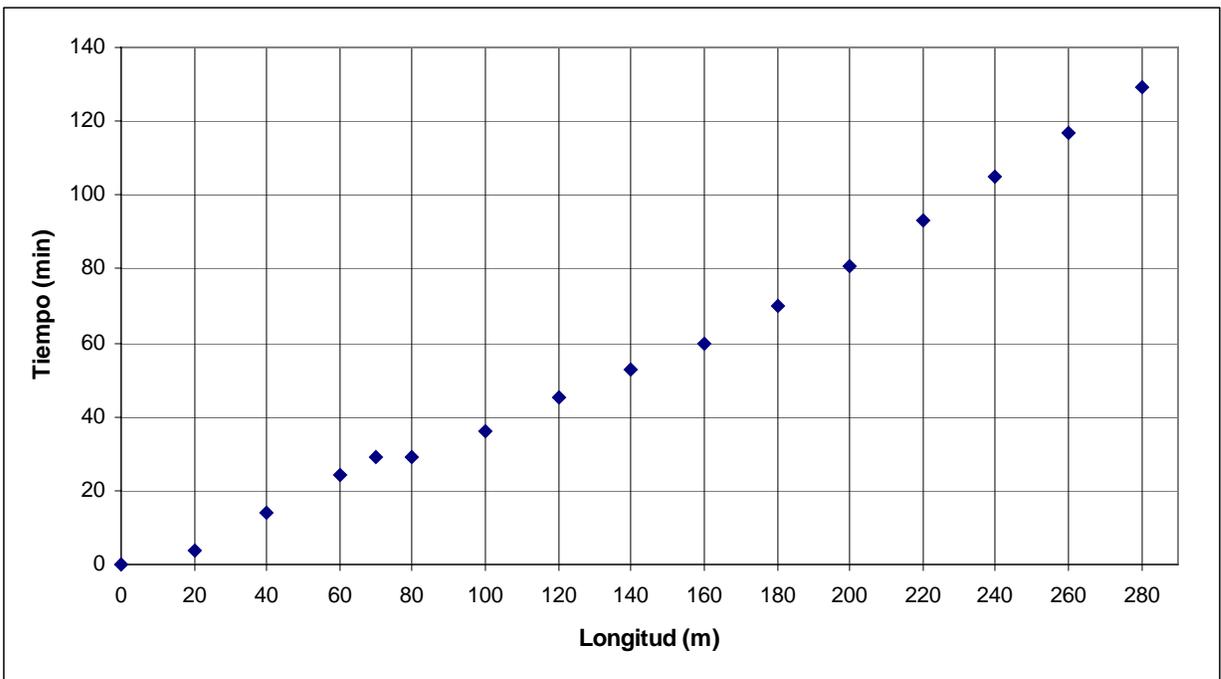


Figura B.6 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 6 con incremento de gasto, cultivo zanahoria

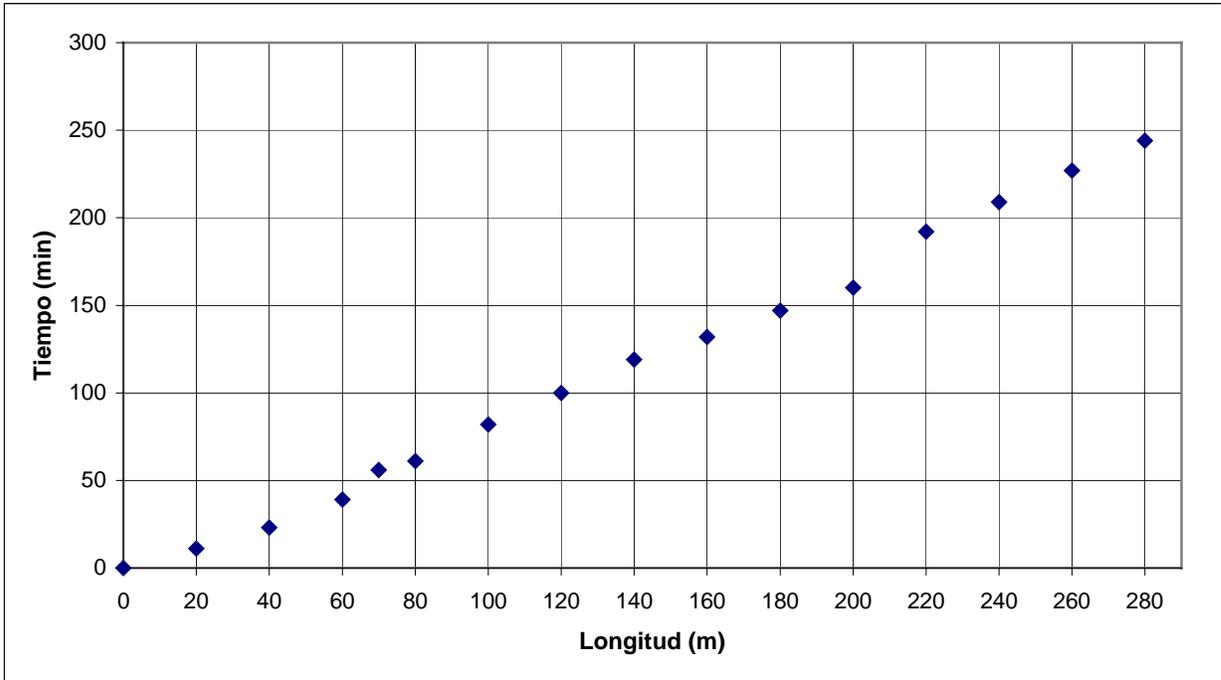


Figura B.7 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 7 con incremento de gasto, cultivo zanahoria

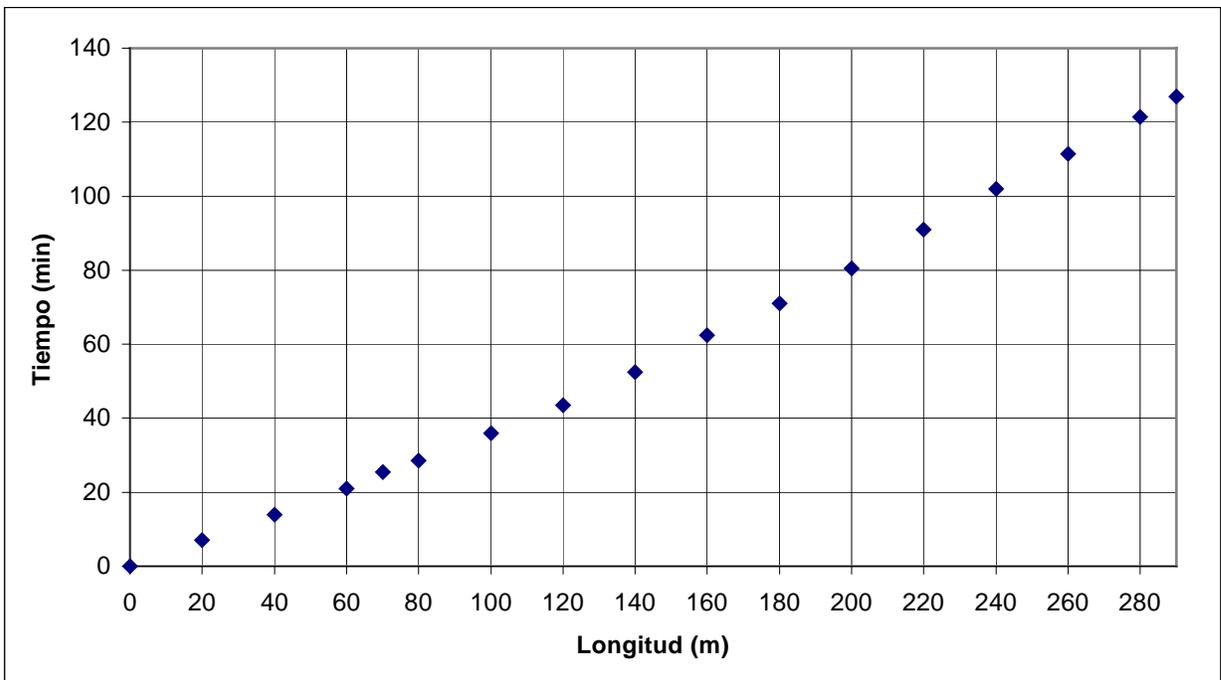


Figura B.8 Avance del agua en un surco localizado en la primera mitad de la batería de surcos. Riego 9 con incremento de gasto, cultivo zanahoria.

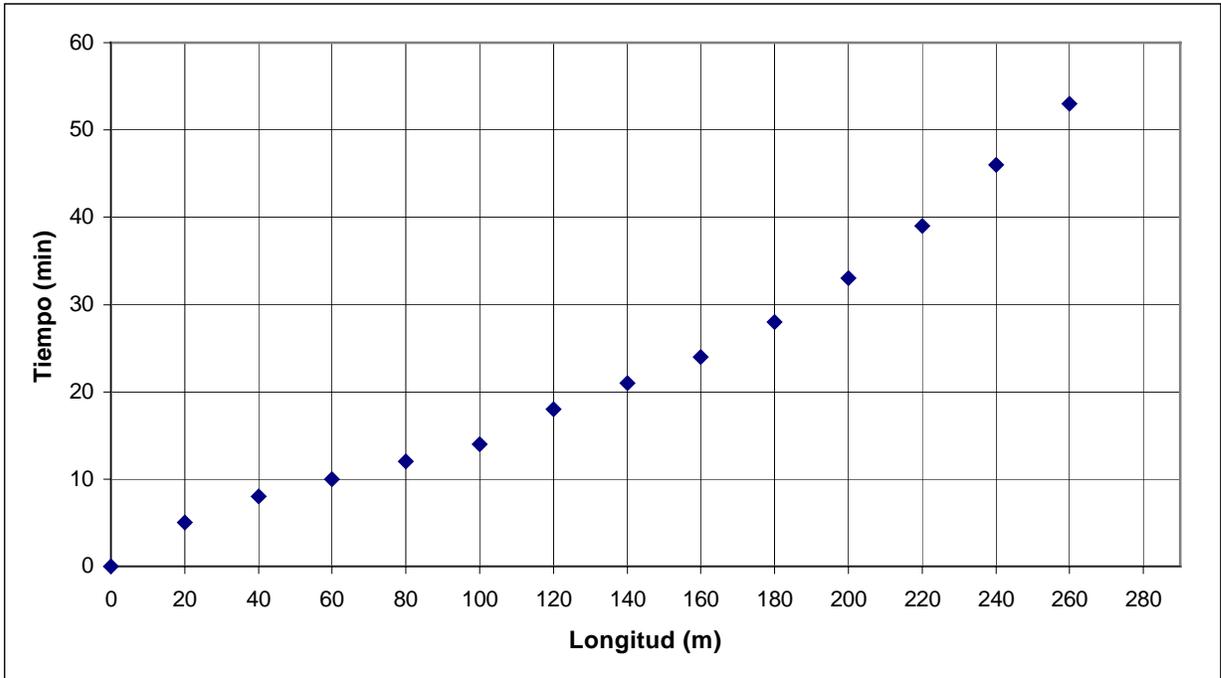


Figura B.9 Avance del agua en un surco con riego continuo. Riego 3, cultivo zanahoria.

No se midieron los tiempos hasta la longitud total de 290 m.

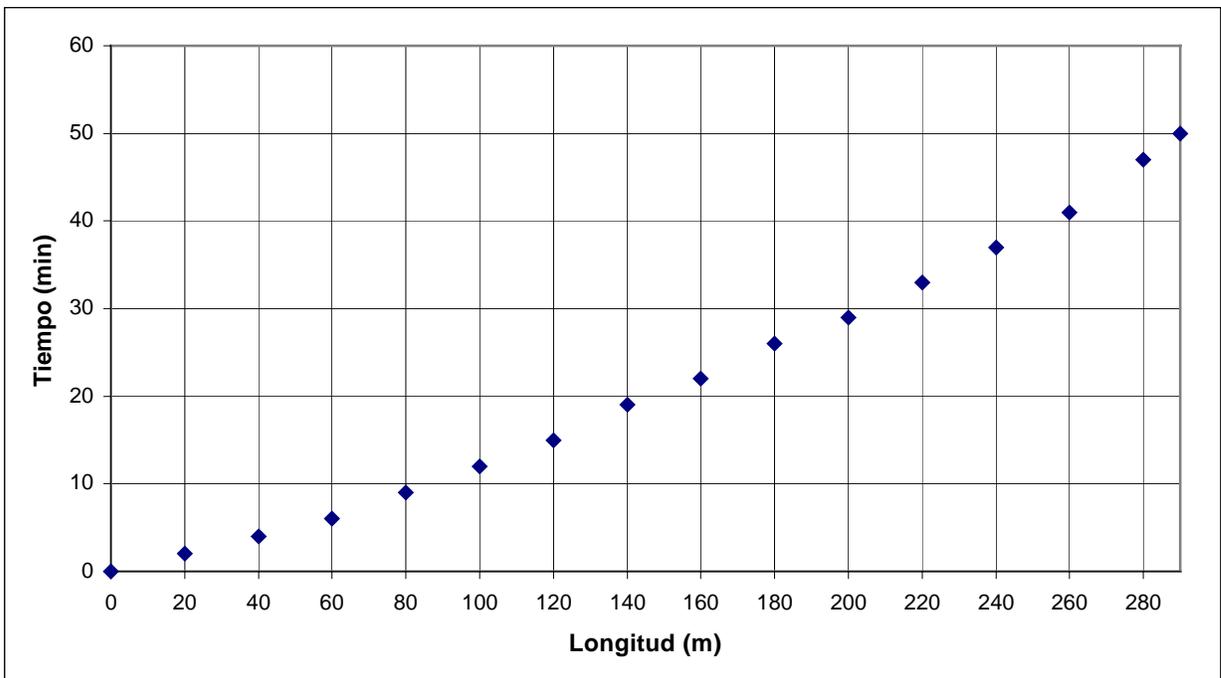


Figura B.10 Avance del agua en un surco con riego continuo. Riego 4, cultivo zanahoria

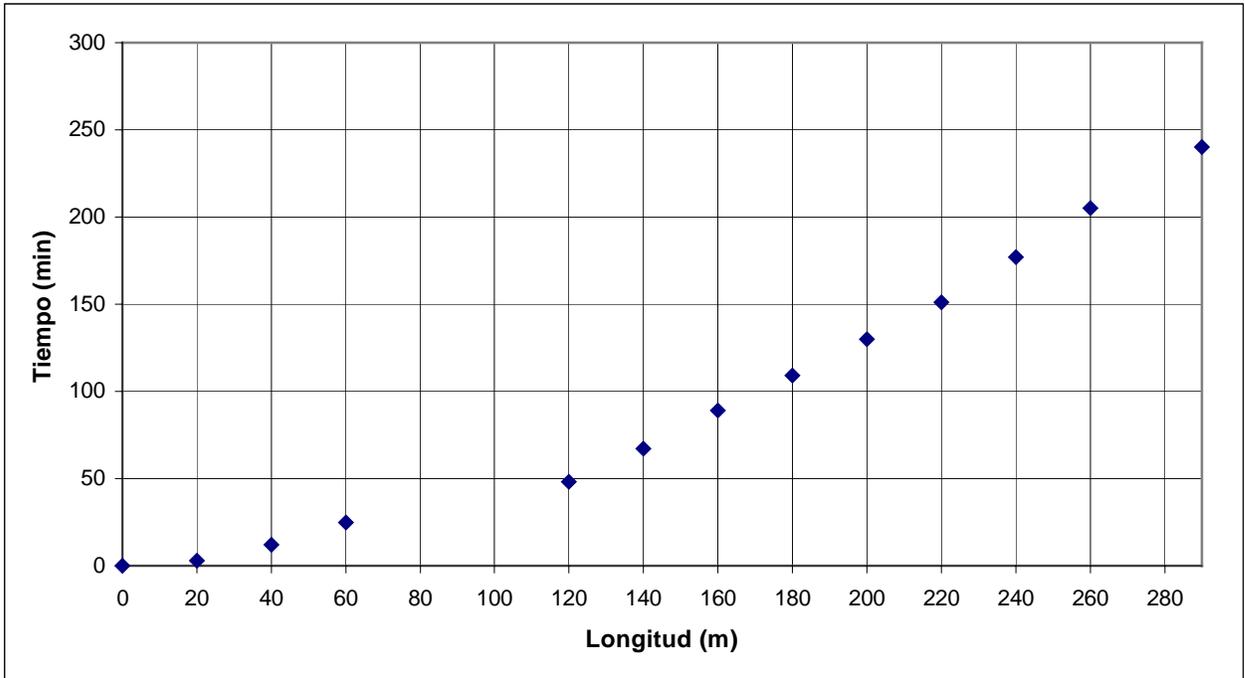


Figura B.11 Avance del agua en un surco con riego continuo. Riego 5, cultivo zanahoria.

No se midieron los tiempos en dos puntos intermedios

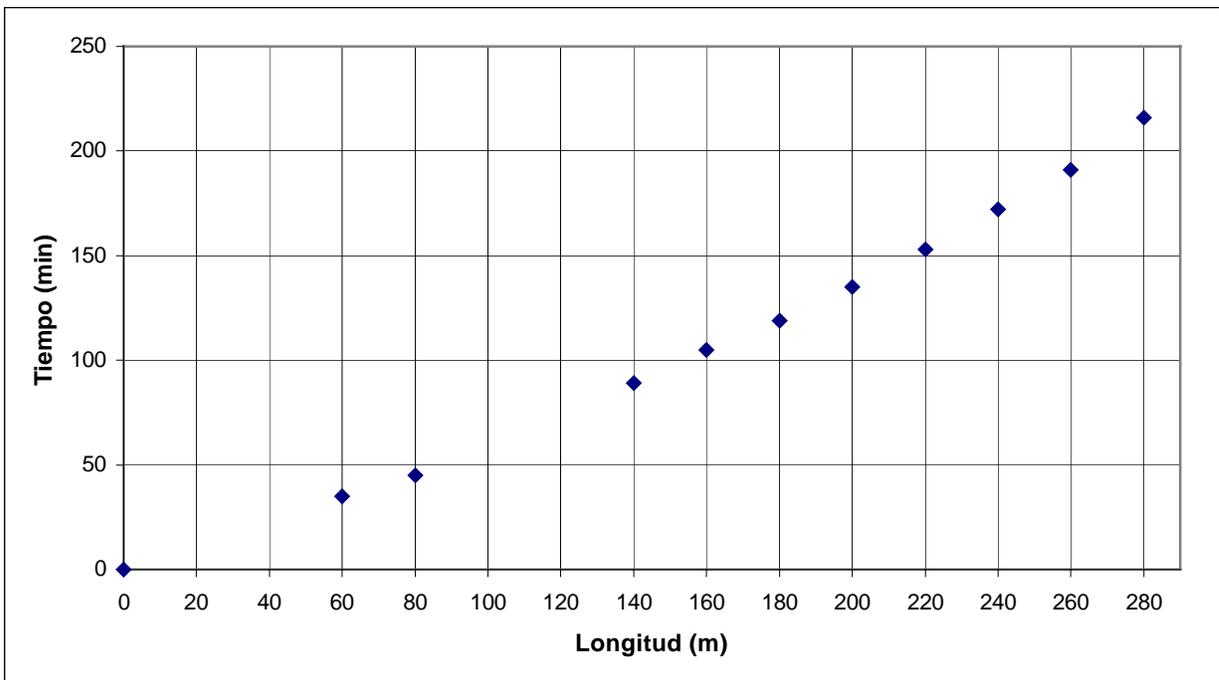


Figura B.12 Avance del agua en un surco con riego continuo. Riego 8, cultivo zanahoria.

**ANEXO C. CURVAS DE AVANCE DEL AGUA Y DE
LÁMINA INFILTRADA OBTENIDAS CON EL MODELO
NUMÉRICO**

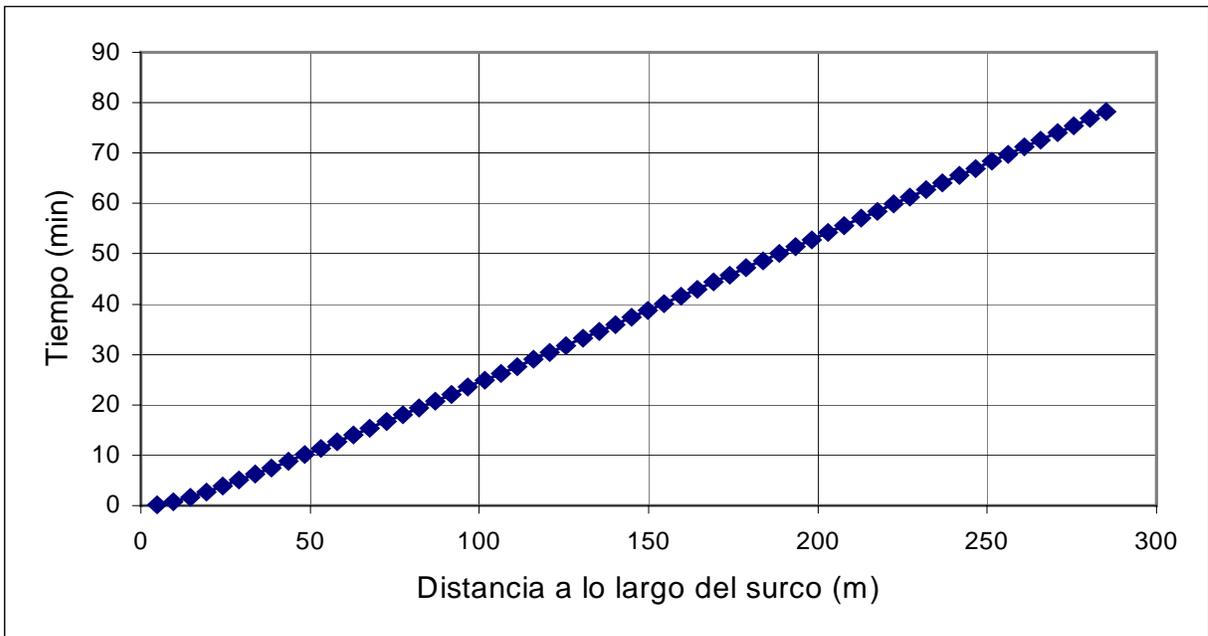


Figura C.1. Curva de avance del agua

RIG 1, cultivo zanahoria

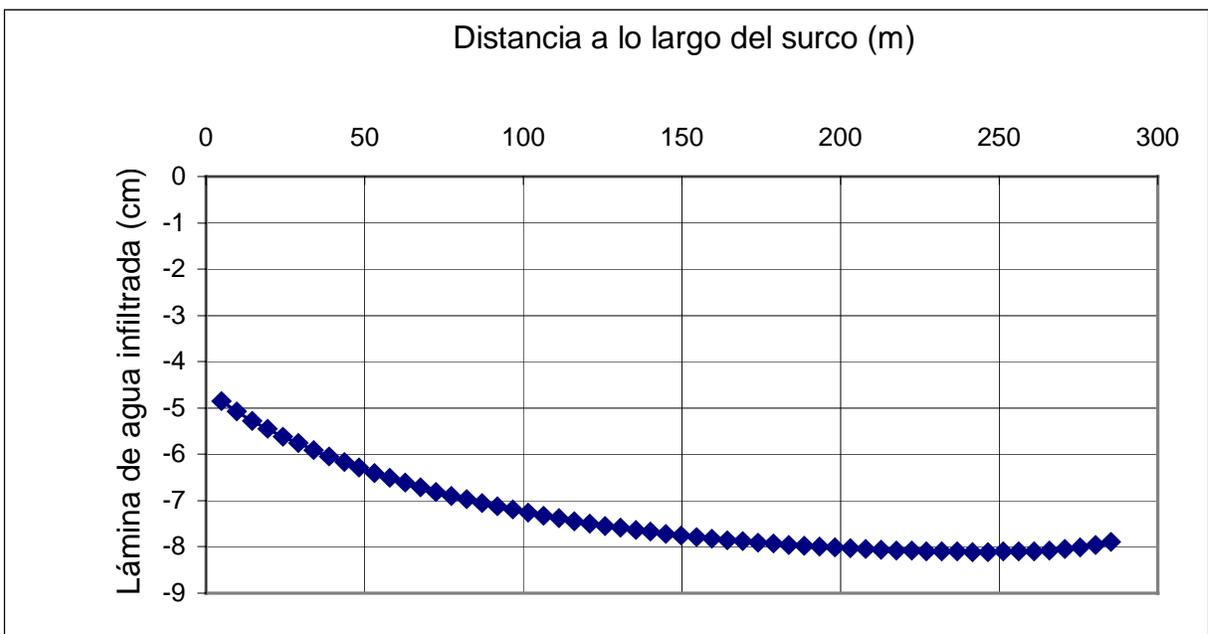


Figura C.2. Curva de lámina de agua infiltrada

RIG 1, cultivo zanahoria

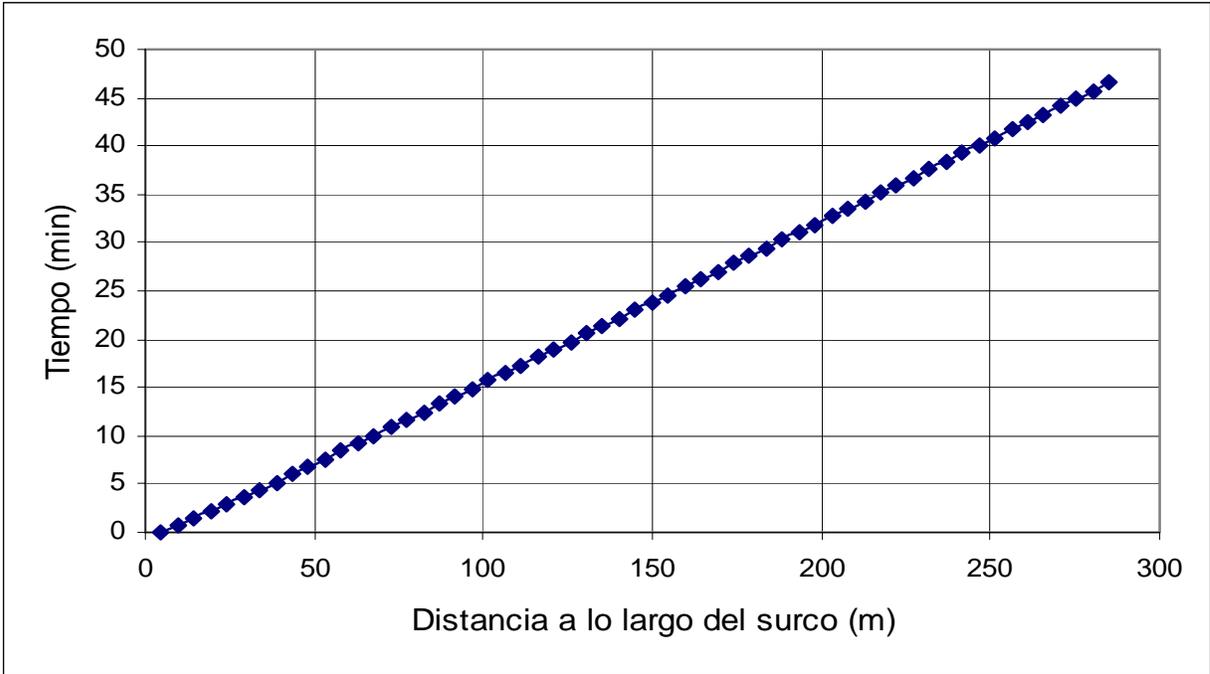


Figura C.3. Curva de avance del agua
RIG 3, cultivo zanahoria

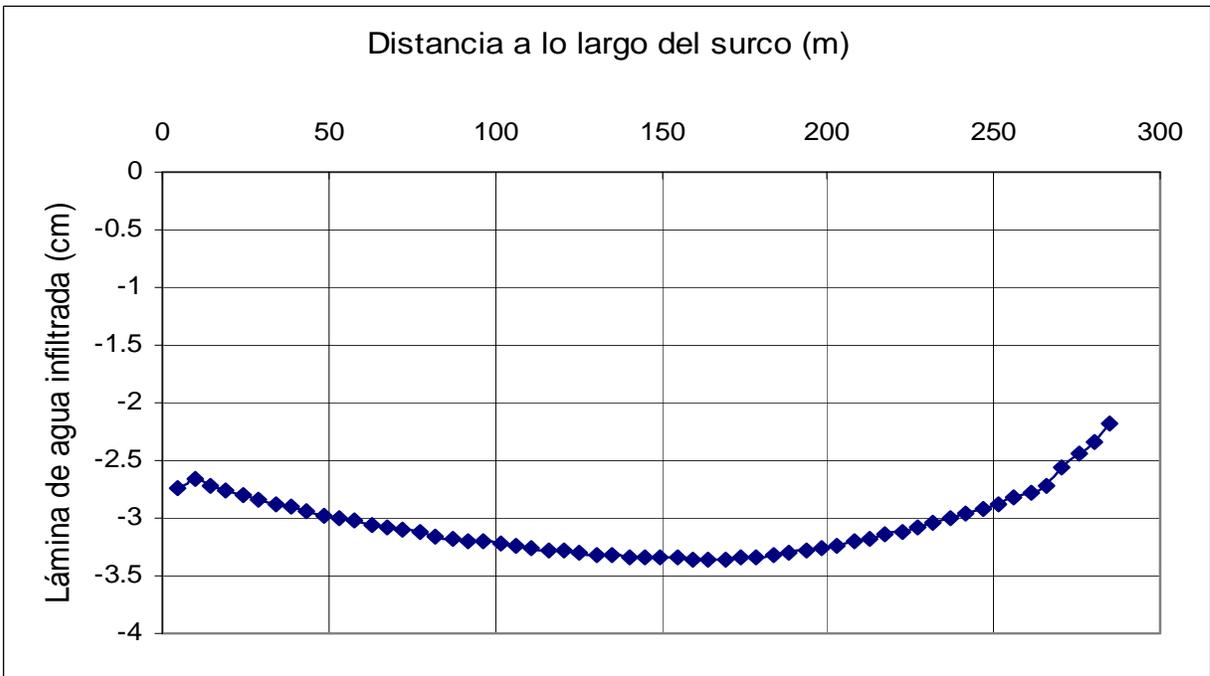


Figura C.4. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 3, cultivo zanahoria

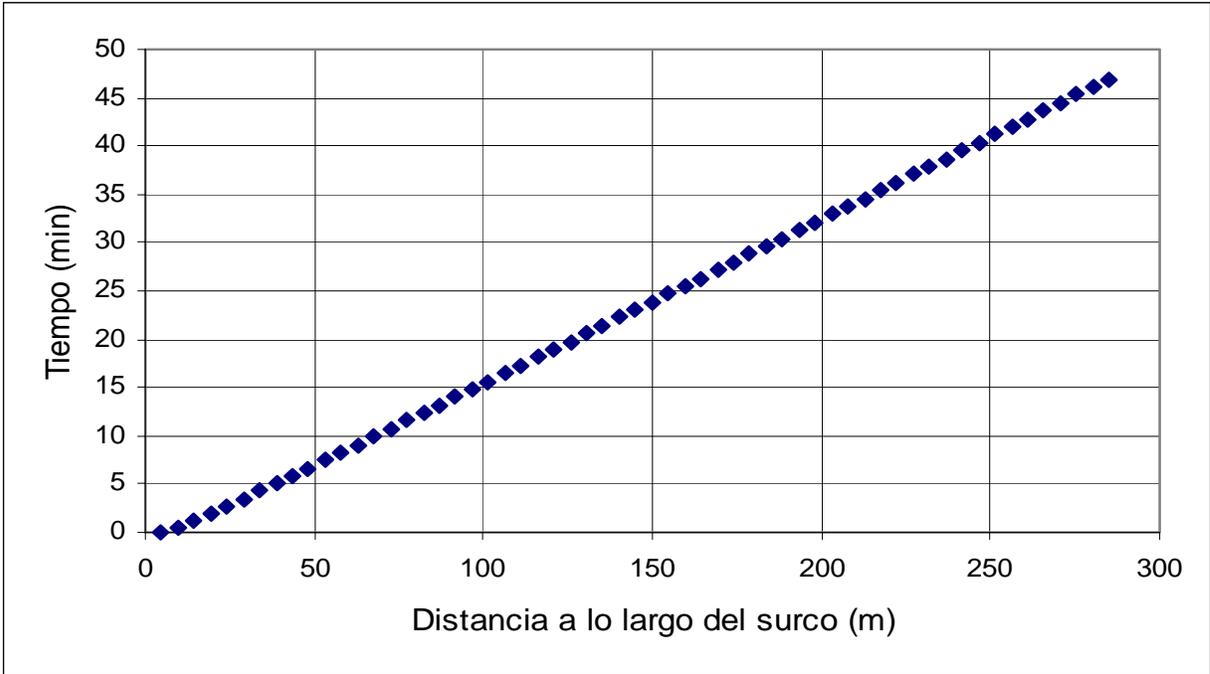


Figura C.5. Curva de avance del agua
RIG 4, cultivo zanahoria

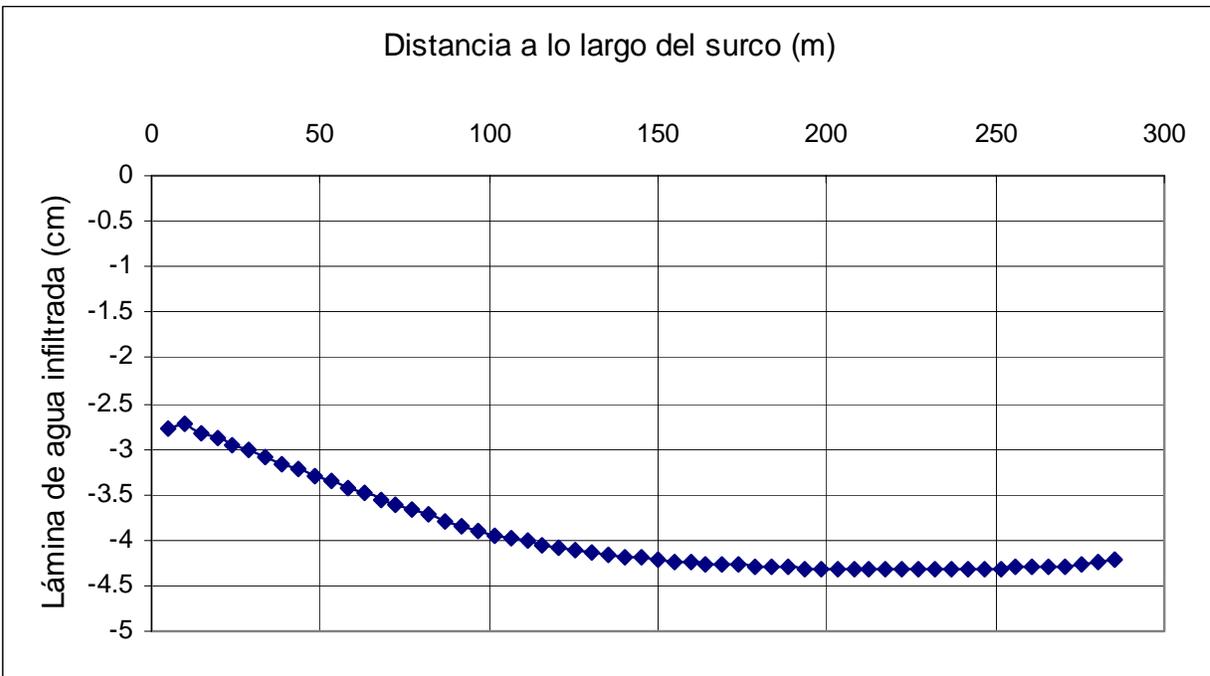


Figura C.6. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 4, cultivo zanahoria

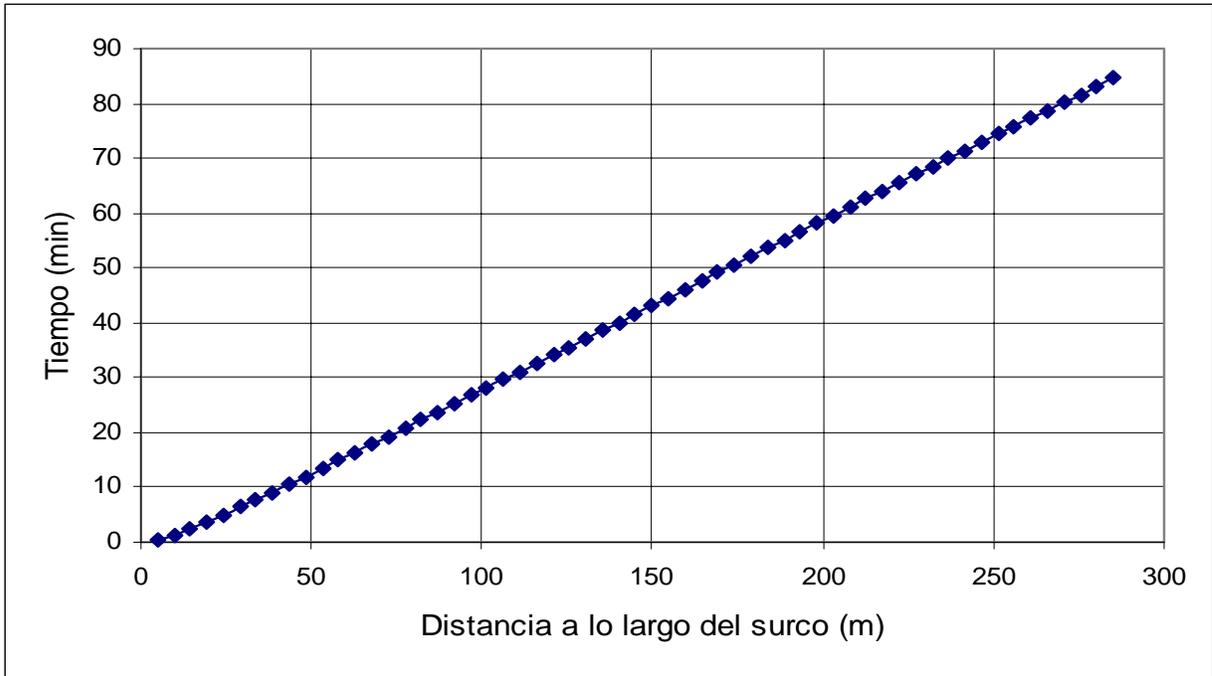


Figura C.7. Curva de avance del agua
RIG 5, cultivo zanahoria

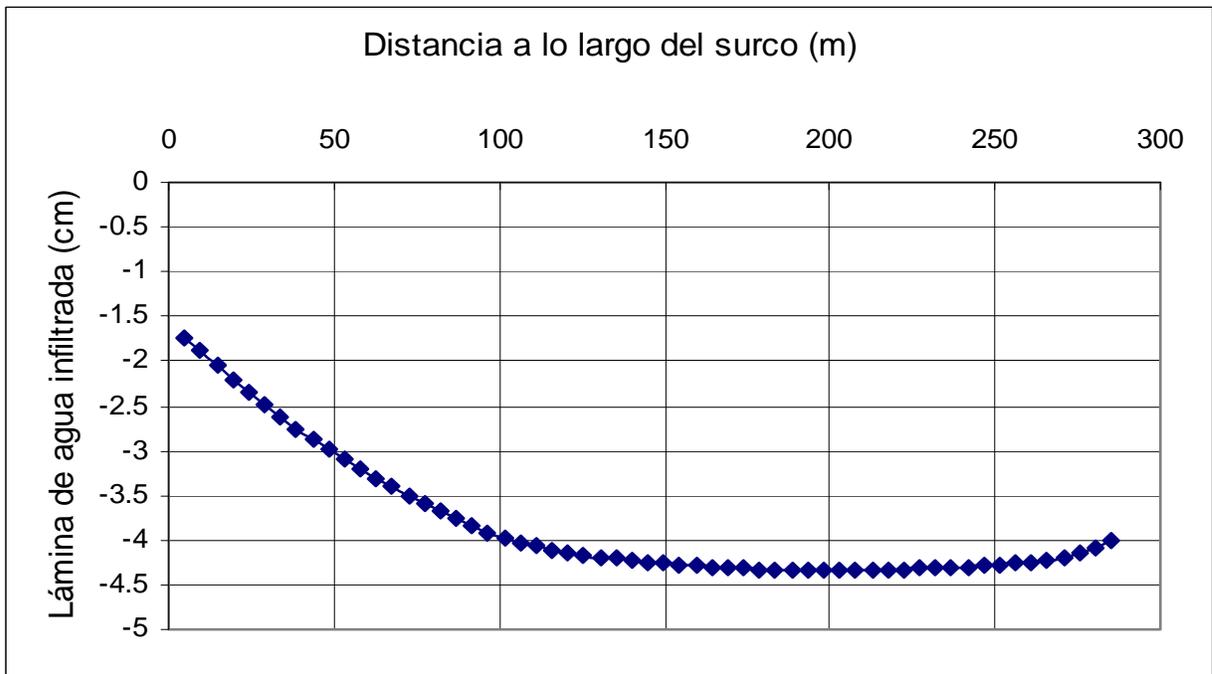


Figura C.8. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 5, cultivo zanahoria

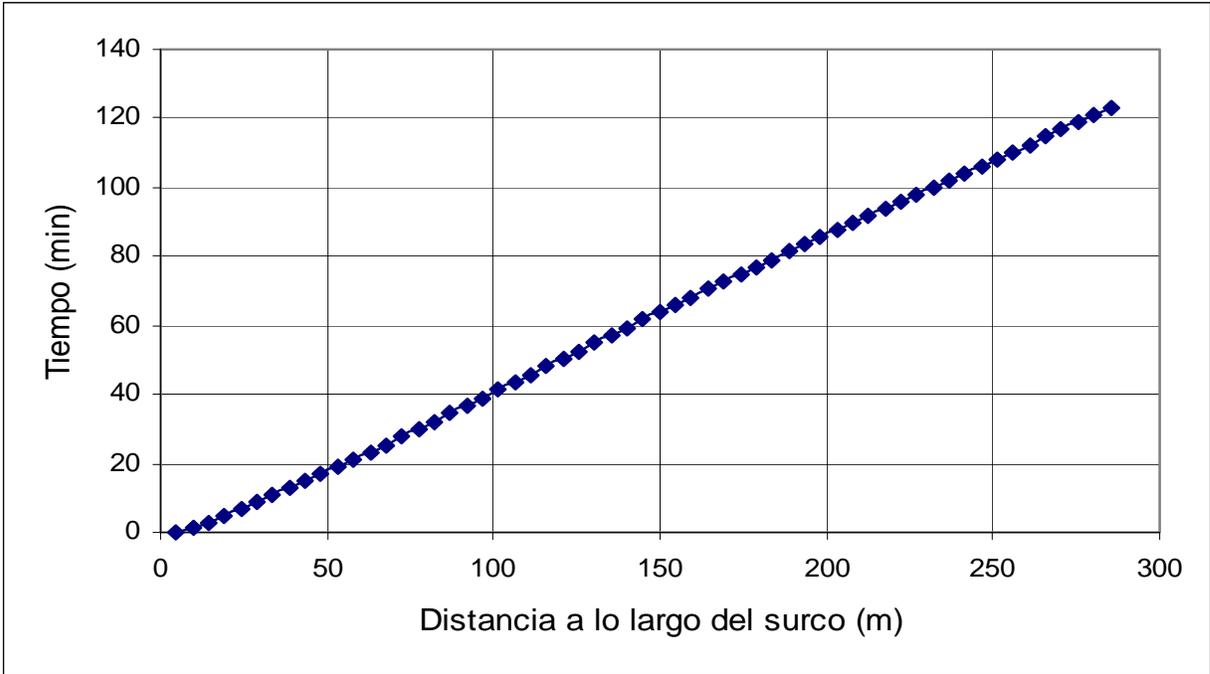


Figura C.9. Curva de avance del agua
RIG 6, cultivo zanahoria

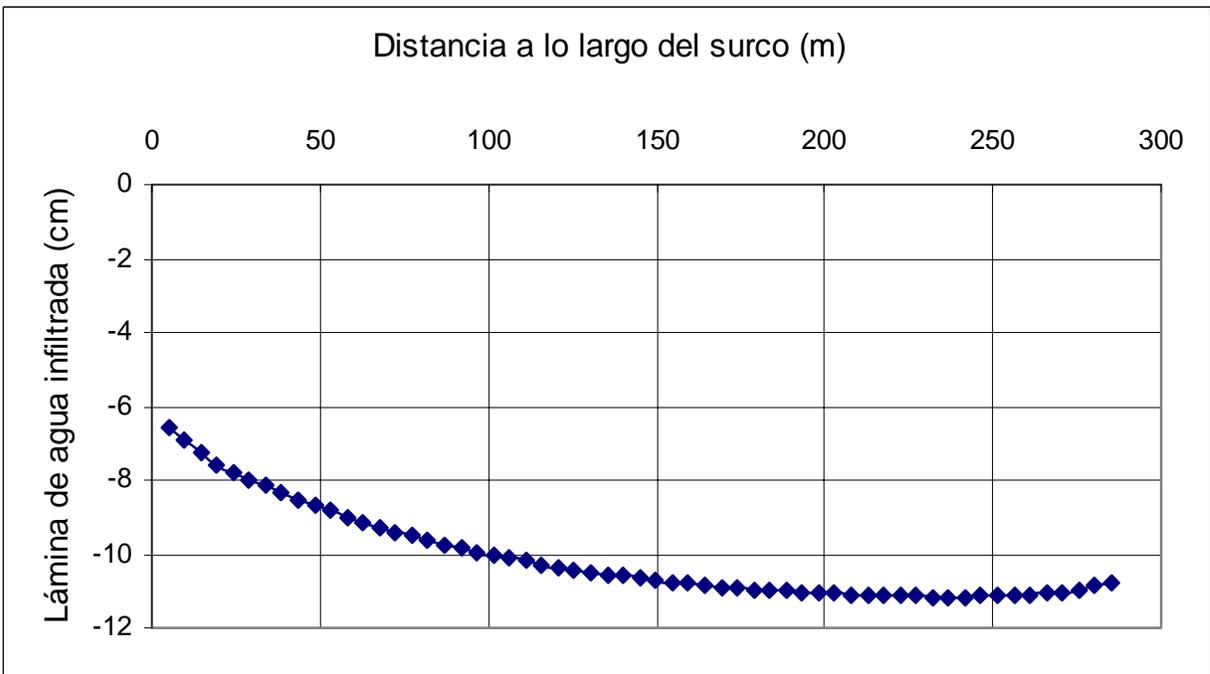


Figura C.10. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 6, cultivo zanahoria

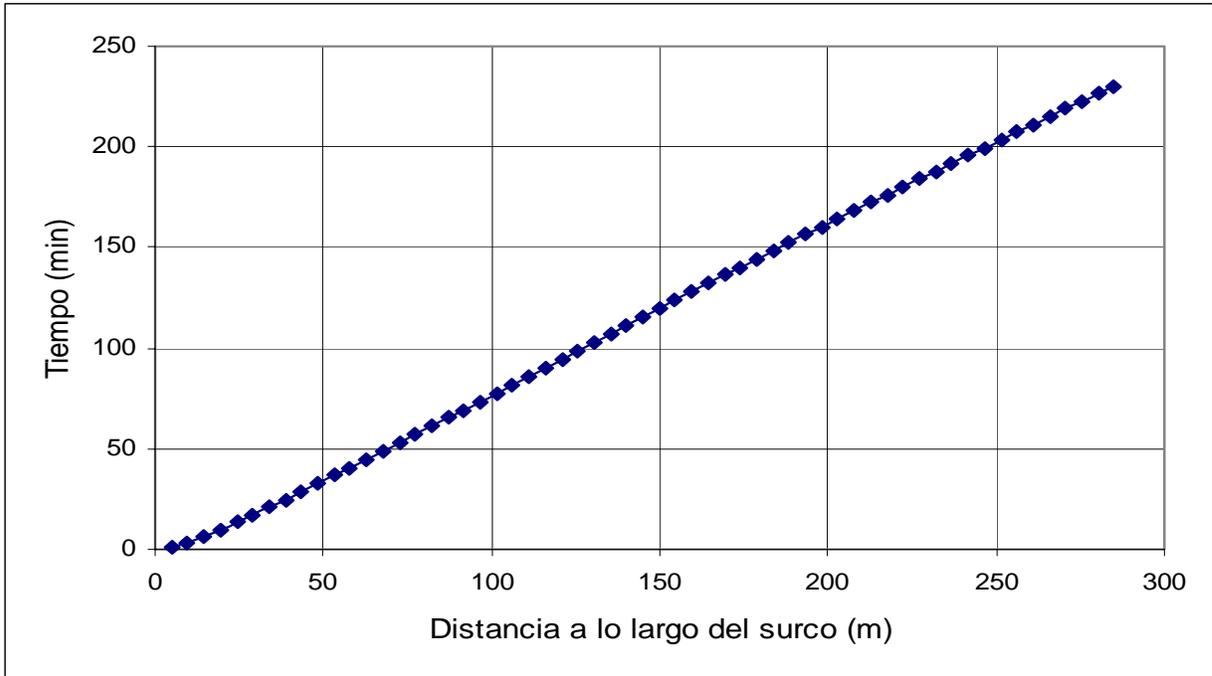


Figura C.11. Curva de avance del agua
RIG 7, cultivo zanahoria

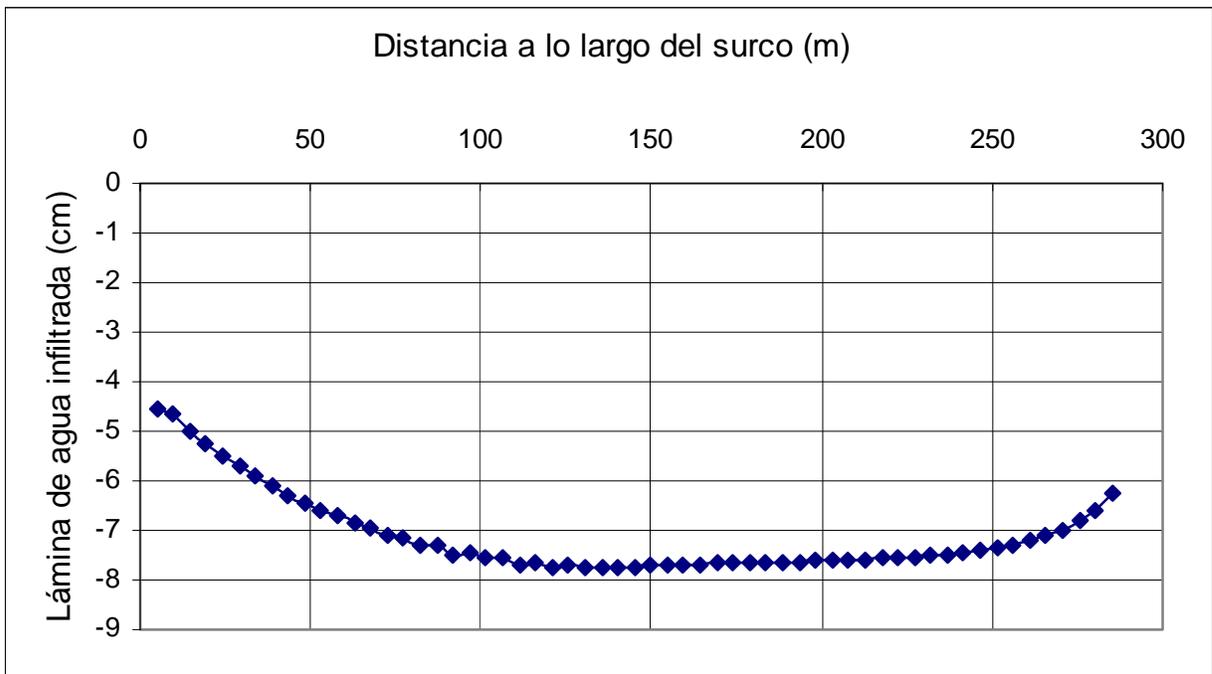


Figura C.12. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 7, cultivo zanahoria

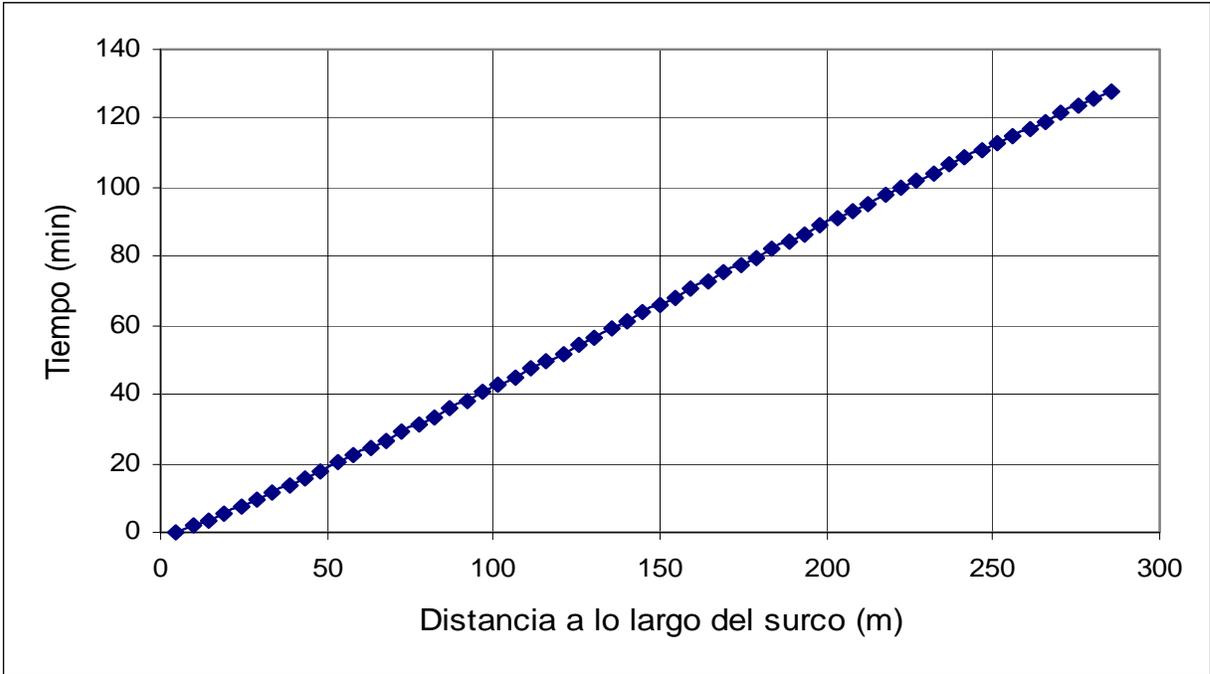


Figura C.13. Curva de avance del agua
RIG 9, cultivo zanahoria

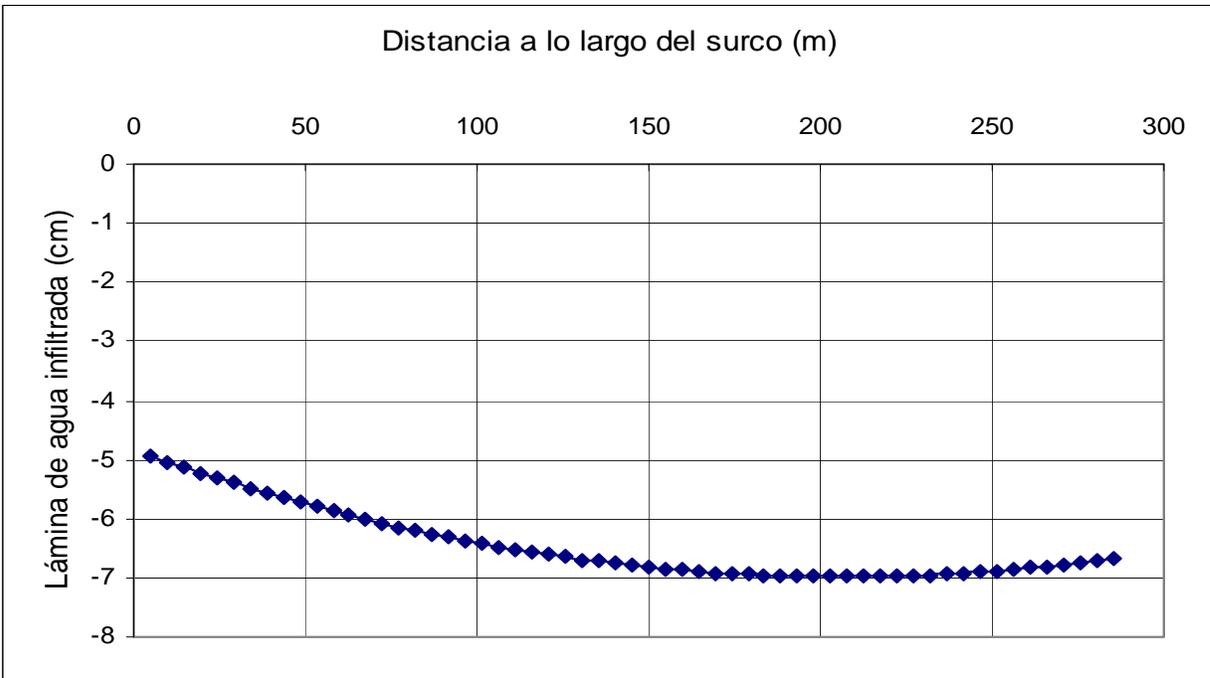


Figura C.14. Curva de lámina de agua infiltrada
RIG 9, cultivo zanahoria

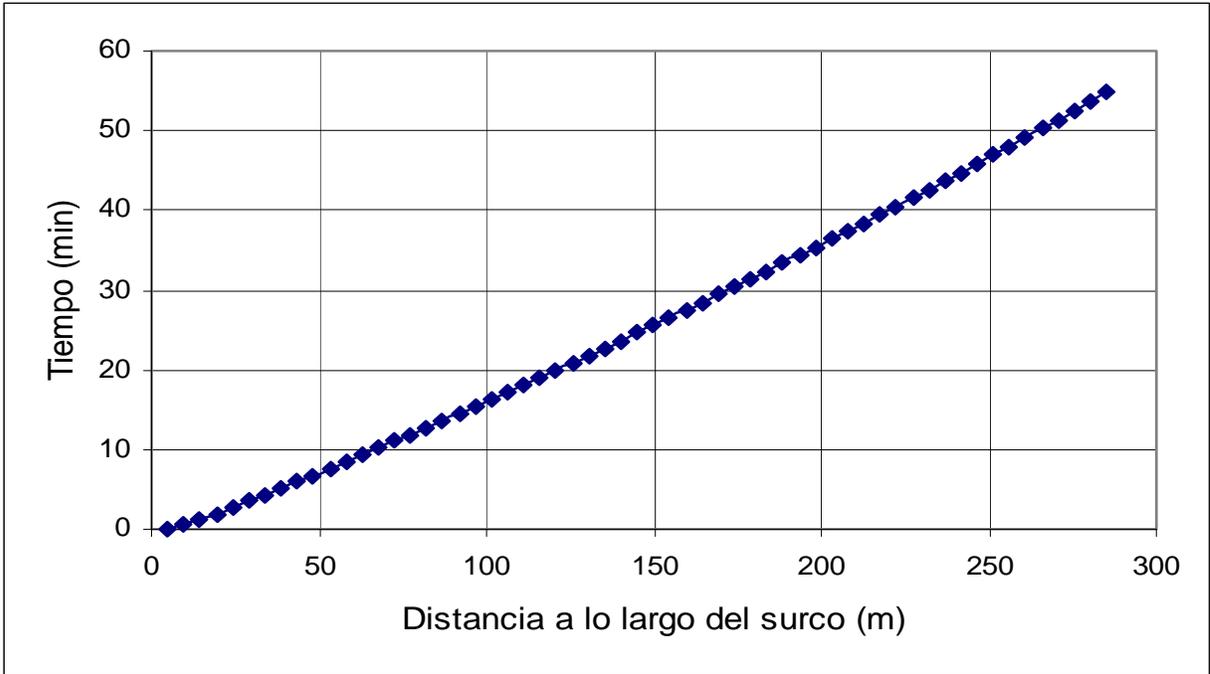


Figura C.15. Curva de avance del agua
RC 3, cultivo zanahoria

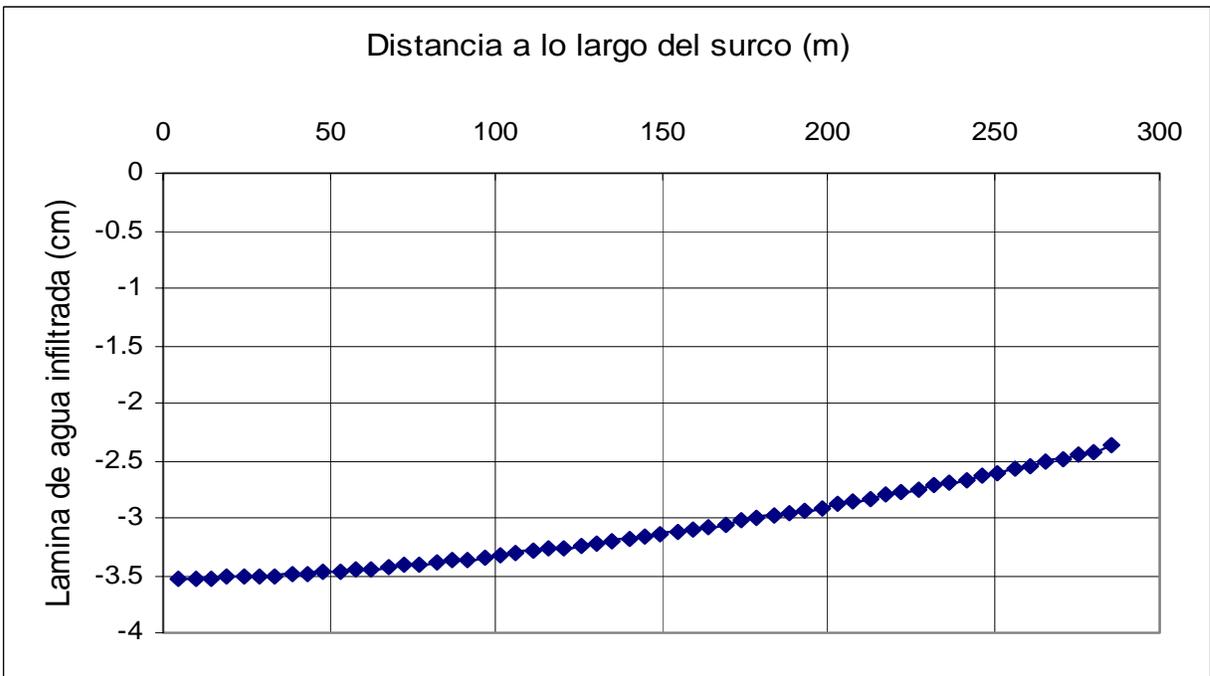


Figura C.16. Curva de lámina de agua infiltrada
RC 3, cultivo zanahoria

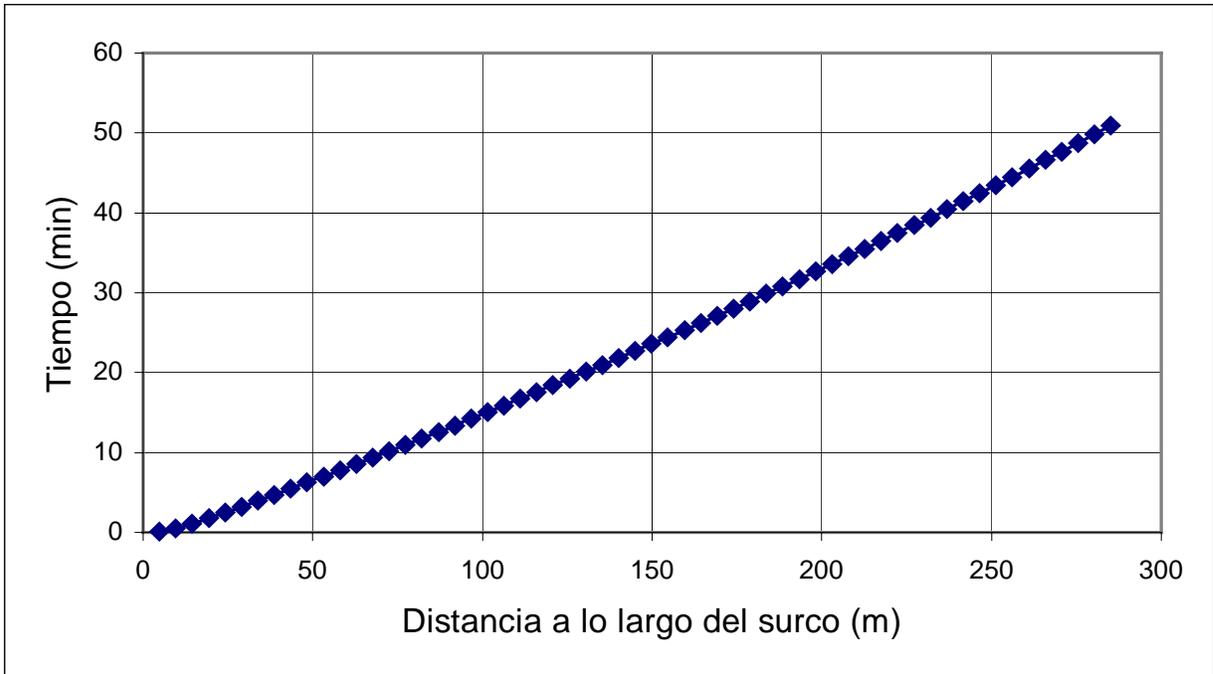


Figura C.17. Curva de avance del agua
RC 4, cultivo zanahoria

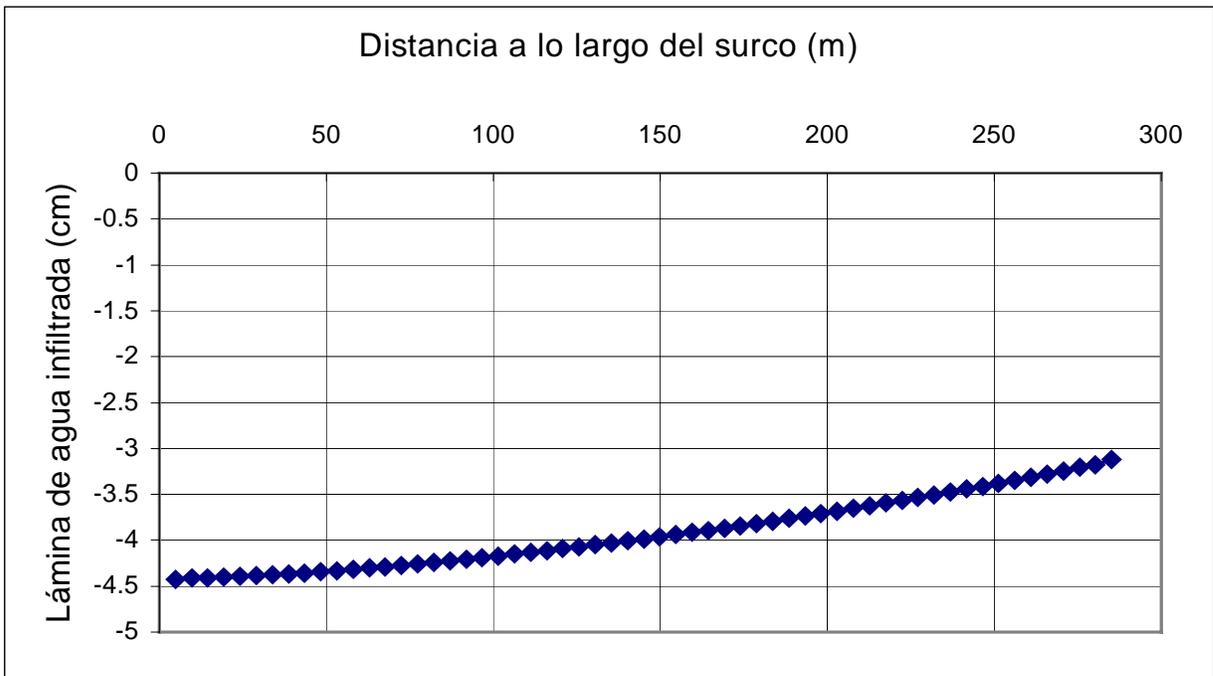


Figura C.18. Curva de lámina de agua infiltrada
RC 4, cultivo zanahoria

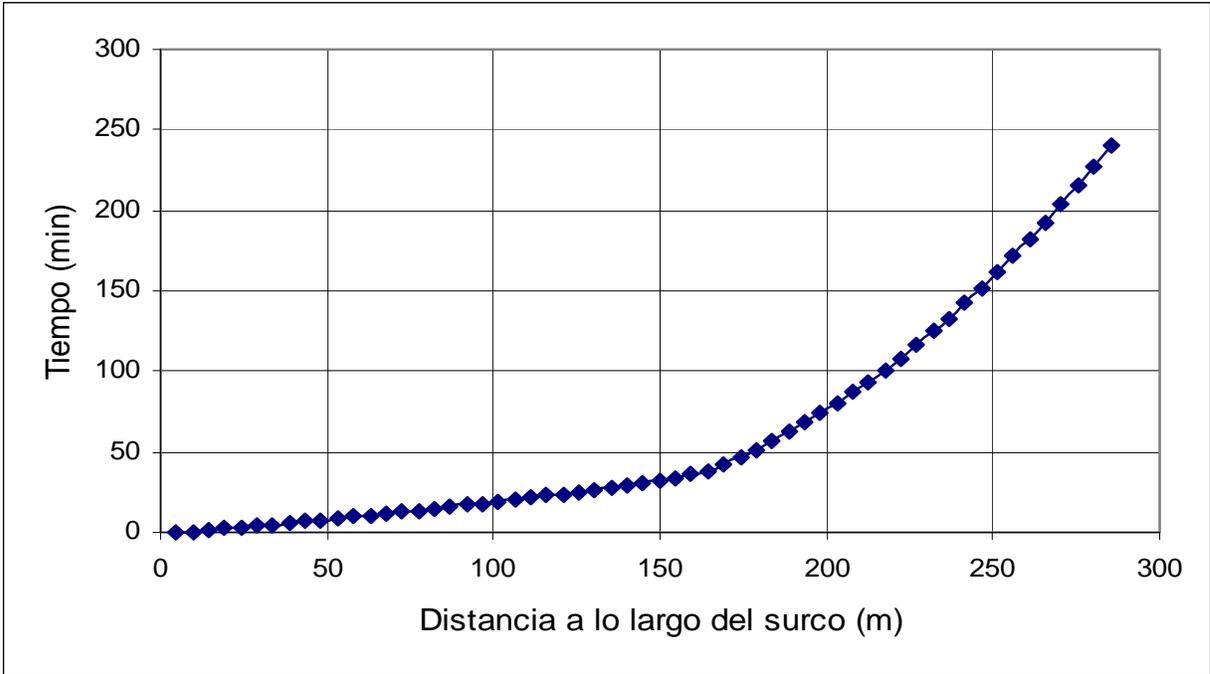


Figura C.19. Curva de avance del agua
RC 5, cultivo zanahoria

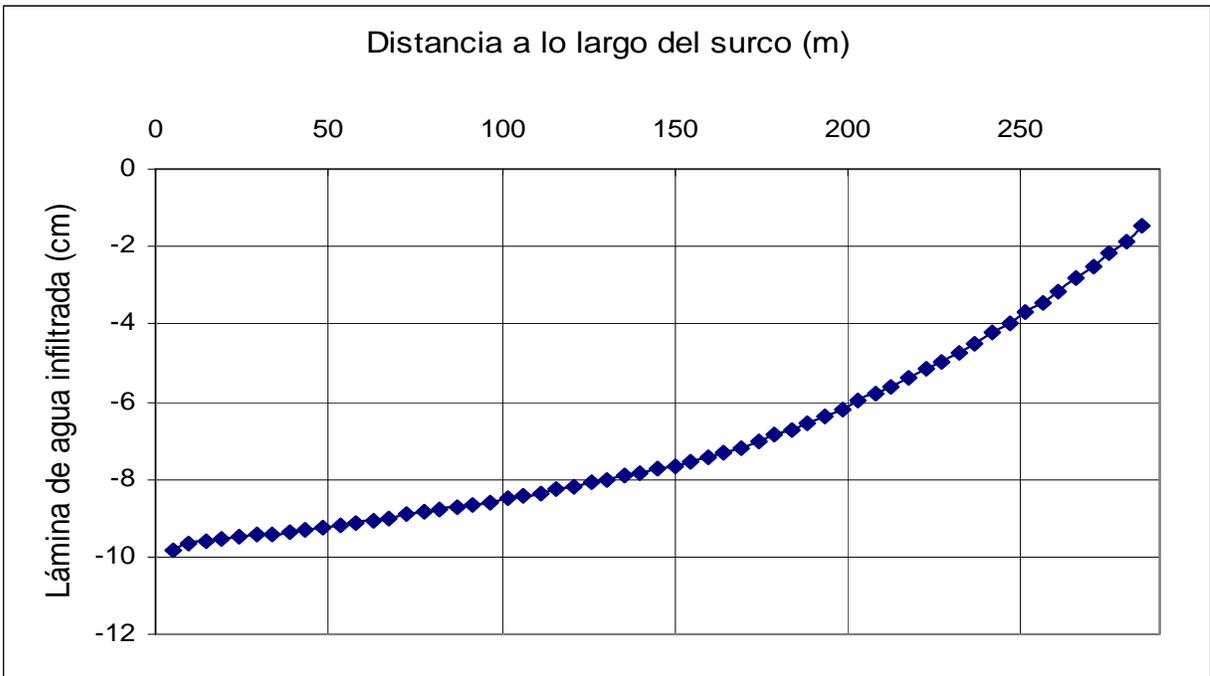


Figura C.20. Curva de lámina de agua infiltrada
RC 5, cultivo zanahoria

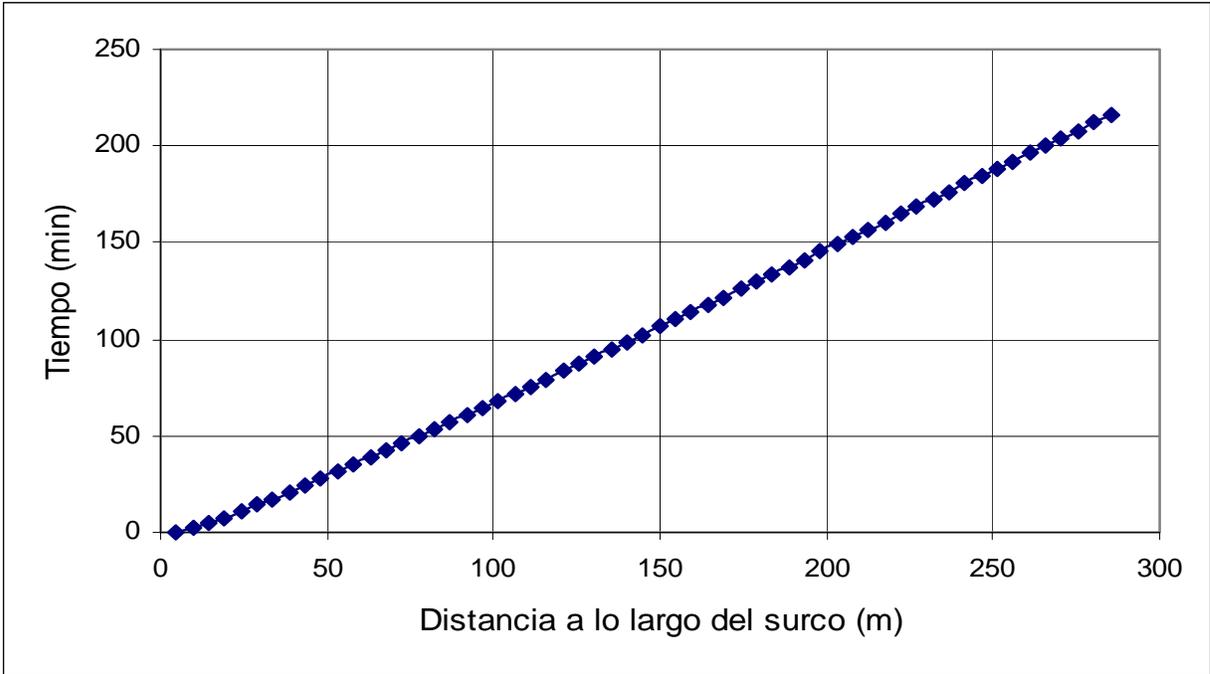


Figura C.21. Curva de avance del agua
RC 8, cultivo zanahoria

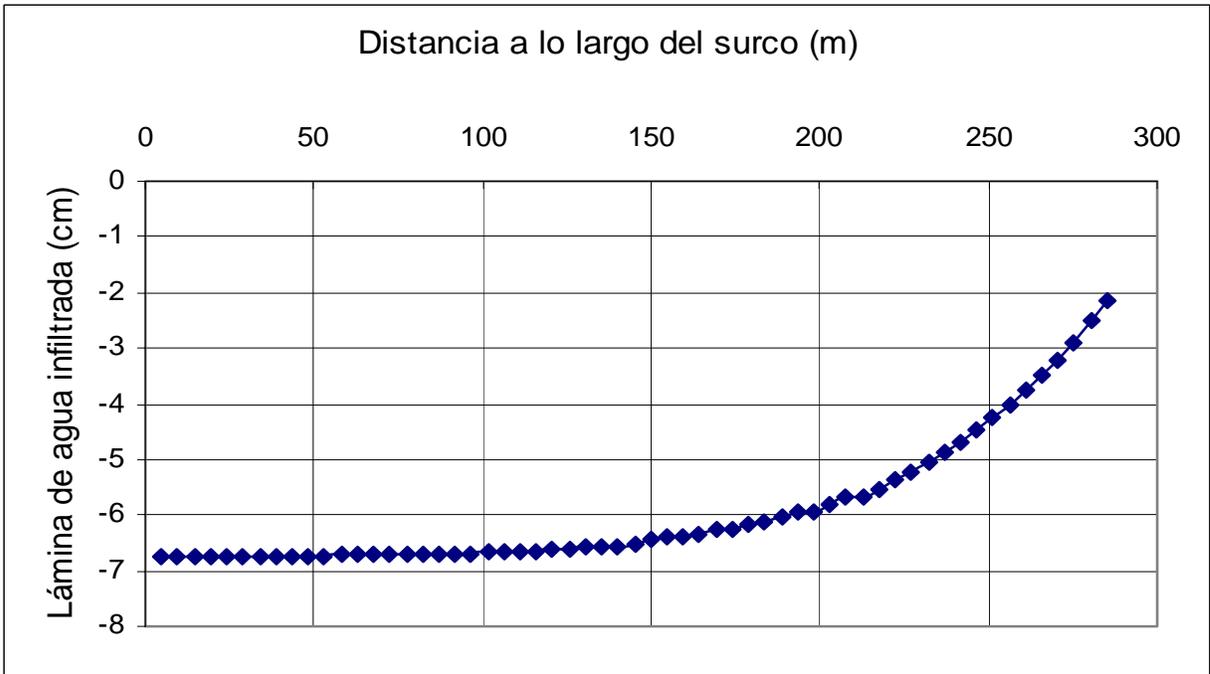


Figura C.22. Curva de lámina de agua infiltrada
RC 8, cultivo zanahoria

REFERENCIAS

- Alexander-Frezieres, J (2001). "Conservación de la infraestructura hidroagrícola en las unidades de riego en México". Memorias del XI Congreso Nacional de Irrigación. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación.
- Bautista, W. W., (1993). "Reability of optimized furrow infiltration parameters". Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol 119, No. 5.
- Burt, C. M., A. J. Clemens, T. S. Strelkoff, K. H. Solomon, R. D. Bliesner, L. A. Hardy, T. A. Howell and D. E. Eisenhauer (1997). "Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 123, No. 6, p. 431.
- Camacho, E., C. Pérez, J. Roldan, M. Alcaide. (1997). "Modelo de manejo y control en tiempo real del riego por surcos". Ingeniería del agua, vol. 4 No. 4. España.
- Chow, V. T. (1982). "Hidráulica de los canales abiertos", México, Editorial Diana.
- Chu, S. T. (1978). "Infiltration During and Unsteady Rain". Water Resources Research. Vol 14, No. 3.
- Cuenca, R. H. (1989). "Irrigation System Design". Prentice Hall.
- De Paco, L. J.L. (1992). "Fundamentos del cálculo hidráulico en los sistemas de riego y drenaje". CENTER, España.
- García, V. N. (1994). "Simulación numérica de flujo intermitente para diseño de riego parcelario por gravedad". Tesis de doctorado, DEPMI. UNAM.
- Gracia J. (2002). "Introducción al diseño de zonas de riego y drenaje". Instituto de ingeniería, UNAM.
- Jornada, La (2001). "Enfrenta México grave escasez de agua y contaminación de cuencas". 22 de marzo, día mundial del agua, P.42.
- Jensen, M E ed. (1980). "Design and Operation of Farm Irrigation Systems". American Society of Agricultural Engineers, p. 569.

-
-
- Márquez R. M. (1989). "Riego por surcos con flujo intermitente". Tesis de licenciatura. UANL.
- Martínez, A.P., Aldama, R.. (1990). "Dispositivos fluidicos para riego intermitente". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (CNA), Serie divulgación. México.
- Martínez-Elizondo, R (1980). "Metodologías para diseño de riego en surcos con reducción de gasto". Colegio de Postgraduados, Tesis de maestría.
- Poiree, M y Ollier, C. (1974). "El regadio". ETA, España.
- Sánchez, J. L., J. Gracia y J. Arjona (1978). "Calibración de un modelo matemático para determinar las necesidades de agua en un cultivo". Instituto de Ingeniería, UNAM:
- Sánchez, J. L. Y O. A. Fuentes (1992). "Posibilidad de Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos". Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- S.R.H., (1963). "Memorándum técnico No. 195", México.
- USDA (1986). "Surge Flow Irrigation Field Guide". SCS. USA.
- Vázquez, E. (1996). "Formulación de un criterio para incrementar la eficiencia del riego por surcos, incluyendo el método de corte posterior". Tesis de doctorado, DEPI, UNAM.
- Vázquez, E y J Gracia (1998). "Calibración de parámetros de infiltración y rugosidad con un modelo numérico para riego con surcos cerrados". Ingeniería del Agua, Vol 5, No 3, España.
- Vázquez, E., P. López y R. De la Cruz (2000). "Riego con incremento de gasto, opción para un riego eficiente por surcos cerrados". Memorias del XI Congreso Nacional de Irrigación.
- Vázquez, E (2001). "Diseño del riego con incremento de gasto en surcos cerrados" Ingeniería del Agua, Vol 8, No 3, España.
- Vázquez, E y J Gracia (2002). "Eficiencias de aplicación teóricas en los métodos de riego con incremento de gasto y recorte en surcos cerrados". XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba.
- Vázquez, E., P. López y B. Chagoza (2003). "Primera evaluación en campo del riego con incremento de gasto en surcos cerrados". Memorias del XI Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, Zac. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación.
- Walker, W. R., G. V. Skogerboe (1987). "Surface Irrigation". Prentice-Hall, p. 144.
- Wylie, E. B. Y V. L. Streeter (1978). "Fluid Transients". McGraw-Hill.
-
-