



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO EN SOCIOECONOMÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA
CÓMPUTO APLICADO

UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO Y
EVALUACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS

JUAN MANUEL CHAVARRIETA YÁÑEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

OCTUBRE DE 2011

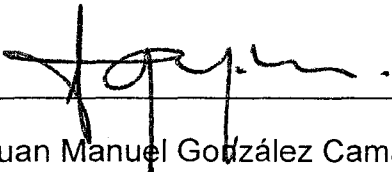
La presente tesis titulada “**Una herramienta de simulación para el diseño y evaluación del riego por surcos**” realizada por el alumno **Juan Manuel Chavarrieta Yáñez** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

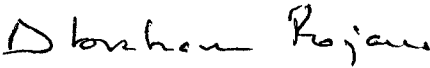
MAESTRO EN CIENCIAS

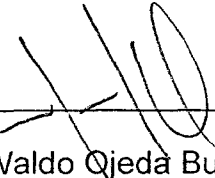
POSGRADO EN SOCIOECONOMIA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

CÓMPUTO APLICADO

CONSEJO PARTICULAR

Consejero: 
Dr. Juan Manuel Godzález Camacho

Asesor: 
Dr. Abraham Rojano Aguilar

Asesor: 
Dr. Waldo Qjeda Bustamante

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Septiembre de 2011.

UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS

Resumen

El riego por surcos es el método de riego más frecuente en las zonas de riego de México y del mundo. Sin embargo, sus eficiencias hidráulicas son bajas debido al bajo nivel de tecnología en la operación de estos sistemas. En este trabajo se propone una herramienta computacional versátil y de fácil utilización para modelar el funcionamiento hidráulico de un sistema de riego por surcos con base en un enfoque cinemático para seleccionar las variables de operación (tiempo y gasto de riego) que permitan mejorar las eficiencias hidráulicas de operación. El sistema denominado DRISUR ver 2.0 se desarrolló en la plataforma visual C++ Builder con una interfaz gráfica que facilita su utilización práctica bajo condiciones de campo. El sistema permite analizar diferentes modalidades de operación del riego por surcos (riego continuo y por intermitencia). El modelo funciona con datos experimentales del avance del agua en el surco, gasto de riego, condiciones geométricas del surco y lámina de riego promedio por aplicar. A partir de datos de avance el modelo estima los parámetros de la función infiltración de Green y Ampt, simula el funcionamiento hidráulico del riego por surcos y estima las eficiencias hidráulicas para diferentes condiciones de operación. Las eficiencias hidráulicas son la eficiencia de aplicación, el coeficiente de uniformidad y las pérdidas por percolación. El sistema computacional fue validado con datos experimentales del Campus Montecillo del Colegio de Posgraduados y sus resultados son consistentes.

Palabras claves: sistema de simulación, riego superficial, problema inverso, enfoque cinemático.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a:

A mis padres Miguel e Hilda, por su bendiciones y consejos.

A mi esposa Maricela y mis hijos Juan Manuel y María, la razón de mi vida.

A mis hermanos Miguel, Mariela, Isabel y Silvestre. Por el apoyo incondicional.

A mis cuñados y sobrinos, por su gran ayuda y cariño.

Especial agradecimiento a Dr. Samuel Pineda y Mc. Azucena Pineda por su gran apoyo y aliciente constante para la culminación del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Postgrado como Maestro en Ciencias.

Agradezco al Colegio de Postgraduados por la formación académica.

Al Dr. Juan Manuel González Camacho por el esfuerzo, dedicación, tiempo y su gran experiencia tuvo a su cargo la dirección del presente trabajo.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar y M.C. Bernardo Muñoz Hernández Por sus atinadas sugerencias para la revisión y corrección del documento.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Postgrado como Maestro en Ciencias.

Agradezco al Colegio de Postgraduados por la formación académica.

Al Dr. Juan Manuel González Camacho por el esfuerzo, dedicación, tiempo y su gran experiencia tuvo a su cargo la dirección del presente trabajo.

Al Dr. Abraham Rojano Aguilar y M.C. Bernardo Muñoz Hernández Por sus atinadas sugerencias para la revisión y corrección del documento.

A SIMULATION TOOL FOR DESIGNING AND EVALUATION OF FURROW IRRIGATION SYSTEMS

Abstract

Surface irrigation is the method the most common in irrigation zones of Mexico and of the world. However, its hydraulic efficiency is low, as a result, of the low technologies used in the operation of these systems. In this work, a friendly computational tool is proposed to modeling the hydraulic operation of the furrow irrigation systems based on a kinematic approach to select the operation variables (irrigation time and flow rate) to improve the hydraulic performance indicators. The system called DRISUR 2.0 was developed on a visual C++ Builder platform with a friendly graphic interface for easing its use in field conditions. The computer tool allows analyzing different operation conditions of furrow irrigation (constant or intermittent flow). The furrow irrigation model use as input variables, the advance data, the flow rate, the furrow geometry and the irrigation depth. The system estimates the parameters of the Green and Ampt infiltration law from advance data and simulates the hydraulic functioning of furrow irrigation to estimate the hydraulic efficiency under different operation conditions. The performance criteria are the application efficiency, the uniformity coefficient and runoff losses. The computer system was validated with experimental data from the Postgraduate College locate at Montecillo, Mexico with reliable results.

Key words: Computational tool, Irrigation surface design, Green and Ampt infiltration law, kinematic approach.

CONTENIDO

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
LISTA DE FIGURAS Y CUADROS	2
I. INTRODUCCIÓN.....	4
II. OBJETIVOS.....	5
III. REVISIÓN DE LITERATURA	6
3.1. Importancia de las tecnologías de Información en la agricultura	6
3.2. Sistemas de información.....	6
3.2.1 Enfoque sistémico.....	6
3.2.2 Ciclo de vida del software	7
3.2.3 Modelos de Simulación.....	10
3.3. Modelación del riego por surcos	12
3.3.1 Definición del riego por surcos.....	12
3.3.2 Operación del riego por surcos.....	13
3.3.3 Riego continuo	14
3.3.4 Infiltración del agua en el suelo.....	15
3.3.5 Representación matemática del riego por surcos.....	15
IV. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACION DRISUR 2.0....	19
4.1 Análisis de requerimientos	19
4.2 Descripción de la arquitectura del sistema.....	19
4.3 Implementación del sistema.....	23
V. PRUEBA Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA	37
5.1 Datos de validación.....	38
VI. CONCLUSIONES.....	40
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXO 1.....	44

LISTA DE FIGURAS Y CUADROS

<i>Figura 1. Etapas en la construcción de modelos de simulación. (Timsina, 2006).</i>	11
<i>Figura 2. Forma geométrica de los surcos.</i>	13
<i>Figura 3. Sección transversal de infiltración en un riego por surco.</i>	15
<i>Figura 4. Diagrama de flujo de los módulos del sistema.</i>	22
<i>Figura 5. Arquitectura de la herramienta de simulación DRISUR 2.0.</i>	21
<i>Figura 6. Pantalla de presentación del modelo de simulación.</i>	23
<i>Figura 7. Opciones del menú archivo del sistema de simulación.</i>	24
<i>Figura 8. Salida que muestra datos del desarrollador y modeladores.</i>	25
<i>Figura 9. Datos geométricos e hidráulicos y parámetros iniciales del suelo.</i>	26
<i>Figura 10. Grafica de los datos de avance observados.</i>	27
<i>Figura 11. Selección del método de estimación de infiltración.</i>	28
<i>Figura 12. Parámetros de infiltración utilizando la opción Tanteos.</i>	29
<i>Figura 13. Valores de los parámetros de infiltración, Rendón et al (1996).</i>	30
<i>Figura 14. Ajuste del avance con parámetros óptimos de infiltración.</i>	31
<i>Figura 15. Modalidades de simulación del riego por surcos.</i>	32
<i>Figura 16. Descripción de la simulación del riego por intermitencias.</i>	33
<i>Figura 17. Utilización de tiempos de ciclo variable en riego por intermitencias.</i>	34
<i>Figura 18. Gráfica de los resultados de la simulación del riego por surcos.</i>	35
<i>Figura 19. Reporte de salida del sistema de simulación DRISUR 2.0.</i>	36

<i>Cuadro 1. Datos del experimento realizado en la parcela experimental E6 del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. (Fuente: Muñoz-Hernández et al, 2006).....</i>	<i>22</i>
<i>Cuadro 2. Datos de salida de la primera ejecución.</i>	<i>38</i>
<i>Cuadro 3. Datos de salida de la segunda ejecución.</i>	<i>38</i>
<i>Cuadro 4. Datos de salida de la tercera ejecución.</i>	<i>39</i>

I. INTRODUCCIÓN

El uso de las tecnologías de información en la agricultura es cada vez más frecuente y relevante en diferentes campos de la actividad humana. Su utilización ha facilitado el manejo de grandes volúmenes de datos para mejorar la toma de decisiones. En el sector hidroagrícola se han desarrollado herramientas de optimización y métodos de captura, almacenamiento y análisis de datos, para mejorar la distribución y aplicación del agua a diferentes escalas de operación de una zona de riego. Arista *et al.* (2008) proponen una herramienta computacional para mejorar la distribución del agua de riego por gravedad a la escala de módulos y secciones de riego.

La necesidad de mejorar la eficiencia hidráulica de los sistemas de riego; en particular, la del riego por surcos es cada vez más, una condición necesaria para garantizar la viabilidad y sustentabilidad de las zonas de riego. Para mejorar la eficiencia de riego y reducir la demanda de agua se ha promovido la tecnificación integral de las áreas bajo riego. En México, el riego por gravedad es la técnica con mayor cobertura. En estas áreas se ha incentivado la instalación de tuberías multicompuertas para mejorar la aplicación del riego a nivel parcelario. Esto, aunado a una buena nivelación de los terrenos, representa una opción viable para mejorar la eficiencia del uso del agua (Muñoz-Hernández, 1998).

Diferentes estrategias de operación permiten mejorar las eficiencias de aplicación y de uniformidad; tales como: reducción del gasto, cierre del surco, reutilización del agua y riego por intermitencia. Igualmente, el desarrollo de herramientas computacionales ha facilitado la aplicación de métodos y procedimientos para diseñar, evaluar y mejorar el funcionamiento hidráulico de estos sistemas de riego. Los cuales una vez calibrados permiten comparar múltiples alternativas de manejo del riego.

Para contribuir con este propósito en este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación para el diseño y evaluación del riego por surcos basado en el modelo desarrollado por Muñoz-Hernández (1998) el cual consiste en un enfoque cinemático para modelar el flujo de agua superficial acoplado a un modelo de infiltración de Green y Ampt. Este último estimado a partir de datos experimentales del avance del agua en la superficie, mediante la solución del problema inverso avance-infiltración (González-Camacho *et al.* 2006).

II. OBJETIVOS

- 2.1. Desarrollar una herramienta de simulación con una interfaz gráfica para el diseño y evaluación de riego por surcos, con base en un enfoque de modelación cinemático para representar el flujo superficial en un riego por surcos acoplado a un modelo de infiltración de Green y Ampt para representar el flujo subterráneo, desarrollado por Muñoz-Hernández (1998).
- 2.2. Utilizar la plataforma de desarrollo visual C++ Builder 5.0 para crear una herramienta amigable y de fácil utilización por parte de los técnicos de campo y usuarios finales.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Importancia de las tecnologías de información en la agricultura

Los Sistemas de Información (SI) y las Tecnologías de Información (TI) son herramientas esenciales para incrementar la productividad y competitividad de las empresas agrícolas. Las TI se aplican a tareas que permiten monitorear y mejorar los procesos de manejo de información y toma de decisiones que se realizan en los sistemas de producción agrícola; tales como la programación de superficies a sembrar, la distribución de volúmenes de agua de riego, la evaluación de la productividad de los trabajadores, la comercialización de los productos. De esta manera, la empresa agrícola puede administrar de manera más eficiente sus recursos. La tecnología informática ha sido usada para mejorar la entrega del agua a los usuarios de riego. En México se han desarrollado sistemas informáticos para mejorar la distribución eficiente del agua en distritos de riego, como el sistema SPRITER (Ojeda et al., 2007).

La utilización de SI y TI adecuados a las necesidades y realidades de una empresa agrícola permite mejorar la toma de decisiones; para esto es vital la correcta implementación y aplicación de los SI y TI (Timsina, 2006).

3.2. Sistemas de información

3.2.1 Enfoque sistémico

El enfoque sistémico consiste en comprender la empresa como un sistema que se interrelaciona con su entorno en forma dinámica en el cual se distinguen cinco subsistemas que son: proceso, estructura, recursos, personas y conocimientos, estos subsistemas a su vez se interrelacionan dinámicamente (Piattini, 2007).

La teoría de sistemas se refiere al uso de herramientas computacionales e información. La perspectiva orientada a sistemas se ocupa de los aspectos comunicativos, culturales, sociológicos y psicológicos de una organización social. La investigación, la planificación y la toma de decisiones exigen información precisa, oportuna, completa, coherente y adaptada a las necesidades específicas de cada usuario y de cada circunstancia. La función básica de una computadora es la ejecución de un programa constituido por un conjunto de instrucciones almacenadas en memoria (Date, 2001).

3.2.2 Ciclo de vida del software

El método para desarrollar sistemas denominado “ciclo de vida” es el conjunto de actividades que los analistas, diseñadores y usuarios realizan para desarrollar e implantar un sistema de información. Este método consta de las siguientes etapas (Sommerville, 1998):

1) *Investigación preliminar.* La solicitud para plantear la necesidad de un sistema de información puede originarse por una persona. Esta etapa tiene tres partes: i) Aclaración de la solicitud. Antes de considerar cualquier investigación de sistemas, la solicitud de proyecto debe examinarse para determinar con precisión lo que el solicitante desea; muchas solicitudes provienen de empleados y usuarios. ii) Estudio de factibilidad. Un aspecto importante es determinar la factibilidad del sistema solicitado. La factibilidad técnica, evalúa si el proyecto puede desarrollarse con el software y personal o si es necesario incorporar nuevas tecnologías. La factibilidad económica, evalúa si los costos se justifican con respecto a los beneficios esperados. La factibilidad operacional, investiga si el sistema será utilizado, si los usuarios finales utilizarán el sistema, como para obtener beneficios; iii) aprobación de la solicitud. Los proyectos que son deseables y factibles deben incorporarse en los planes de desarrollo de una empresa de acuerdo a las prioridades establecidas por la empresa. Después de aprobar la solicitud de un proyecto se estima su costo, el tiempo necesario para terminarlo y las necesidades de personal.

2) *Determinación de los requerimientos del sistema.* Los analistas, al trabajar con los empleados y administradores, deben estudiar los procesos de una empresa para dar respuesta a ciertas preguntas claves. El analista sintetiza los detalles relacionados con los procesos de la empresa para identificar sus necesidades de proceso de información. Para ello revisa los manuales y reportes, observa las condiciones reales de las actividades del trabajo, con el objeto de comprender el proceso en su totalidad. Lo anterior facilita al analista la identificación de las características que debe tener el nuevo sistema.

3) *Diseño del sistema. (Diseño lógico).* El diseño de un sistema de información debe dar respuesta a los requerimientos identificados durante la fase de análisis. Los diseñadores elaboran un esquema de los formatos de salida del sistema; se realiza en papel o en una terminal, utilizando herramientas automatizadas disponibles para el desarrollo de sistemas. Además, se indican los datos de entrada, datos calculados y los que deben almacenarse. Los diseñadores seleccionan las estructuras de archivo y los dispositivos de almacenamiento. Los procedimientos se describen indicando cómo procesar los datos y producir los reportes de salida. Los documentos que contienen las especificaciones de diseño se representan mediante diagramas, tablas y símbolos especiales. La información detallada del diseño se proporciona al equipo de programación para comenzar la fase de desarrollo de software. Los diseñadores son responsables de dar a los programadores las especificaciones de software completas y claramente descritas.

4) *Desarrollo de software (diseño físico).* Los responsables del desarrollo del software pueden instalar software comprado a terceros o elaborar programas diseñados a la medida del solicitante. La elección depende del costo de cada alternativa, del tiempo disponible para escribir el software y de la disponibilidad de los programadores. Los programadores son responsables de la documentación de los programas y de explicar su codificación, esta documentación es esencial para probar el programa y hacer el mantenimiento.

5) *Prueba de sistemas*. Durante esta fase, el sistema se emplea de manera experimental para asegurar que el software no tenga fallas, es decir, que funciona de acuerdo con las especificaciones y en la forma en que los usuarios esperan que lo haga. Se utilizan, como entradas, conjuntos de datos de prueba para su procesamiento y después se examinan los resultados. Diferentes usuarios utilizan el sistema, para detectar fallas de utilización no previstas, antes de que la organización implante el sistema. Con frecuencia, las pruebas son conducidas por personas ajenas al grupo que desarrolló los programas originales; para asegurarse de que las pruebas sean completas e imparciales y, por otra, que el software sea más confiable.

6) *Implantación y evaluación*. La implantación es el proceso de verificar e instalar nuevo equipo, entrenar a los usuarios, instalar la aplicación y construir todos los archivos de datos necesarios para utilizarla. Los encargados de desarrollar el sistema procuran que el uso inicial del sistema se encuentre libre de errores. Los sistemas de información deben mantenerse actualizados, la implantación es un proceso de constante evolución. La evaluación de un sistema se lleva a cabo para identificar puntos débiles y fuertes. La evaluación ocurre a lo largo de cualquiera de las siguientes etapas: Evaluación operacional, que es la valoración de la forma en que funciona el sistema, incluyendo su facilidad de uso, tiempo de respuesta, lo adecuado de los formatos de información, confiabilidad global y nivel de utilización. Impacto organizacional que es la identificación y medición de los beneficios para la organización en áreas como finanzas (costos, ingresos y ganancias), eficiencia operacional e impacto competitivo. Opinión de los administradores permite evaluar las actitudes de directivos y administradores dentro de la organización así como de los usuarios finales. Desempeño del desarrollo, la evaluación del proceso de desarrollo de acuerdo con criterios tales como tiempo y esfuerzo de desarrollo, concuerdan con presupuestos y estándares, y otros criterios de administración de proyectos (Sommerville, 1998).

3.2.3 Modelos de Simulación

Un modelo de simulación es un modelo computarizado de un sistema o proceso, que nos permite entender el comportamiento de un sistema del mundo real y evaluar varias estrategias de operación del sistema. Los modelos matemáticos nos permiten explorar un gran número de fenómenos que se encuentran en la realidad, los cuales pueden resultar extremadamente complejos para su análisis, por lo que es conveniente resolverlos mediante el uso de métodos de simulación, debido a la gran flexibilidad que estos ofrecen. Mediante las herramientas de simulación es posible hallar soluciones aproximadas de ciertos problemas que son imposibles de resolver analíticamente. Obtener datos sobre el comportamiento de un sistema durante un lapso muy grande de tiempo, consumiéndose en efectuar la simulación una pequeña cantidad de tiempo (García, 2006).

Tipos de modelos. El desarrollo de un modelo empieza con la elaboración de un diagrama de representación. Para ello, se escriben las ecuaciones y se especifican las cantidades numéricas. Después, el modelo es simulado para obtener resultados. Por último, los resultados de la simulación pueden ser examinados con instrumentos de análisis para describir el comportamiento dinámico de las variables del modelo. La construcción de un modelo sigue un proceso de crear, probar, y volver a crear, iterando hasta que el modelo cumple los requisitos propuestos inicialmente. La depuración consiste en lograr que un modelo se comporte como deseamos (Keye, 1993).

Desde hace varias décadas, los modelos matemáticos dinámicos de simulación han permitido avanzar en el desarrollo de las ciencias en general y de las agronómicas, en particular. Debido a la integración de múltiples factores y variables, la síntesis de conocimiento que sus relaciones matemáticas representan, la objetividad de sus resultados, y la posibilidad de poder procesar e interpretar gran cantidad de información a diferentes escalas espacio temporales, emitiendo resultados en corto tiempo y a bajo costo, los

modelos cuantitativos son en la actualidad una herramienta imprescindible en la gestión de sistemas complejos (Bastiaansen, 2006).

El uso de modelos en la agricultura, ha posibilitado una mejor comprensión del funcionamiento de los agro-ecosistemas, lo que se ha traducido en un mejor manejo de éstos en pos de lograr un objetivo dado. Por ejemplo mejorar la disponibilidad de agua para un cultivo con miras a obtener un cierto nivel de rendimiento. Al respecto, es sin duda una condición necesaria conocer bien el funcionamiento de un sistema, si se quiere manejarlo adecuadamente (Timsina, 2006).

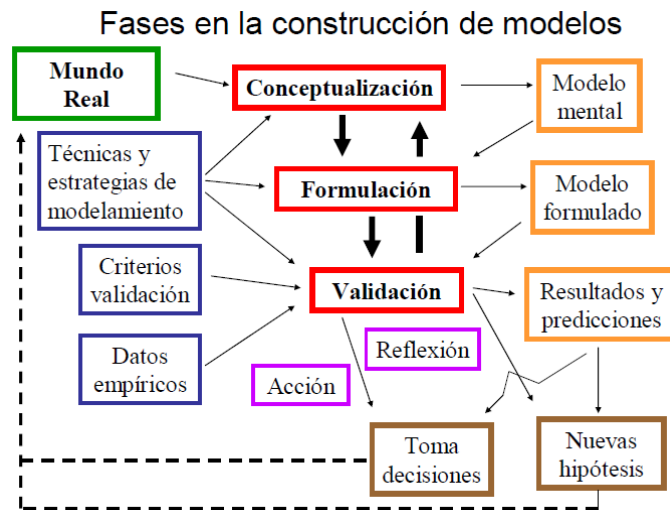


Figura 1. Etapas en la construcción de modelos de simulación. (Timsina, 2006).

Por otra parte Holtz (1997) afirma que es necesario enfatizar el carácter científico y de ingeniería que su uso implica. Este hecho es relevante a la hora de analizar la confiabilidad de sus resultados. El hecho que estos resultados sean cuantitativos, permite hacer una comparación con datos observados, lo cual no es posible de hacer correctamente cuando se emplean métodos cualitativos, donde no existe la posibilidad de una medición objetiva de la realidad. En la actualidad, dado el necesario ahorro de tiempo y recursos

financieros, la utilización de modelos cuantitativos, en investigación, educación y producción está cada vez más **extendida.**

Ante cambios de tal magnitud, nos cuestionamos sobre cuál puede ser la respuesta más adecuada a adoptar por parte de las organizaciones. Dada la complejidad de la decisión y la necesidad de nuevas visiones empresariales que aseguren la transformación de las organizaciones en nuevas entidades adecuadas a las exigencias actuales, abogamos por la utilización de cuantos recursos de ayuda en la toma de decisiones sean necesarios, mediante la utilización de ayuda externa y herramientas metodológicas de análisis e informáticas, tales como sistemas de información aplicados (Robinet, 1982).

Tomando como base la perspectiva multimetodológica, Rincón (1985) considera indispensable para abarcar todas las facetas que contemplan la realidad empresarial, la utilización de recursos metodológicos procedentes de disciplinas con base complementarias, justificando la combinación de metodologías amparadas bajo paradigmas distintos en orden a la obtención de una visión multidisciplinar de las organizaciones.

Masuda (1980) resalta que la información, elemento clave para obtener resultados fiables, lleva a considerar este elemento en toda su magnitud, analizándolo desde distintas concepciones y definiciones teóricas para continuar comentando las actuales posibilidades de tratamiento de la información, no solo desde el punto de vista de su adquisición, conservación y mantenimiento, sino también de su distribución a todo lo largo y ancho de la organización, mediante el uso de herramientas informáticas, como lo es el presente trabajo de investigación.

3.3. Modelación del riego por surcos

La programación y distribución del agua de riego son actividades básicas para optimar la calidad y oportunidad del servicio de riego, para lo cual se debe integrar diariamente las demandas diarias de riego desde una toma parcelaria hasta una red de distribución. Este proceso de integración es de naturaleza

recursiva, ya que la demanda de riego en un punto de entrega en el canal principal depende de la integración de las demandas en los puntos de entrega de los canales secundarios aguas abajo de éste y así, sucesivamente, hasta llegar a los puntos de entrega en la parcela, que son los puntos terminales de una red arborescente de distribución del agua de riego Arista et al. (2009).

3.3.1 Definición del riego por surcos

El riego por surcos es el sistema más común en riego por gravedad, constituido por pequeños canales que se construyen a lo largo del terreno en el sentido de la pendiente principal. Conforme el agua circula una cantidad de esta se infiltra en el suelo vertical y lateralmente, el gasto y el tirante del perfil superficial se reduce paulatinamente a lo largo del surco Holtz (1997). El flujo es mantenido hasta que la lámina requerida por el cultivo se infiltra en todo lo largo del surco.

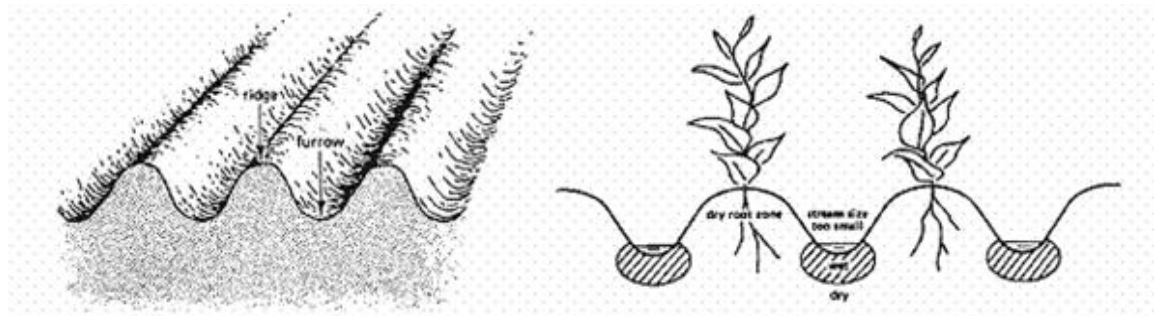


Figura 2. Forma geométrica de los surcos.

La infiltración se define como la cantidad de agua en movimiento que atraviesa verticalmente la superficie del suelo producto de la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares, ésta cantidad de agua quedará retenida en el suelo o alcanzará el nivel freático del acuífero, incrementando el volumen de éste.

3.3.2 Operación del riego por surcos

La operación de un sistema de riego por surcos consiste en determinar el tiempo de riego y gasto por aplicar para obtener una buena eficiencia de aplicación y una alta uniformidad. Los sistemas de riego por surco pueden

operarse por gasto continuo, gasto reducido, gasto intermitente o por pulsos y gasto interrumpido en el avance.

El riego por surco es una opción interesante para pequeños productores porque ataca a la vez dos problemas comunes en éste tipo de empresas: la subocupación y la falta de volúmenes de facturación. Además es un sistema atractivo porque requiere baja inversión inicial pero exige cierta habilidad por parte del regante para lograr una operación eficiente. En el riego por surcos el agua se mueve por gravedad, es decir el agua se desliza siguiendo la pendiente y no requiere de energía extra para darle movimiento. La calidad del riego depende en un principio de la sistematización del terreno y por eso es muy importante realizar un buen relevamiento planialtimétrico del lote a regar y un correcto diseño de los surcos especialmente en orientación y en longitud.

Un sistema de riego por surcos está compuesto básicamente por: una cañería de conducción (manga de polietileno, caño de PVC o de aluminio) que se ubica en la cabecera de los surcos. y boquillas, válvulas o ventanas para verter el agua en los surcos. Para lograr un riego eficiente se deben considerar: el caudal de entrada en la cabecera del surco y el tiempo de riego necesarios para que el agua llegue al final del surco en la cantidad deseada. Una forma de eficientizar este sistema es colocar una válvula pulsadora para que el agua aplicada en forma discontinua penetre en el suelo en forma mas eficiente Muñoz (1998).

3.3.3 Riego continuo

El riego continuo (RC) es el método de riego más común en las zonas de riego de México. Con este método el gasto de riego se mantiene constante durante la aplicación del agua, se pueden identificar cuatro fases de riego: la fase de avance es el periodo comprendido desde el inicio del riego, hasta el momento en que el frente alcanza el extremo. La fase de consumo también denominada recesión vertical es una fracción de tiempo pequeña que generalmente se desprecia, ocurre después del corte del gasto y la desaparición completa del

agua sobre la superficie en la entrada del surco. La fase de recesión o recesión horizontal comprende el período en el cual el agua superficial desaparece a lo largo de todo el surco.

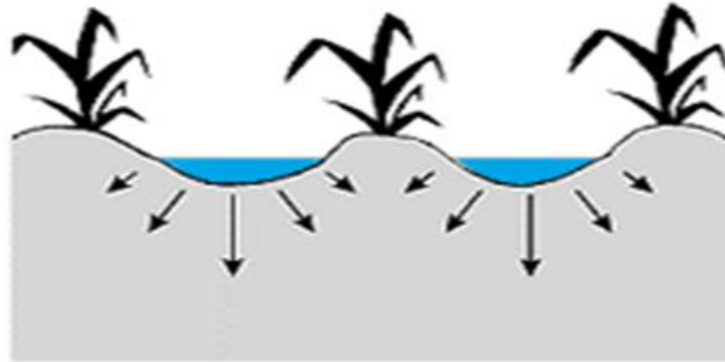


Figura 3. Sección transversal de infiltración en un riego por surco.

3.3.4 Infiltración del agua en el suelo

El método de Green-Ampt, extendido para su aplicación a fenómenos de lluvia natural por Chu (1978) es un método muy aplicado en hidrología para estimar la cantidad de agua que infiltra en el suelo y el exceso de agua que queda disponible en superficie para el fenómeno de escorrentía. Este método aporta sin embargo sólo información válida sobre el proceso superficial de infiltración (en la interface suelo-atmósfera), pero no sobre el de redistribución, movimiento del agua en el interior del suelo al cesar la infiltración. La extensión del método de Green-Ampt con redistribución de humedad (GAR) propuesta por Ogden y Saghafian (1997) basado en Smith (1993) plantea la posibilidad de simulación de procesos de infiltración en el suelo considerando múltiples estados de encharcamiento consecutivos correspondientes a diferentes periodos de lluvia.

3.3.5 Representación matemática del riego por surcos

El modelo cinemático se representa por la ecuación de continuidad y la ecuación dinámica simplificada para régimen uniforme, las cuales se expresan por (Walker y Humpherys, 1983; Izuno y Podmore, 1985).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$S_o = S_f \dots\dots\dots(2)$$

donde **Q** es el gasto del surco (L³ T⁻¹); **A** es el área de la sección transversal del surco (L²); **Z** es el volumen infiltrado (L³); **t** es el tiempo acumulado (T); $\tau = t - t_x$ es el tiempo de oportunidad (T); **x** es la distancia de avance desde el origen (L); **S_o** es la pendiente del fondo del surco (Adim); **S_f** es la pendiente de la línea de energía (Adim) y **t_x** es el tiempo que tarda el frente en alcanzar la abscisa x (T).

Las ecuaciones (1) y (2) se resuelven considerando la relación empírica entre el gasto y la sección transversal (3), cuyos parámetros son estimados mediante una regresión lineal a partir de la geometría del surco.

$$Q = \alpha A^m \dots\dots\dots(3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en (1), se realiza una integración numérica explícita para tiempos (dt) y distancias (dx), como sigue:

$$A_R^m + C_1 A_R + C_2 = 0 \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

$$C_1 = \frac{(1-\phi) dx}{\theta\alpha dt} \dots\dots\dots(5)$$

$$C_2 = -A_L^m - \frac{(1-\theta)}{\theta} (A_J^m - A_M^m) + \frac{\phi dx}{\theta\alpha dt} (A_L + Z_L - A_J - Z_J) + \frac{(1-\phi) dx}{\theta\alpha dt} (Z_R - A_M - Z_M) \quad (6)$$

Donde A_L , A_R , Z_L y Z_R expresan el área y la infiltración para el tiempo actual, (L) representa la frontera izquierda y (R) la frontera derecha de cada celda; A_J , A_M , Z_J , Z_M son el área y la infiltración del tiempo anterior (J) en la frontera izquierda y (M) la frontera derecha; θ es el coeficiente de ponderación del tiempo y ϕ del espacio.

El cálculo de aguas arriba hacia aguas abajo de A_R para cada celda en la ecuación (4), permite calcular la distancia del frente de avance, expresada por:

$$dx_{1..n} = \frac{\theta\alpha A_L^m dt}{\phi(A_L + Z_L)} \dots\dots\dots(7)$$

El volumen infiltrado, se estima diferenciando 3 zonas (seca, intermedia y húmeda). La zona seca se representa por la siguiente ecuación de Green y Ampt (1911):

$$Z = K_s t + \lambda \ln \left(1 + \frac{Z}{\lambda}\right) \dots\dots\dots(8)$$

Donde: K_s y λ son estimados a partir de datos de avance y la **zona húmeda** se representa por la expresión

$$Z = K_s t \dots\dots\dots(9)$$

Y la **zona de transición** se representa por:

$$Z = (K_s t) \cdot \Gamma + (K_s t + \lambda \ln(1 + \frac{Z}{\lambda})) \cdot (1 - \Gamma) \dots\dots\dots(10)$$

Donde Γ es un factor de ponderación entre 0 y 1.

IV. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACION DRISUR 2.0

4.1 Análisis de requerimientos

El sistema computacional DRISUR 2.0 representa el flujo superficial del agua en un sistema de riego por gravedad mediante un enfoque cinemático acoplado a una función de infiltración Green y Ampt. Se requiere que el sistema contenga los módulos de: Datos, Infiltración, Calibración, Modulo_riego, Simulación y Reporte.

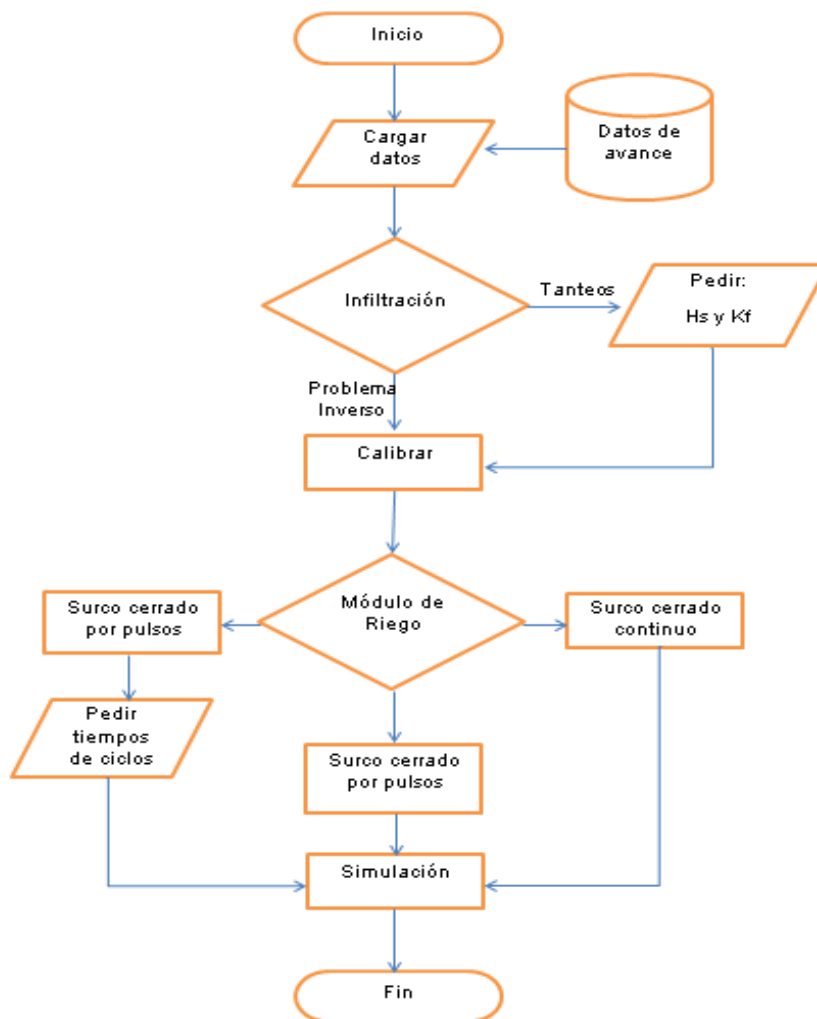


Figura 4. Diagrama de flujo de los módulos del sistema

Se desea que el sistema contenga las siguientes acciones:

1. Mostrar carga de datos, infiltración, calibración, módulo de riego, simulación, y reporte final.
2. Crear un diagrama de flujo de los datos.
3. Se debe abrir los archivos de juegos de datos.
4. Parámetros iniciales del suelo, elegir una textura del suelo: arcilla, arcillo arenoso, arcillo limoso, franco arcilloso, franco arcilloso limoso, franco, franco arenoso, franco limoso, arena franca.

Pulsar el botón datos de avance, abrir una ventana nueva de datos de avance observados y mostrar una gráfica de tiempo sobre los datos de avance. Así como una tabla de los datos de avance, la distancia entre surcos y el número de datos de avance.

5. En la infiltración, elegir entre problema inverso y por tanteos mejor conocido como aproximaciones.
6. Si se elige tanteos, pedir los valores iniciales de K_s y H_f , auxiliar al usuario mostrando una tabla de valores propuestos, según Green & Ampt.
7. En calibrar mostrar una tabla de los datos calibrados con los datos tiempo (minutos) sobre longitud del terreno (metros).
8. En el módulo de riego mostrar tres opciones: surco abierto, surco cerrado continuo y surco cerrado por pulsos

En el caso de pulsos mostrar otra pantalla y pedir los datos de tiempo de avance para riego continuo y la duración de los ciclos de intermitencia, así como elegir los tiempos de ciclo, que pueden ser constantes o variables, si son variables abrir un cuadro de dialogo para su captura y mostrar la suma de los tiempos.

9. En simular mostrar una gráfica con dos áreas, una transversal y otra de infiltración en la misma gráfica,
10. En reporte mostrar las características generales del diseño para surcos en una tabla, así como permitir guardarlos en un archivo de datos.

4.2 Descripción de la arquitectura del sistema

Con el objeto de integrar las nuevas especificaciones del sistema DRISUR 2.0 se planteo la siguiente arquitectura. El sistema comprende los módulos: Datos, Infiltración, Calibración, Tipo_riego, Pulsos, Simulación y Reporte. Tal como lo muestra la figura 4.

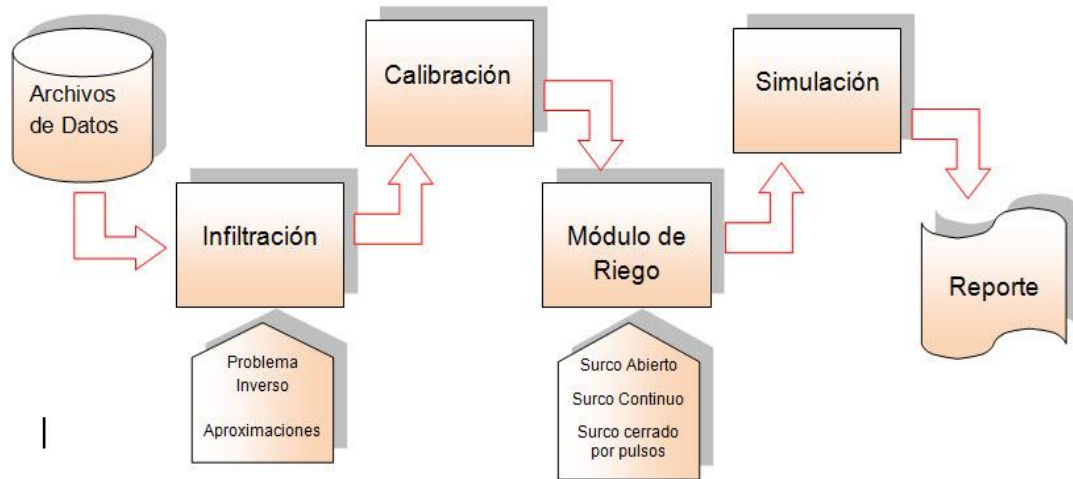


Figura 4. Arquitectura de la herramienta de simulación DRISUR 2.0.

Datos.- Este módulo permite la creación, modificación o eliminación de los datos geométricos, hidráulicos, parámetros iniciales de humedad y de textura del suelo; así como, los datos de avance del agua en la superficie.

Los datos de avance, el número de datos y la distancia entre estaciones para medir avance.

Infiltración.- En este módulo se estiman los parámetros de la función de infiltración de Green y Ampt. Mediante dos opciones: Problema inverso o por aproximaciones; en el primer caso, se invoca al modulo de optimización para estimar los parámetros de infiltración a partir de los datos de avance y son los siguientes: K_s , λ , CM (la raíz del cuadrado medio) y el numero de iteraciones que se proporcionan como valores iniciales, la segunda opción, los valores de los parámetros de infiltración deberán ser proporcionados por el usuario y los deberá ingresar por prueba y error.

Calibración.- En este módulo, se calibra el modelo, mostrando la última serie, la que más se acerca a la curva óptima.

Módulo de riego.- En este módulo se cuenta con tres opciones: surco abierto, surco cerrado continuo y surco cerrado por pulsos. En el caso de pulsos, se decide trabajar con constantes o variables, si son constantes solo se pide al usuario la duración de los ciclos de intermitencia en minutos, el programa calculara automáticamente el numero de ciclos requeridos para aplicar la lamina de diseño; en cambio sí utilizan ciclos variables se solicita el número de ciclos de intermitencia, se recomienda usar un rango entre 3 y 10, un ciclo de intermitencia por cada 50 metros de longitud del surco y no introducir ciclos de intermitencia menores de 6 minutos. En los casos de elegir surco abierto o surco cerrado continuo se invoca el procedimiento simular y se imprimen las gráficas de riego e infiltración utilizando el modelo de la onda cinemática.

Reporte.- Este módulo imprime en pantalla los resultados de la simulación incluyendo los datos de entrada y salida. Repetir el proceso cuantas veces sea necesario hasta que los parámetros obtenidos sean los óptimos o los deseados.

Datos hidráulicos	Geometría del surco	Avance	
		x(m)	t(min)
$Q_0 = 1.1$ lps	$P_1 = 0.2404$	10	2
$L = 110$ m	$P_2 = 2.6868$	20	4
$S_0 = 0.0019$ m/m	$\sigma_1 = 0.7269$	30	8
$n = 0.05$	$\sigma_2 = 0.5082$	40	12
$dt = 2$ min		50	16
$\theta_s = 0.406$ cm ³ cm ⁻³	$K^*F = 25.5$	60	20
$\theta_0 = 0.228$ cm ³ cm ⁻³		70	25
$E_s = 0.75$ m		80	31
$L_r = 5.3$ cm		90	38
		100	47
		110	54

Cuadro 1. Datos del experimento realizado en la parcela experimental E6 del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. (Fuente: Muñoz-Hernández et al, 2006)

4.3 Implementación del sistema

El sistema desarrollado consiste en un programa de cómputo para Windows 7, compatible con Vista y Xp, desarrollado en Lenguaje de programación C++ Builder 5.0 de Borland, combina la *Visual Component Library* y el IDE escrito en Delphi. Llamado DRISUR Versión 2.0.

Para validar esta metodología se realizaron pruebas de riego en el Lote E6 del campo experimental del Colegio de Postgraduados, Montecillos Estado de México, localizado a 19° 29' N, 98° 54' O, altitud 2250 m, clima templado seco con lluvias en verano, con suelos de textura franco-arcillosa. Se tomaron datos de avance, almacenamiento, recesión, tirantes de agua e hidrogramas de gasto a la salida del surco, muestreos gravimétricos de humedad del suelo y mediciones de secciones transversales para caracterizar la geometría del surco, realizado por Muñoz (2006).

La primera ventana del sistema es la de presentación, donde nos muestra el nombre del sistema DRISUR.



Figura 5. Pantalla de presentación del modelo de simulación.

El menú principal consta de un menú desplegable con las opciones de Archivo y Ayuda, en el menú archivo se tienen las siguientes opciones:

Nuevo. Se permite la entrada de nuevos datos geométricos e hidráulicos.

Abrir. Abre un archivo donde se tiene un juego de datos ya probados.

Guardar. Permite guardar el juego actual de datos geométricos.

Guardar como. Permite guardar con otro nombre un conjunto de datos ya guardados.

Cerrar. Limpia el conjunto de datos, los cierra para permitir una entrada nueva o abrir un archivo existente.

Salir. Sale de la aplicación.

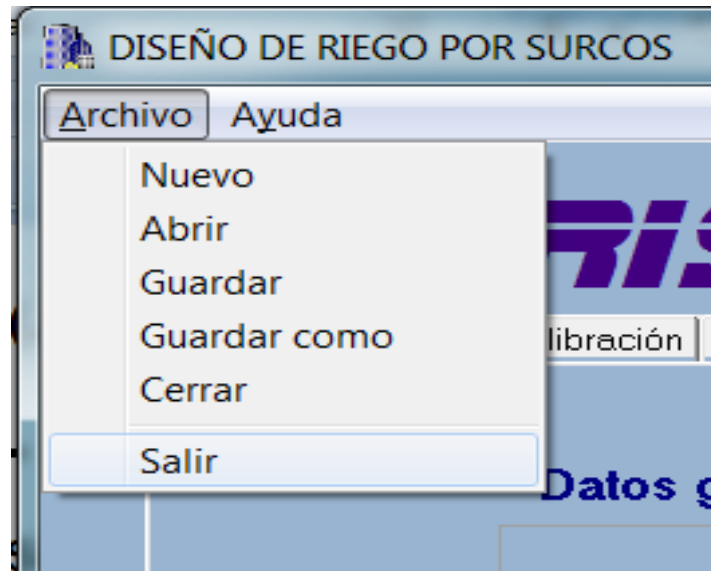


Figura 6. Opciones del menú archivo del sistema de simulación.

Dentro del menú Ayuda se encuentra la opción acerca de, que consiste en mostrar la ventana de créditos.



Figura 7. Salida que muestra datos del desarrollador y modeladores.

En la figura 8 se presentan los datos geométricos e hidráulicos: gasto, pendiente, rugosidad, intervalo de tiempo, S (contenido de humedad a saturación), t (contenido de la humedad inicial), espacio entre surcos y lamina de riego y los parámetros iniciales del suelo: textura del suelo, aquí se tiene un catálogo con las siguientes opciones o tipos de suelo: arcilla, arcilla arenoso, arcilla limoso, franco, franco arcilloso, franco arcillo limos, franco arenoso, franco limoso, arena franca, los datos de avance y topográficos para mejorar la operación de un sistema de riego por surcos.



Figura 8. Datos geométricos e hidráulicos y parámetros iniciales del suelo.

Dentro de los datos de avance se tiene la distancia entre estaciones para medir avance, el número de datos de avance y el Grid con los datos de avance, que consiste en un arreglo de dos dimensiones y la gráfica para ver los datos sobre tiempos observados.

En la figura 9 se presentan los datos de una prueba de avance sobre un surco representativo de la parcela a regar. Con los cuales se estiman los parámetros de la función de infiltración mediante el problema inverso.

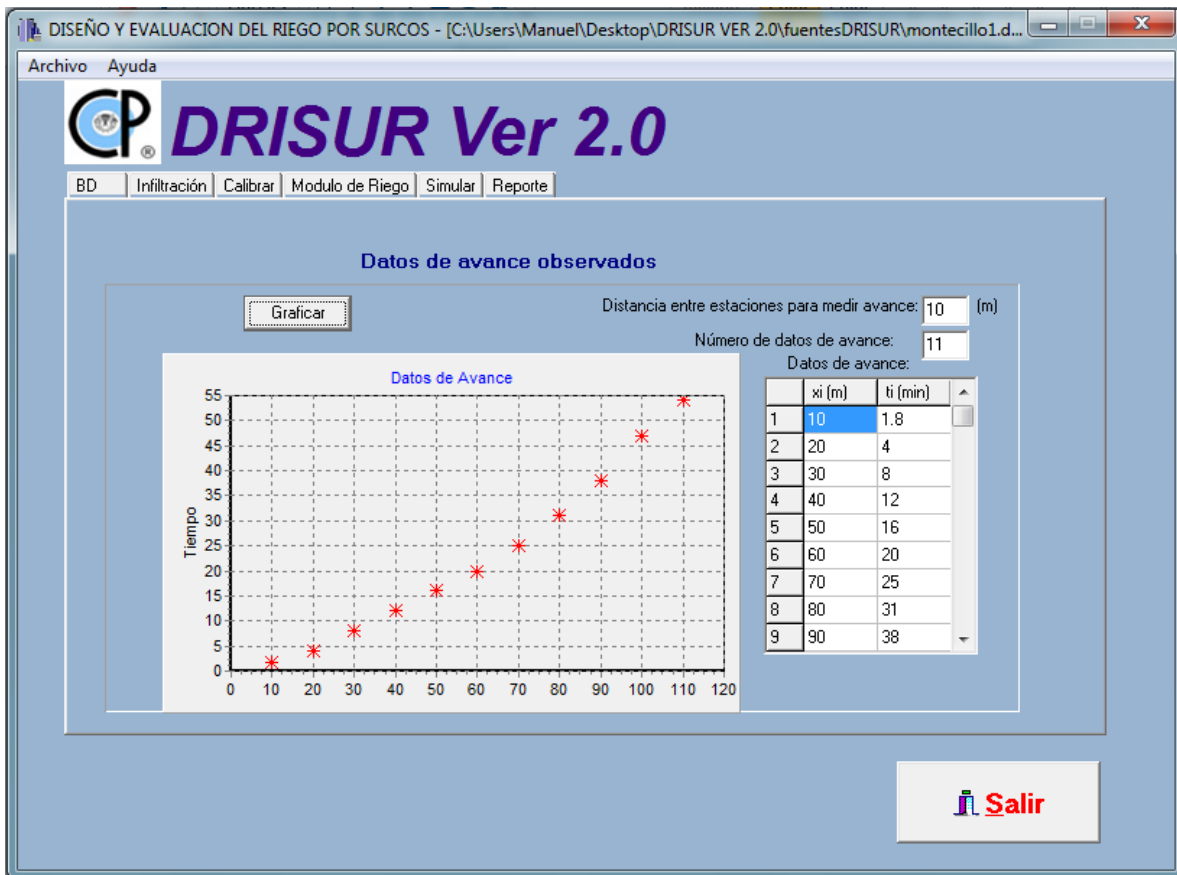


Figura 9. Grafica de los datos de avance observados.

El modelo de infiltración de Green y Ampt puede aportar de dos maneras: Por el problema inverso y por Tanteos. Se invoca al modulo de optimización el cual estima los parámetros de infiltración a partir del avance y son los siguientes: K_s , λ , CM (la raíz del cuadrado medio) y el número de iteraciones que se proporcionan como valores iniciales.



Figura 10. Selección del método de estimación de infiltración.

Para la opción por Tanteos, los valores de los parámetros de infiltración deberán ser proporcionados por el usuario y los deberá ingresar por prueba y error.



Figura 11. Parámetros de infiltración utilizando la opción Tanteos.

Se pueden comparar los valores iniciales de Ks y Hf con los datos propuestos por Green y Ampt mediante el botón mostrar tabla, dependiendo del tipo de suelo elegido se consideran los datos de Hf en centímetros y Ks en centímetros sobre hora.

Textura del suelo

Ks y Hf de Green y Ampt en funcion de la textura (Rendon et al. 1996)

Textura del Suelo	Parámetros			
	θ_0 (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	Hf (cm)	ks (cm/h)
Arena	0.07	0.41	2	15
Arena franca	0.09	0.42	4	10
Franco arenoso	0.16	0.46	12	2.9
Franco	0.20	0.46	25	1.5
Franco Limoso	0.17	0.55	30	1.0
Limo	0.14	0.50	35	0.8
Franco arcillo arenoso	0.18	0.42	12	2.0
Franco arcilloso	0.25	0.48	38	0.4
Franco arcilloso limoso	0.26	0.49	60	0.15
Arcilla arenosa	0.25	0.42	25	0.5
Arcilla limosa	0.32	0.48	100	0.05
Arcilla	0.36	0.49	100	0.05

Close

Figura 12. Valores de los parámetros de infiltración, Rendón et al (1996).

Se capturan los datos y se cierra la ventana con el botón Close para después ejecutar la calibración.

En calibrar no importando cual método se haya elegido, se calibrara el modelo, mostrando la última serie, la que más se acerca a la curva óptima. Como se observa en la figura 13. Para simular el riego por surcos se requiere estimar previamente los parámetros de infiltración. El sistema permite estimar estos parámetros utilizando dos criterios: una técnica de optimización no lineal basada en el algoritmo de Gauss-Newton o por aproximaciones donde el usuario propone valores de los parámetros Ks y Hf de la función de Green y Ampt. En la figura 3

se presenta la curva de avance superficial correspondiente a los valores óptimos (mínimo error cuadrático) de K_s y H_f .

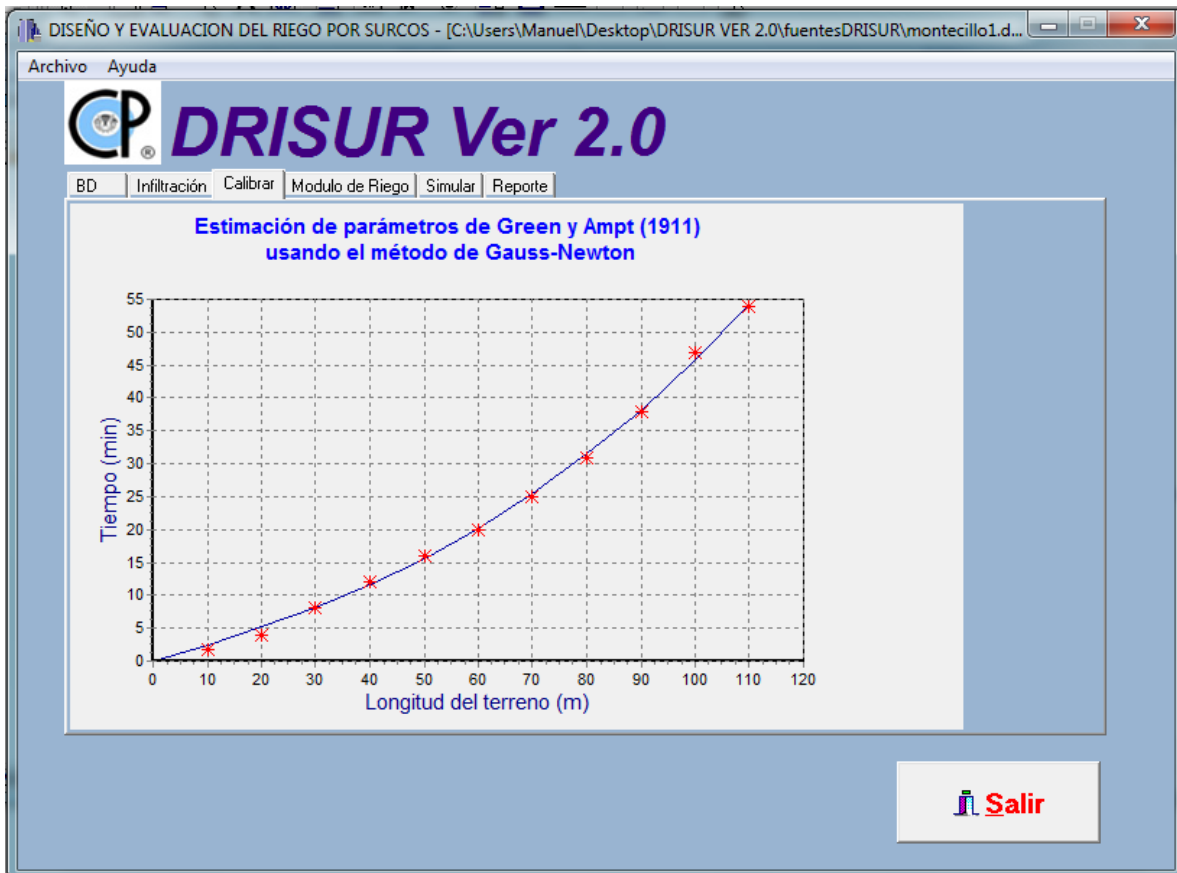


Figura 13. Ajuste del avance con parámetros óptimos de infiltración.

En Tipo de riego permite simular tres condiciones de funcionamiento hidráulico para operar el riego por surcos. Gasto continuo hasta aplicar la lámina de riego deseada a $\frac{3}{4}$ de la longitud del surco (Walker y Humpherys, 1983). Esta estrategia conduce a pérdidas por escurrimiento importantes cuando el suelo es muy arcilloso. Gasto continuo con surcos cerrados al final de los mismos, los cuales evitan las pérdidas por escurrimiento. Esta estrategia requiere mayor control de la aplicación para evitar encharcamientos al final de los surcos. Gasto discontinuo (o por intermitencia) para mejorar la uniformidad del riego y las eficiencias de

aplicación. Esta estrategia requiere de dispositivos hidráulicos semiautomatizados para aplicar los riegos, y presenta grandes ventajas para aplicar la fertirrigación en riego por gravedad.



Figura 14. Modalidades de simulación del riego por surcos.

En el caso de pulsos, se decide por trabajar con constantes o variables, si son constantes solo se le pide al usuario la duración de los ciclos de intermitencia en minutos, el programa calculara automáticamente el numero de ciclos requeridos para aplicar la lamina de diseño.

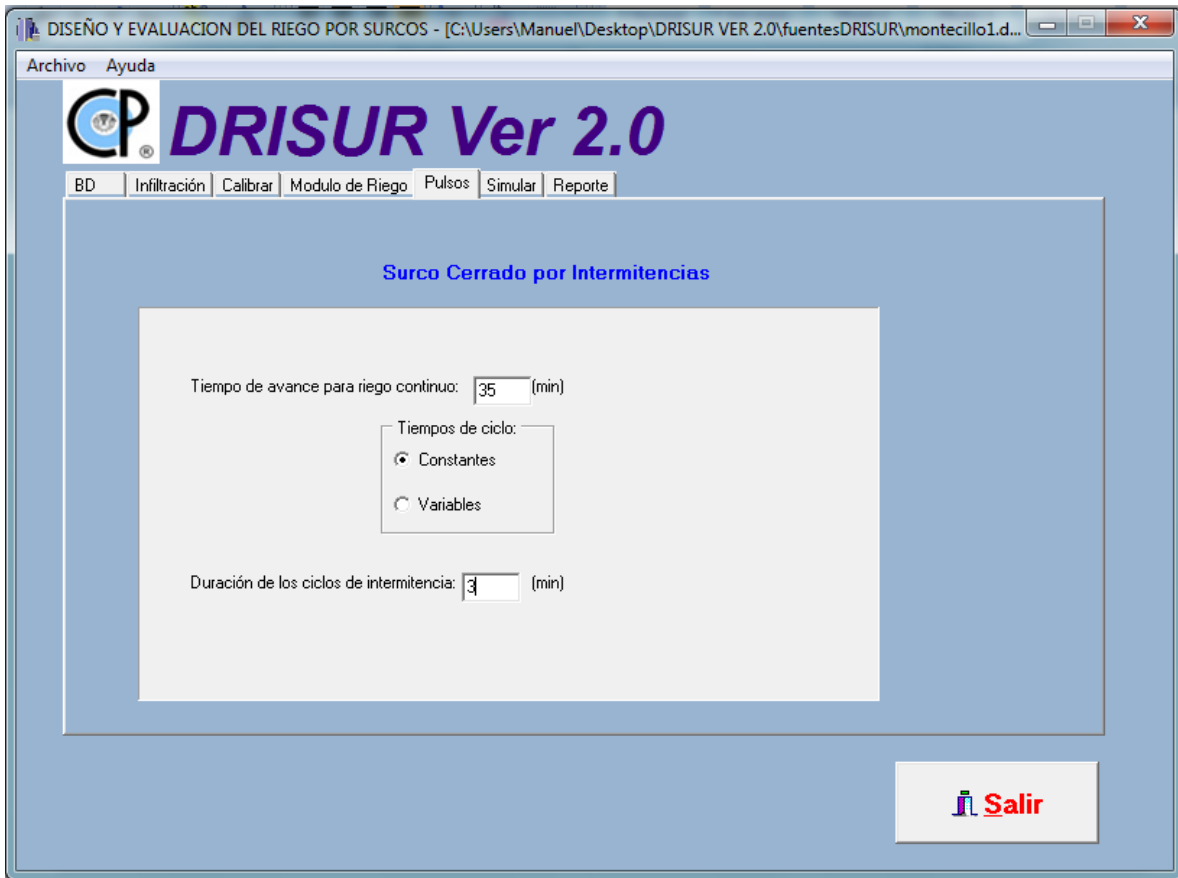


Figura 15. Descripción de la simulación del riego por intermitencias.

En cambio sí se utilizan ciclos variables se pide el número de ciclos de intermitencia, se recomienda usar un rango entre 3 y 10, un ciclo de intermitencia por cada 50 metros de longitud del surco y no introducir ciclos de intermitencia menores de 6 minutos.



Figura 16. Utilización de tiempos de ciclo variable en riego por intermitencias.

El sistema automáticamente calcula el total de minutos para la intermitencia y nos muestra la suma que deben tener los ciclos de intermitencia que se hayan capturado, en caso de que la suma no coincida nos pedirá que volvamos a capturar.

La solución para un riego con gasto continuo en surco abierto, se presenta en la figura 17. Esta solución corresponde a los datos de entrada especificados anteriormente en el módulo Datos. El programa de cómputo utiliza tres criterios de eficiencia hidráulica para caracterizar el riego. La eficiencia de aplicación E_a , la

eficiencia de requerimiento de riego y el Coeficiente de Uniformidad de Christiansen, Muñoz *et al.* (1997).

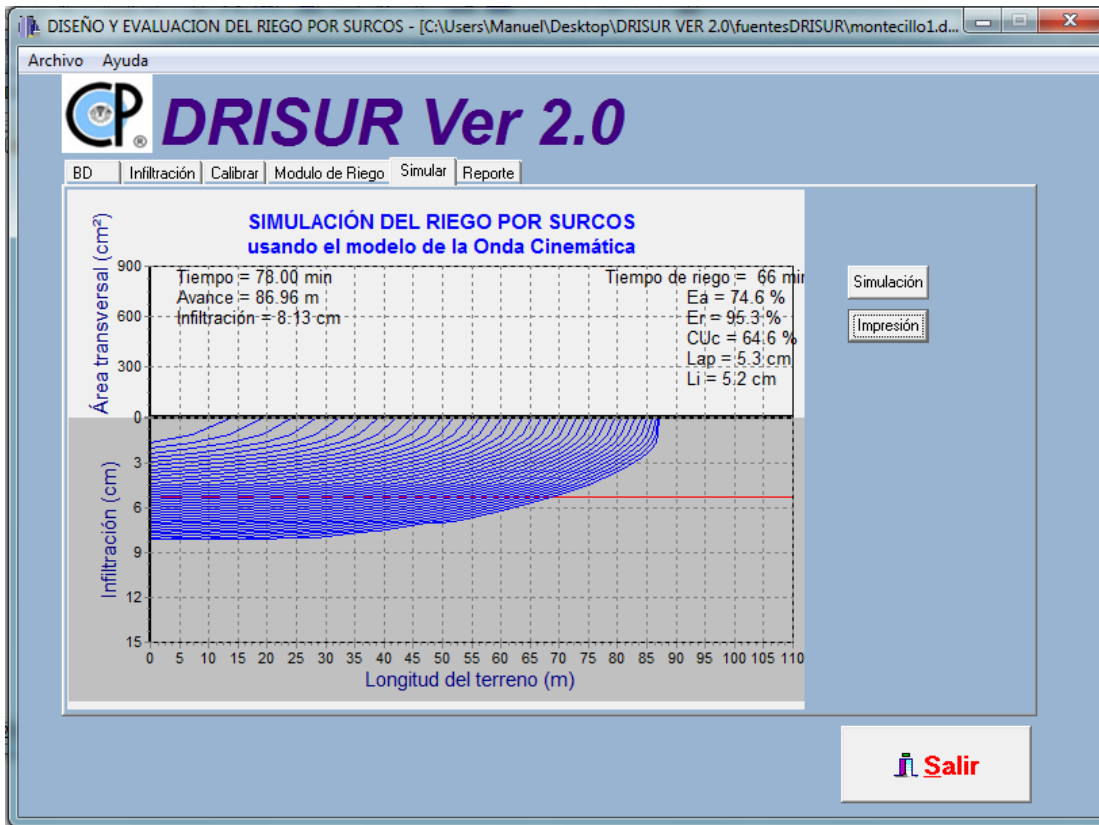


Figura 17. Gráfica de los resultados de la simulación del riego por surcos.

En simular se muestra el avance del agua hasta el final del surco, la simulación continua mientras el tirante en la superficie va desapareciendo en el extremo aguas arriba del surco y se inicia la aplicación de las condiciones de frontera del avance recesión simultáneamente, un tiempo después de haberse cortado el gasto, el tirante se hace cero y la infiltración se detiene.

El perfil superficial continúa moviéndose aguas abajo por avance- recesión. Si se eligieron varios pulsos, se consideran dos zonas a lo largo del surco, una húmeda representada por color azul y otra seca representada por color gris o ausencia del color azul.

Existe una acumulación temporal de agua que se muestra al final del surco, característica principal de un riego en surco cerrado.

Repetir el proceso cuantas veces sea necesario hasta que los parámetros de salida sean los óptimos o los deseados dando clic al botón datos y modificar los datos geométricos e hidráulicos, como se muestra en la figura 8.

Al final se muestra la pestaña Reporte, que contiene las características generales de los parámetros ideales para un buen riego.

Al utilizar el botón impresión, se puede enviar la salida a una impresora o guardar la misma como un archivo de imagen en medio magnético.

El sistema permite analizar múltiples alternativas de diseño y comparar la calidad del funcionamiento hidráulico en función de los criterios de eficiencia mencionados anteriormente.

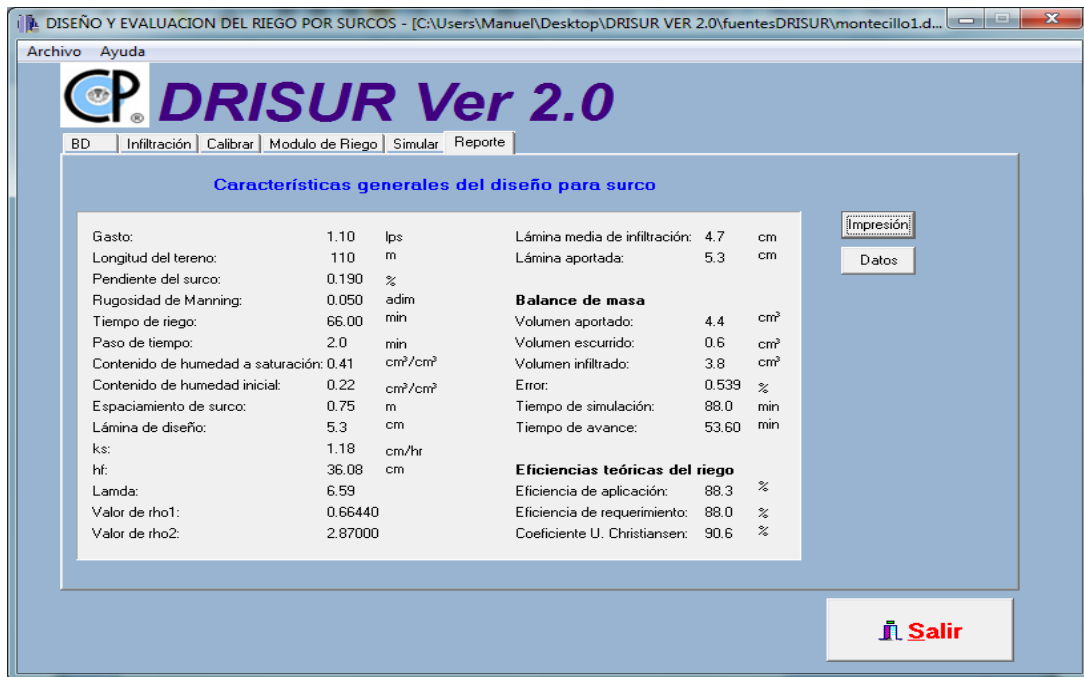


Figura 18. Reporte de salida del sistema de simulación DRISUR 2.0.

La plataforma utilizada en el diseño del sistema DRISUR ver 2.0 fue C++ Builder 5.0, debido a las grandes bondades que este lenguaje visual tiene al contar con el código fuente en C estándar que facilita la aplicación de proyectos Windows, donde se dispone de un completo conjunto de herramientas para programar y depurar cualquier aplicación informática. Lo que nos arroja como resultado una aplicación robusta, sencilla y dinámica.

V. PRUEBA Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Se verificó el modelo con datos de campo previamente obtenidos y se realizó una comparación con datos experimentales reportados en la literatura para verificar el buen funcionamiento y detectar posibles errores de diseño y construcción de procedimientos y funciones del sistema de cómputo.

El sistema de simulación puede utilizarse en cualquier modalidad de riego en surco abierto o cerrado para aplicar de manera eficiente el uso racional del agua.

Los resultados del sistema de simulación fueron muy similares a los reportados en la literatura, por lo tanto puede ser utilizado con confiabilidad el sistema para simular el riego.

Una limitante del sistema son las pocas validaciones en las ordenes de las variables de entrada, al momento de capturar datos se considera que la persona que lo utiliza posee un criterio o conocimiento sobre el manejo de riego, si se ingresan datos inconsistentes pueden hacer que el sistema obtenga resultados erróneos.

5.1 Datos de validación

Se probaron tres juegos de datos aportando las salidas siguientes:

Juego de datos probados en la primera ejecución del modelos de simulación.

Gasto	1.10	Lps	Lámina media de infiltración	4.7	cm
Longitud del terreno	110.00	m	Lámina aportada	5.3	cm
Pendiente del surco	0.19	%			
Rugosidad de Manning	0.05	adim	Balance de masa		
Tiempo de riego	66.00	min	Volumen aportado	4.4	cm ³
Paso de tiempo	2.00	min	Volumen escurrido	0.6	cm ³
Contenido de humedad a saturación	0.41	Cm ³ cm ³	Volumen infiltrado	3.8	cm ³
Contenido de la humedad inicial	0.22	Cm ³ cm ³	Error	0.539	%
Espaciamiento de surco	0.75	m	Tiempo de simulación	88.0	min
Lámina de diseño	5.30	cm	Tiempo de avance	53.60	min
Ks	1.18	cm/hr			
Hf	36.08	cm	Eficiencia teórica del riego		
Lambda	6.59		Eficiencia de aplicación	88.3	%
Valor de rho1	0.66		Eficiencia de requerimiento	88.0	%
Valor de rho2	2.87		Coeficiente U. Christiansen	90.6	%

Cuadro 2. Datos de salida de la primera ejecución.

Juego de datos probados en la segunda ejecución del modelos de simulación.

Gasto	1.26	Lps	Lamina media de infiltración	5.6	cm
Longitud del terreno	110.00	m	Lamina aportada	6.0	cm
Pendiente del surco	0.19	%			
Rugosidad de Manning	0.053	adim	Balance de masa		
Tiempo de riego	66.00	min	Volumen aportado	5.0	cm ³
Paso de tiempo	2.00	min	Volumen escurrido	0.4	cm ³
Contenido de humedad de saturación	0.41	Cm ³ cm ³	Volumen infiltrado	4.5	cm ³
Contenido de la humedad inicial	0.23	Cm ³ cm ³	Error	0.994	%
Espaciamiento del surco	0.75	m	Tiempo de simulación	86.0	min
Lamina de diseño	6.1	cm	Tiempo de avance	55.26	min
Ks	2.79	cm/hr			
Hf	13.90	cm	Eficiencia teórica del riego		
Lambda	2.45		Eficiencia de aplicación	92.6	%
Valor de rho1	0.66		Eficiencia de requerimiento	91.9	%
Valor de rho2	2.87		Coeficiente U. Christiansen	87.8	%

Cuadro 3. Datos de salida de la segunda ejecución.

Juego de datos probados en la tercera ejecución del modelos de simulación.

Gasto	1.59	Lps	Lamina media de infiltración	10.3	cm
Longitud del terreno	110.00	M	Lamina aportada	12.9	cm
Pendiente del surco	0.19	%			
Rugosidad de Manning	0.03	Adim	Balance de masa		
Tiempo de riego	119.0	Min	Volumen aportado	11.4	cm ³
Paso de tiempo	2.00	Min	Volumen escurrido	2.5	cm ³
Contenido de humedad de saturación	0.50	Cm ³ cm ³	Volumen infiltrado	9.0	cm ³
Contenido de la humedad inicial	0.18	Cm ³ cm ³	Error	0.076	%
Espaciamiento del surco	0.80	M	Tiempo de simulación	136.0	min
Lamina de diseño	13.0	Cm	Tiempo de avance	46.41	min
Ks	3.05	cm/hr			
Hf	10.01	Cm	Eficiencia teórica del riego		
Lambda	3.20		Eficiencia de aplicación	88.3	%
Valor de rho1	0.66		Eficiencia de requerimiento	79.3	%
Valor de rho2	2.87		Coeficiente U. Christiansen	93.2	%

Cuadro 4. Datos de salida de la tercera ejecución.

VI. CONCLUSIONES

El sistema está diseñado para que los técnicos de riego puedan utilizarlo con conocimientos elementales de cómputo, sin ser un usuario experto.

Se demostró que el uso del sistema permite trabajar de manera eficiente el riego por surcos, evitando el exceso de pérdida por la infiltración y por lo tanto pérdida de agua que se llevaría en cada riego normalmente al no realizar las pruebas en computadora. Los cambios y las variaciones en los datos de entrada geométricos e hidráulicos, permiten modelar el riego por surcos a fin de evitar numerosas pruebas en campo.

Con el objetivo de que al presente trabajo se le pueda dar un seguimiento para futuros cambios ya sean de carácter didáctico o de investigación, que al estar escrito en C++ Builder es fácil exportar o cambiar a otro lenguaje visual de alto nivel y así mismo facilitó la construcción de una interface amigable para el usuario final.

Los objetivos sobre diseño e implementación planteados se cumplieron cabalmente y el correcto funcionamiento del sistema se verificó mediante diferentes conjuntos de datos de entrada, probando que la precisión y ejecución del sistema es satisfactoria.

El programa de cómputo DRISUR 2.0 constituye una herramienta computacional para analizar múltiples alternativas de manejo del de riego por surcos. El aspecto más delicado del proceso es la estimación de los parámetros de infiltración de Green y Ampt, mediante un problema inverso permite obtener una representatividad a la escala de un surco. Sin embargo se requiere contar con una prueba de avance representativa de los riegos a efectuarse para tomar en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la infiltración. La utilización del riego por intermitencia, representa una estrategia viable de modernización del riego superficial para reducir los volúmenes de agua aplicados y mejorar la fertilización en riego por gravedad.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Arista C. J., González, J. M y Waldo O. B. 1999. Algoritmo recursivo para mejorar la integración de la demanda diaria de riego de una red de distribución. *Agrociencia* 43: 841-850. 2009.

Bastiaanssen W. G. M. *et al.*, 2007. Twenty-five years modeling irrigated and drain soils: State of the art. *Agricultural Water Management* 92, 111-125 p.

Date. C. J. 2001. *Introducción a los sistemas de bases de datos*. Edit Pearson Prentice Hall. Séptima edición. 22 p.

Emery, J. 1990. *Sistemas de información para la dirección: El recurso estratégico crítico*. Díaz de santos. Madrid. 44 p.

García Dunna, Eduardo. 2006. *Simulación y análisis de sistemas con Promodel*. 1ª. Edición. Pearson Educación de México. 130 p.

González, J. M., B. Muñoz, y R. Acosta. 1996. Solución numérica del problema inverso avance-infiltración (Green y Ampt) en riego por gravedad. *In: Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Guayaquil, Ecuador. 5: 341-351.

González, J. M., B. Muñoz, y R. Acosta. 2006. **Modelo Cinemático para simular el riego por surcos continuos. *Agrociencia***

<p>Green, W.A., and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics. 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science Cotswold Press. Oxford. 4: 1-24</p>
<p>Holtz, S. 1997. Intranet como ventaja competitiva. Anaya multimedia. Madrid. 120 p.</p>
<p>Keye J. 1993. Infotrends: the competitive use of information. Mc Graw Hill. New York. 55 p.</p>
<p>Masuda, Y. 1980. La sociedad informatizada como sociedad post-industrial. Fundesco_tecnos. Madrid. 86 p.</p>
<p>Muñoz H. B. 1998. El modelo de la onda cinemática aplicado al diseño de sistemas de riego por surcos, continuos y por pulsos. Tesis de Maestría en Ciencias, Hidrociencias, p.</p>
<p>Ojeda-Bustamante, W., J. M. González-Camacho, E. Sifuentes- Ibarra, E. Isidro-Pioquinto, and L. Rendón-Pimentel. 2007. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. Agric. Water Manage. 89: 81-88.</p>
<p>Piattini G. Mario, <i>et al.</i> 2007. Tecnología y diseño de bases de datos. Editorial Alfa omega- Rama. Primera edición. 23-25 p.</p>
<p>Rendón, L., J. Ortiz, y R. Acosta. 1990. Riego eficiente del trigo en melgas. <i>In: Memorias análisis de la problemática del agua y perspectivas</i></p>

<p>para la modernización de su uso en la agricultura de Guanajuato. Celaya, Guanajuato. pp: 157-170.</p>
<p>Ricardo M. Catherine. 2009. Bases de datos. Editorial Mc. Graw Hill. Primer edición. 14 p.</p>
<p>Rincón Vega. J.M. 1985. Diseño e informatización de sistemas de información económica. Universidad del País Vasco. Bilbao. 33 p.</p>
<p>Ríos Insua David, <i>et al.</i> 2009. Simulación, métodos y aplicaciones. Editorial Alfa omega- Rama. Segunda edición. 54 p.</p>
<p>Robinet, A. 1982. Mitología, filosofía y cibernética: El autómatas y el pensamiento. Tecnos. Madrid. 32 p.</p>
<p>Rowley, J. 1996. The basis of information systems. Library Association Publishing. London. 65 p.</p>
<p>Scott, G.M. 1988. Principios de sistemas de información. Mc. Graw Hill. México. 44 p.</p>
<p>Senn, J.A. 1994. Análisis y diseño de sistemas de información. Mc. Graw Hill. México. 69 p.</p>
<p>Somerville, Ian. 1998. Ingeniería del Software. Editorial Addison Wesley Iberoamericana, Wilnington. EEUU. 46-73 p.</p>
<p>Stalling William. 2005. Organización y arquitectura de computadoras.</p>

Editorial Pearson Educación S.A. Madrid. Séptima edición. 66 p.
Timsina j. y Humphreys E., 2006. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review. Agricultural Systems 90, 5-31p.
Walker, W. R., and G. V. Skogerboe. 1987. Surface Irrigation: Theory and Practice. NJ USA. Prentice Hall Inc. 386 p.
Walker, W.R., and A.S. Humpherys. 1983. Kinematic wave furrow irrigation model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 109(4):377-392.

ANEXO 1

MANUAL DEL USUARIO

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

SOCIOECONOMIA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA

CÓMPUTO APLICADO

UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA EL DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL RIEGO POR SURCOS

JUAN MANUEL CHAVARRIETA YÁÑEZ

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

JULIO DE 2011

Contenido

Introducción.....	3
Requerimientos del sistema	3
Explicación del funcionamiento	4
Carga de datos	5
Base de Datos.	6
Datos de avance.	8
Infiltración.....	9
Infiltración por tanteos.....	10
Valores aproximados de los parámetros de infiltración.....	11
Ajuste del avance de infiltración.....	11
Modalidades de simulación del riego por surcos	13
Simulación del riego por intermitencias con valores constantes.	13
Simulación del riego por intermitencias con ciclos a tiempo variable.....	14
Resultados de la simulación del riego por surcos.	16
Reporte del Sistema.....	17
A cerca de.....	17

Introducción.

El presente Manual de Usuario, tiene como finalidad dar a conocer de una manera detallada y sencilla, el proceso que se lleva a cabo a través del uso del Sistema con el propósito de que los usuarios se familiaricen con la aplicación.

DRISUR Ver 2.0, es herramienta computacional basado en un enfoque cinemático para determinar las variables de operación (tiempo de riego, gasto, ciclos de intermitencia) que permiten mejorar las eficiencias de aplicación y de uniformidad del riego y reducir las pérdidas de agua.

El sistema permite analizar diferentes condiciones de operación del riego por surcos, bajo riego continuo, cerrado con riego continuo o cerrado con ciclos de intermitencia.

Los cambios y las variaciones en los datos de entrada geométricos e hidráulicos, permiten modelar el riego por surcos a fin de evitar numerosas pruebas en campo.

La herramienta computacional denominada DRISUR Ver 2.0 fue desarrollada en la plataforma visual Borland C++ Builder 5.0, con una interfaz gráfica para facilitar su utilización.

Consiste en un programa de cómputo para Windows Xp, Vista y Seven, combina la Visual Componente Library y el IDE escrito en Delphi.

Requerimientos del sistema

Se requiere 27.3 Mb de espacio en disco duro y unidad de Cd para su instalación.

La interfaz es grafica por lo que se sugiere el ratón para su manejo.

Explicación del funcionamiento

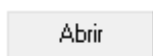
Al inicio se presenta la ventana de presentación, donde nos muestra el nombre del sistema DRISUR 2.0.



El menú principal consta de un menú desplegable con las opciones de Archivo y Ayuda, en el menú archivo se tienen las siguientes opciones:



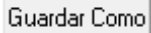
Nuevo. Se permite la entrada de nuevos datos geométricos e hidráulicos.



Abrir. Abre un archivo donde se tiene un juego de datos ya probados.



Guardar. Permite guardar el juego actual de datos geométricos, introducidos desde teclado o abiertos desde archivo y modificados posteriormente.



Guardar como. Permite guardar con otro nombre un conjunto de datos abiertos o modificados y guardarlos con otro nombre.

Cerrar. Limpia el conjunto de datos, los cierra para permitir una entrada nueva o abrir un archivo existente. Esta opción solo está presente dentro del menú archivo.



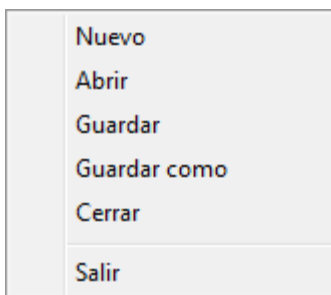
Salir. Sale de la aplicación.

Carga de datos

La entrada es de dos tipos: Manual y por Archivo de datos.

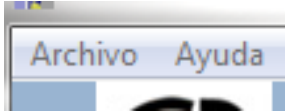
Entrada manual. Se utiliza la opción nuevo menú archivo o se da clic en el botón nuevo

Entrada en archivo de datos. Puede ser dando clic al botón abrir o dentro del menú archivo y la opción abrir, donde se elige un archivo que contiene el nombre de donde fueron probado u obtenidos los datos geométricos e hidráulicos.

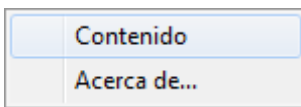


Base de Datos.

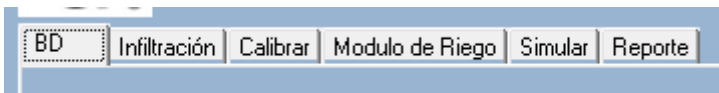
Aquí se presenta el menú archivo y el menú ayuda, dentro de archivo se tienen las opciones de Nuevo, Abrir, Guardar, Guardar como



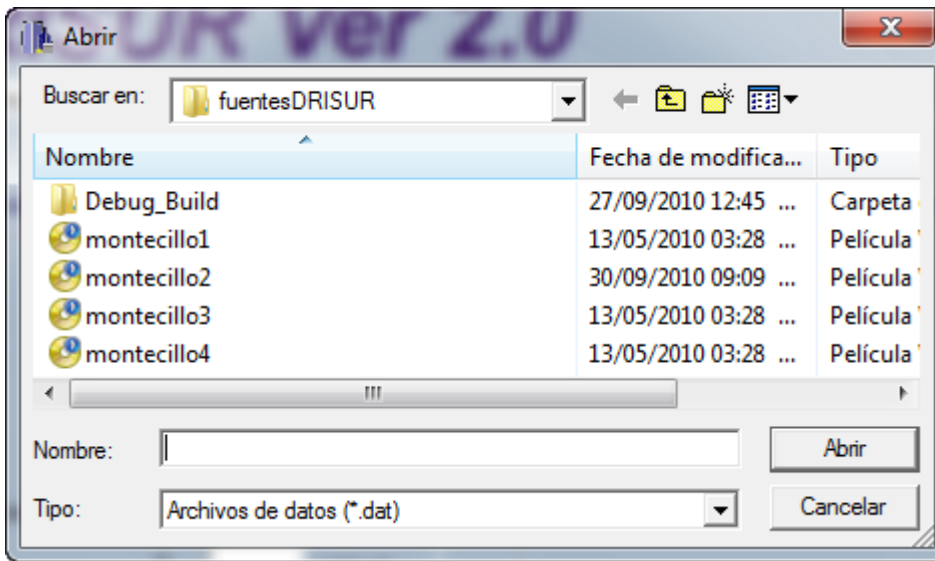
Dentro del menú ayuda, se encuentran las opciones de contenido y acerca de.



Las opciones del sistema se tienen que ir ejecutando en el orden de precedencia, después de la carga de datos se tiene que dar clic a infiltración, para después en calibrar y así sucesivamente hasta llegar a la pestaña de reporte.



Para cargar los datos se elige una de las opciones de datos, presentes en los archivos con extensión .dat, los cuales contienen los juegos de datos geométricos e hidráulicos, datos de avance y textura del suelo.

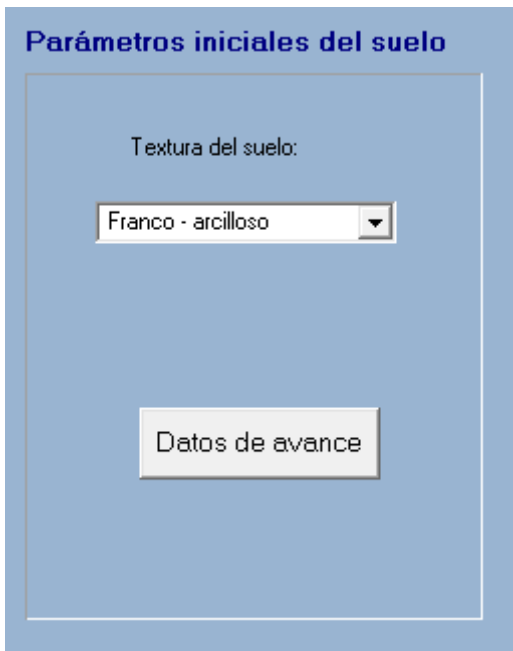


Al dar clic sobre el archivo o al presionar el botón abrir automáticamente se cargan los datos siguientes:

Datos geométricos e hidráulicos

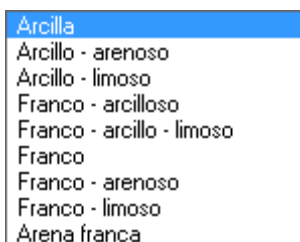
Gasto:	<input type="text" value="1.1"/>	lps
Longitud:	<input type="text" value="110"/>	m
Pendiente:	<input type="text" value="0.19"/>	%
Rugosidad:	<input type="text" value="0.05"/>	adim
Intervalo de tiempo:	<input type="text" value="2"/>	min
S	<input type="text" value="0.406"/>	cm ³ /cm ³
Øi:	<input type="text" value="0.223"/>	cm ³ /cm ³
Espacio entre surcos:	<input type="text" value="0.75"/>	m
Lámina de riego:	<input type="text" value="5.3"/>	cm

La textura inicial del suelo es franco arcilloso, se puede cambiar dando clic a la caja de dialogo y eligiendo alguna de la lista que se muestra.



Datos de avance.

Se puede cambiar el tipo de suelo dando clic sobre los siguientes:



Al presionar el botón datos de avance se muestra la gráfica con los datos de avance observados.

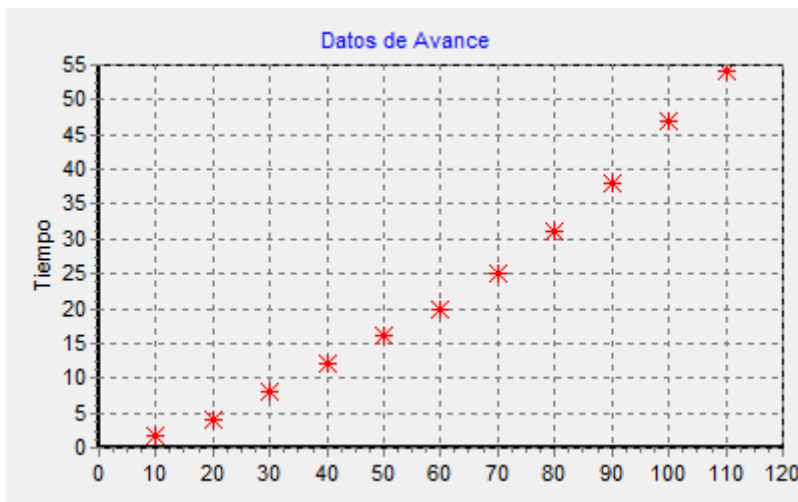
Datos de avance

boton datos de avance

Graficar

boton graficar

Al presionar el botón graficar se muestran los datos observados sobre la gráfica.



Dentro de los datos de avance se tiene la distancia entre estaciones para medir avance, el número de datos de avance y el Grid con los datos de avance, que consiste en un arreglo de dos dimensiones y la gráfica para ver los datos sobre tiempos observados.

Infiltración.

El modelo de infiltración de Green y Ampt puede aportar de dos maneras: Por el problema inverso y por Tanteos.

Obtener los parámetros de infiltración por:

Problema Inverso

Por Tanteos

Infiltración por tanteos.

Por Tanteos

Para la opción por Tanteos, los valores de los parámetros de infiltración deberán ser proporcionados por el usuario y los deberá ingresar por prueba y error.

Valores iniciales de Ks y Hf de Green y Ampt Calibrar

Valor inicial de Ks: (cm/hr)

Valor inicial de Hf: (cm)

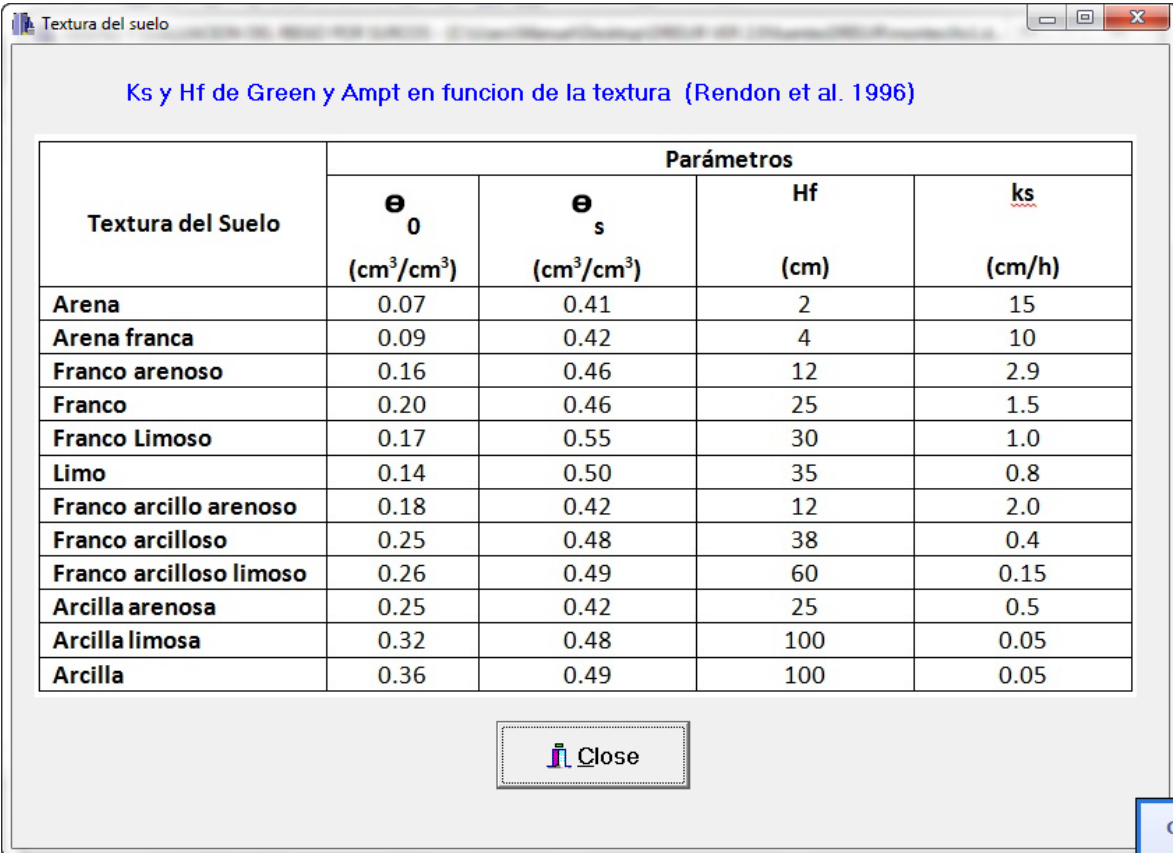
Mostrar Tabla: Ks y Hf de Green y Ampt

Se pueden teclear los parámetros iniciales de Ks y Hf o se pueden tomar los valores de referencia de Green & Ampt en función de la textura, que se muestran al presionar el botón mostrar tabla.

Mostrar Tabla: Ks y Hf de Green y Ampt

Dependiendo del tipo de suelo elegido se consideran los datos iniciales de Hf en centímetros y Ks en centímetros sobre hora.

Valores aproximados de los parámetros de infiltración.



Ks y Hf de Green y Ampt en funcion de la textura (Rendon et al. 1996)

Textura del Suelo	Parámetros			
	θ_0 (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	Hf (cm)	ks (cm/h)
Arena	0.07	0.41	2	15
Arena franca	0.09	0.42	4	10
Franco arenoso	0.16	0.46	12	2.9
Franco	0.20	0.46	25	1.5
Franco Limoso	0.17	0.55	30	1.0
Limo	0.14	0.50	35	0.8
Franco arcillo arenoso	0.18	0.42	12	2.0
Franco arcilloso	0.25	0.48	38	0.4
Franco arcilloso limoso	0.26	0.49	60	0.15
Arcilla arenosa	0.25	0.42	25	0.5
Arcilla limosa	0.32	0.48	100	0.05
Arcilla	0.36	0.49	100	0.05

Close

Se capturan los datos y se cierra la ventana con el botón Close para después ejecutar la calibración, mediante el botón calibrar.

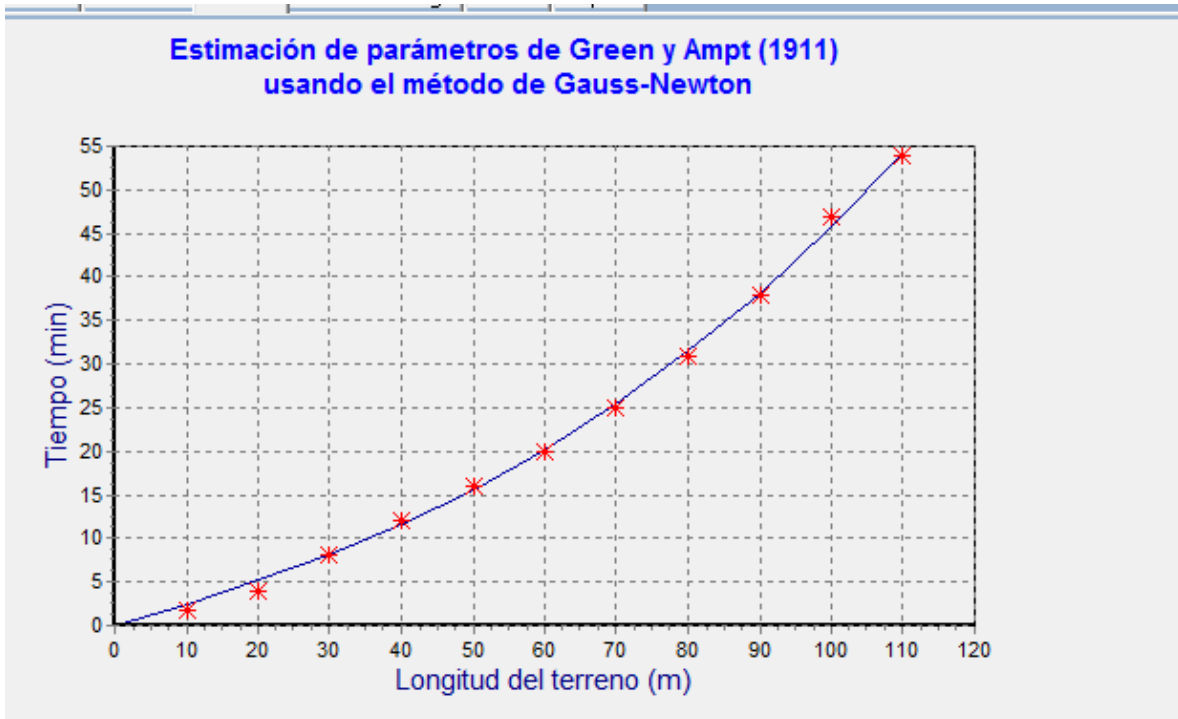
 boton calibrar.

Ajuste del avance de infiltración.

Una vez cargado los datos, se procede a dar clic a la pestaña calibración.

En calibrar no importando cual método se haya elegido, se calibrara el modelo, mostrando la última serie, la que más se acerca a la curva óptima.

Se presenta la curva de avance superficial correspondiente a los valores óptimos (mínimo error cuadrático) de K_s y H_f .



En Tipo de riego permite simular tres condiciones de funcionamiento hidráulico para operar el riego por surcos.

- a. Surco abierto
- b. Surco cerrado continuo
- c. Surco cerrado por pulsos.

Modalidades de simulación del riego por surcos

Presionar en la opción deseada para las modalidades de simulación del riego por surco.

Tipo de riego:

Surco abierto

Surco cerrado continuo

Surco cerrado por pulsos

Y al final presionar simular después de haber elegido el tipo de simulación.

Simular

Simulación del riego por intermitencias con valores constantes.

Tiempos de ciclo:

Constantes

Variables

En el caso de pulsos, se decide por trabajar con constantes o variables, si son constantes solo se le pide al usuario la duración de los ciclos de intermitencia en minutos, el programa calculara automáticamente el número de ciclos requeridos para aplicar la lámina de diseño.

Tiempo de avance para riego continuo: (min)

Tiempos de ciclo:

Constantes

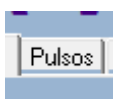
Variables

Duración de los ciclos de intermitencia: (min)

En cambio sí se utilizan ciclos variables se pide el número de ciclos de intermitencia, se recomienda usar un rango entre 3 y 10, un ciclo de intermitencia por cada 50 metros de longitud del surco y no introducir ciclos de intermitencia menores de 6 minutos porque causara un error en el sistema, en este caso se pide volver a capturar un número mayor a seis minutos.

Simulación del riego por intermitencias con ciclos a tiempo variable.

Presionar pulsos e introducir los parámetros a simular



Tiempo de avance para riego continuo: (min)

Tiempos de ciclo:

Constantes

Variables

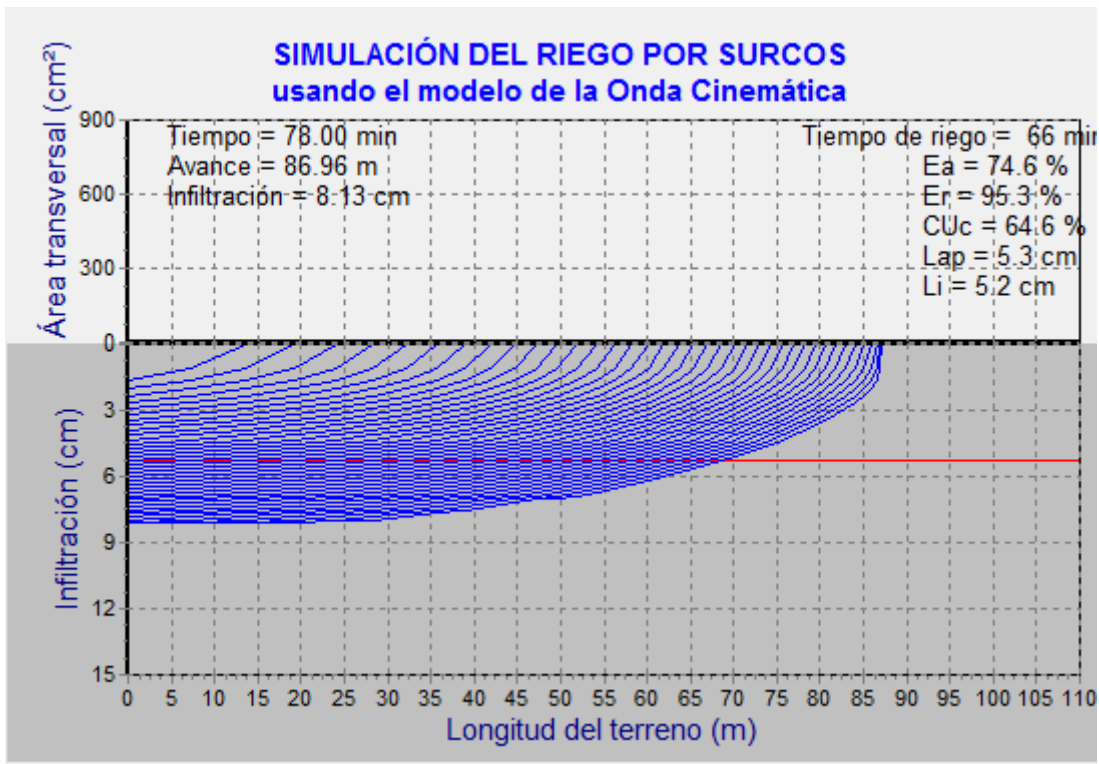
Ciclo	Min
1	7
2	5
Total:	12

Número de ciclos de intermitencia: (min)

Los 2 tiempos de intermitencia deben sumar 12.0 minutos

Los tiempos deben coincidir con la suma, verifique esto antes de simular. Y los minutos en cada uno de los ciclos, deben ser mayores a 6 min. Modificar el tiempo de avance para que los ciclos sean mayores de 6 min. En caso de que la suma no coincida nos pedirá que volvamos a capturar.

Resultados de la simulación del riego por surcos.



Resultado de la simulación del riego por surco, donde se muestra el área de riego y el área de infiltración.

En simular se muestra el avance del agua hasta el final del surco, la simulación continua mientras el tirante en la superficie va desapareciendo en el extremo aguas arriba del surco y se inicia la aplicación de las condiciones de frontera de la avance recesión simultáneamente, un tiempo después de haberse cortado el gasto, el tirante se hace cero y la infiltración se detiene.

Reporte del Sistema.

Al final se muestra la pestaña Reporte, que contiene las características generales de los parámetros ideales para un buen riego.

Gasto:	1.10	lps	Lámina media de infiltración:	4.7	cm
Longitud del terreno:	110	m	Lámina aportada:	5.3	cm
Pendiente del surco:	0.190	‰			
Rugosidad de Manning:	0.050	adim	Balance de masa		
Tiempo de riego:	66.00	min	Volumen aportado:	4.4	cm ³
Paso de tiempo:	2.0	min	Volumen escurrido:	0.6	cm ³
Contenido de humedad a saturación:	0.41	cm ³ /cm ³	Volumen infiltrado:	3.8	cm ³
Contenido de humedad inicial:	0.22	cm ³ /cm ³	Error:	0.539	‰
Espaciamiento de surco:	0.75	m	Tiempo de simulación:	88.0	min
Lámina de diseño:	5.3	cm	Tiempo de avance:	53.60	min
ks:	1.18	cm/hr			
hf:	36.08	cm	Eficiencias teóricas del riego		
Lamda:	6.59		Eficiencia de aplicación:	88.3	‰
Valor de rho1:	0.66440		Eficiencia de requerimiento:	88.0	‰
Valor de rho2:	2.87000		Coeficiente U. Christiansen:	90.6	‰

Al utilizar el botón impresión, se puede enviar la salida a una impresora o guardar la misma como un archivo de imagen en disco duro.

A cerca de.

Dentro del menú Ayuda se encuentra la opción acerca de, que consiste en mostrar la ventana de créditos.



Nota: Repetir el proceso cuantas veces sea necesario hasta que los parámetros de salida sean los óptimos o los deseados dando clic al botón datos y modificar los datos geométricos e hidráulicos.