

Riego por oleadas, ¿una relación entre la ciencia del suelo y las prácticas de riego?

Herman Depeweg y Saleh M. Ismail, IHE- Delft

Resumen

La práctica del riego superficial tiene miles de años y es uno de los métodos de riego más comunes hoy en día. Uno de los métodos de riego superficial, riego en surcos resulta en un buen manejo de agua de riego en parcelas y es altamente flexible bajo varias condiciones. El surco sirve dos funciones: Primeramente ofrece una superficie de infiltración y segundo lleva agua desde la cabecera del surco hasta el final. El escurrimiento en la parte baja y la percolación profunda más abajo de la zona radicular son las causas principales de una eficiencia menor en la práctica convencional. El riego en surcos se aplica en muchos de los sistemas de riego en pequeña escala de Bolivia y se caracterizan por tener parcelas cortas con pendientes relativamente empinadas, con grandes caudales de riego y tiempos de aplicación relativamente breves, dando como resultado altas pérdidas de aplicación.

El riego por oleadas podría mejorar la eficiencia de aplicación en el riego en surcos. En este método el agua es conducida desde la cabecera de la parcela hasta el final por oleadas. El flujo se detiene y vuelve a comenzar en intervalos regulares. Este flujo intermitente sella la superficie del suelo y reduce la escorrentía y la percolación profunda. El flujo por oleadas no reduce el requerimiento neto de agua del cultivo, pero puede mejorar la eficiencia de riego.

Cuando se suministra agua a un surco durante una duración dada, y luego se detiene el flujo para permitir que el surco se desagüe; la tasa de succión del surco se reduce dramáticamente. Los efectos combinados de una infiltración reducida mas el avance rápido con flujo por oleadas, conducen a una distribución mas uniforme del agua a lo largo del surco. Los mecanismos de la reducción de la infiltración y una mejora en el tiempo de avance han sido relacionados al sellado de la superficie, la consolidación de la capa superficial, y una reducción del gradiente hidráulica en la superficie. Ya que estos factores dependen de las propiedades físicas del suelo, es probable que todas ellas contribuyen a la reducción de la tasa de infiltración debido al mojado repetido. La magnitud de cada uno depende en particular del contenido de arcilla y de la estructura del suelo.

Existen datos sobre el riego por oleadas en surcos, pero aún se requiere de mas investigaciones, en particular para suelos arenosos y para parcelas de diferentes longitudes y pendientes para verificar que ellas exhiben el efecto del riego por oleadas. Mas investigaciones deben ayudar al desarrollo de las relaciones entre el caudal, longitud del surco y el tiempo de cada oleada, incluyendo la combinación óptima de caudal, tiempo y proporción de cada oleada, y el número de oleadas además de información con respecto a las mejores prácticas de manejo. Se requiere de mas información con respecto a la física de suelo para explicar las características específicas del riego por oleadas. Un caso especial son las muy comunes parcelas cortas, los

tiempos de aplicación requeridos para infiltrar la cantidad de agua deseada pueden conducir a un exceso de escorrentía y a una técnica de racionamiento de cortes óptima (optimal cutoff ratio technique) pueden ayudar a superar este problema.

Saleh M. Ismail (2000) investiga en el IHE, Delft las posibilidades de riegos por oleadas en parcelas pequeñas (como de 70 m); los hallazgos de una revisión literaria y los resultados preliminares de investigaciones en parcelas en Holanda constituyen el punto de partida para este artículo.

1. Introducción

A lo largo de la historia, la conducción del agua desde canales superficiales hacia los cultivos ayudó a prosperar a las sociedades. Desde el río Amarillo en China, hasta el valle de Nilo en Egipto, y la Amazonía en Sud América, llevar el agua a los cultivos ha sido una preocupación constante del hombre (Jina, 1998). Hoy en día aproximadamente un 60% de la producción de alimentos se origina de la agricultura a secano y el 40% restante de agricultura por riego (Hofwegen and Svendsen, 2000). Los sistemas de riego superficial no han cambiado esencialmente en como 5000 años. Los principios básicos de canales abiertos y flujo por gravedad siguen siendo iguales. Además, son los más baratos, pero también los menos eficientes. Sin embargo con el creciente requerimiento de comida, la reducción de áreas cultivables y la escasez de agua disponible se requieren cambios para mejorar la producción agrícola. Los ejemplos son:

- *Reciclar agua*: parte del agua de riego, que no es utilizado por los cultivos, como la escorrentía y la percolación profunda (alrededor de 40%), puede ser recolectada y utilizada.
- *Riego por oleadas*: una primera oleada de agua puede sellar el suelo haciéndolo menos permeable, absorberá menos agua, y por lo tanto más agua fluirá hacia los cultivos.
- *Tuberías y mangueras con aspersores* tienen brazos con una serie de aspersores que reparten el agua justo en el cultivo. Las nuevas tecnologías hacen que este método sea más factible.
- *Riego por goteo* se vuelve cada vez más accesible en todo el mundo, incorpora pequeños tubos en el suelo, los cuales suministran agua en pequeñas cantidades directamente a las raíces del cultivo.
- *Manejo campesino*: el éxito de los sistemas de riego puede ser directamente correlacionado al nivel del control que los granjeros tienen (Jina, 1998); por lo tanto la operación de muchos sistemas de riego ha sido transferida a los campesinos.
- *Cobros por el riego*: los usuarios de agua tienden a ser más cuidadosos y eficientes cuando tienen que pagar para los servicios de riego o por el agua, tal como lo ha comprobado la experiencia en muchos países.

La disminución de pérdidas de agua mejorara el uso del agua de riego, lo cual puede resultar en:

- Un área mayor que puede ser regada con el mismo volumen de agua;
- Menos competencia entre los usuarios de agua debido al incremento en la cantidad de agua;
- Un efecto menos severo de la escasez de agua
- Almacenamiento de agua para el año en curso o para el siguiente año;
- Un incremento mas lento en los niveles de agua subterránea, por lo tanto menores costos de inversión para el control de encharcamiento y salinidad;

- Un mejor uso de fertilizantes y pesticidas;
- La reducción de peligros a la salud y de costos de energía.

1.1 Métodos de riego

La práctica del riego superficial tiene miles de años y representa talvez tanto como un 90% de las prácticas de riego comunes hoy en día. La Comisión Internacional en Riego y Drenaje (ICID) define “el riego superficial,” como el método de riego en el cual el agua que se introduce en un borde de la parcela, se distribuye sobre la parcela por flujo por gravedad y gradualmente cubre toda la parcela antes de infiltrarse.

Los sistemas de riego superficial tienen varias ventajas:

- Son aplicados en todas partes, los regantes locales entienden bien cómo operar y mantener el sistema y con facilidad reemplazan el agua de la zona radical;
- Requieren de un capital de inversión mínimo a nivel de parcela y son menos afectados por condiciones climáticas o por calidad de agua;
- Son flexibles y relativamente fáciles de manejar, pueden sobrellevar suministros de agua menos frecuentes, más inciertos, y variables en caudal y en duración.

Algunas desventajas del riego superficial son:

- Son menos eficientes en la aplicación de agua que los sistemas de aspersión o goteo;
- Suelen demandar un trabajo intensivo;
- Es difícil aplicar riegos ligeros y frecuentes, como al comienzo y hacia el final del ciclo del cultivo.

Los métodos principales de riego superficial son riego por melgas, surcos y en surcos.

- El riego por melgas es el método de riego más común, particularmente en áreas con pequeñas parcelas. Una melga está nivelada en todas las direcciones, rodeada por un pequeño dique para prevenir el escurrimiento, y suministrada por un flujo no dirigido en la parcela. El riego por melgas es aceptable para la mayoría de los cultivos y suelos; especialmente con velocidades de infiltración moderadas a bajas y raíces profundas, los cultivos tupidos favorecen el riego por melgas.
- Las cajetas tienen una forma alargada y angosta, la parcela es dividida en franjas separadas por bajos montones de tierra, para un control óptimo del flujo las franjas son cuidadosamente inclinadas (graded) en la dirección predominante de la pendiente y son niveladas (level) perpendicularmente a la misma. El agua es suministrada desde un dique a lo largo de la curva de nivel mas alta y para aplicaciones uniformes de agua se utilizan cajetas alargadas. Los bordes o surcos son efectivos en pendientes mayores al 0.1% y en suelos con permeabilidad moderada a baja.
- En el riego por surcos el flujo en la parcela es dividida en flujos más pequeños, los cuales son canalizados por ‘surcos’, ‘pliegues’, o ‘arrugas’. El agua en el surco humedecerá la zona radicular, mientras que el agua avanza desde el tope hasta el final del surco (vea la figura 1). El avance depende casi completamente de la diferencia entre en flujo de ingreso y la infiltración en el suelo.

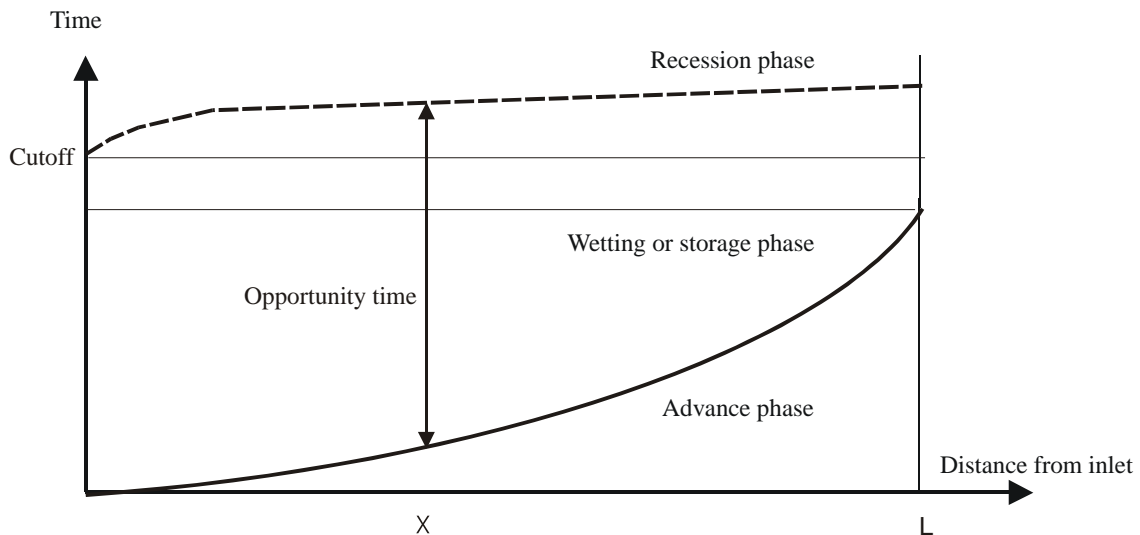


Figure 1 Fase de avance y de recesión en un surco

1.2 Riego en surcos

El flujo en surcos da como resultado una buena práctica de manejo de agua en parcelas y una alta flexibilidad bajo variadas condiciones. El flujo en cada surco resulta en infiltración en el perímetro, el agua se esparce verticalmente y horizontalmente y reemplaza el reservorio de humedad en el suelo. La descarga por unidad de ancho es bastante menor que por otros métodos de riego superficial y también la variación en la topografía puede manejarse con mayor facilidad.

Los surcos se clasifican como surcos en terreno plano, en contornos y surcos en terreno inclinado (*level, contour and graded furrows*).

- *Surcos en terreno plano* para suelos de textura fina, de permeabilidad muy lenta en tierras relativamente planas; son de pendiente plana a lo largo y generalmente tienen un pequeño dique en el extremo aguas abajo detiene el agua y minimiza la escorrentía. Se necesitan grandes caudales para tener una alta uniformidad de aplicación, pero no demasiado grandes en vista de la erosión
- *Surcos en contorno* tienen una pendiente suave y longitudinal. son curvos siguiendo la topografía y parcelas con pendientes de hasta 15 % pueden ser regadas (Bishop, 1967).
- *Surcos en terreno inclinado* son usualmente rectos y siguen la dirección predominante de la pendiente (la inclinación). Se requiere una nivelación para suavizar el terreno para una eficiencia de aplicación aceptable y uniforme. Erosión excesiva, baja eficiencia, y/o pobre uniformidad puede resultar de pendientes empinadas (> 2 %) o con suelos de textura gruesa.

Para obtener eficiencias aceptables se debe prestar especial atención a:

- Buena preparación del suelo y que no haya topes al final;
- Tiempos de avance no muy largos ni tampoco detener el flujo de ingreso muy pronto;
- El mismo tipo de suelo a lo largo del surco y precaución con los surcos en suelos arcillosos.

Altos niveles de eficiencia no son comunes en el riego superficial y por lo tanto el método no es económico cuando el agua está disponible en pequeñas cantidades. Los sedimentos en el agua rara vez ocasionan problemas, aunque pueden colmatar canales y elevar el nivel del suelo cuando son depositados en la parcela. Para un riego superficial eficiente la pendiente debe ser uniforme y no muy empinada. La inclinación del suelo es factible solamente para capas superficiales profundas y en superficies ligeramente onduladas. La pendiente debe ser mayor a 0.1 % para un riego eficiente, la pendiente máxima es limitada por el riesgo de erosión del suelo. El riego en surcos se recomienda para suelos con una tasa de infiltración baja a moderada (10 - 30 mm/hr), pero el riego liviano y frecuente es difícil con surcos u otros métodos superficiales. Todos los cultivos, excepto los que crecen muy tupidos, pueden ser cultivados en surcos. Los surcos son más adecuadas para cultivos que no pueden estar anegados por 12 o más horas. La tabla 1 compara las eficiencias de aplicación potenciales de los diferentes métodos suponiendo que los mismos están razonablemente bien diseñados y manejados (Clemmens et al, 94).

Tabla 1. Eficiencias de aplicación para sistemas de riego (Clemmens, 1994)

Método de riego	Eficiencia de aplicación en %
Melga – arroz	40 – 60
Melga	65 – 90
Cajeta – franjas	55 – 80
Surco	50 – 70
Surco moderno	60 – 80
Aspersor migrante (Traveling gun)	60 – 75
Aspersor con rotación lateral/movido a mano (Side roll/ hand moved)	65 – 85
Aspersor fijo (Solid set)	70 – 85
movimiento lineal/eje central (Linear move/Center pivot)	75 – 90
Micro: aspersión/ fuente puntual/ fuente en línea (spray/point source/line source)	85 – 90

* Riego moderno en surcos se refiere al racionamiento del caudal en cortes o al flujo en oleadas

En Bolivia el riego en surcos se aplica en muchos de los sistemas pequeños de riego y en parcelas cortas con pendientes relativamente empinadas, grandes caudales y tiempos de aplicación relativamente cortos los caracterizan. Además, los campesinos reciben el agua disponible a intervalos fijos y durante periodos fijos. Todos estos aspectos resultan en altas pérdidas de aplicación, las cuales podrían ser mejoradas usando melgas o introduciendo riego por flujo en oleadas.

En los métodos de riego superficiales, el suelo sirve dos funciones (Hill et al 1994). Primeramente, es una superficie de infiltración, el agua pasa por la superficie, ingresa la superficie y se desplaza a la zona radicular subyacente para saturarla. Sin embargo, mientras más tiempo se quede el agua en la superficie menor es la tasa de infiltración, lo que significa que menos agua infiltra hacia el final del riego que al comienzo. La segunda función del suelo es la de conducir agua desde la toma del surco hasta el final. El suelo tiene una función de conducción y de infiltración, que no pueden ser separados. Ya que el agua permanece más tiempo en el suelo cerca de la toma que

hacia el final del surco, más agua infiltrará cerca de la toma. Si permitimos que el agua fluya por un lapso de tiempo suficiente como para saturar completamente la zona radicular al final del surco, demasiada agua se aplicará cerca de la toma y ocurrirán pérdidas por percolación profunda. El escurrimiento en el extremo bajo del surco y la percolación profunda por debajo de la zona radicular son las causas principales de una baja eficiencia bajo prácticas convencionales, la cual puede mejorarse con aplicaciones de agua cuidadosamente manejadas.

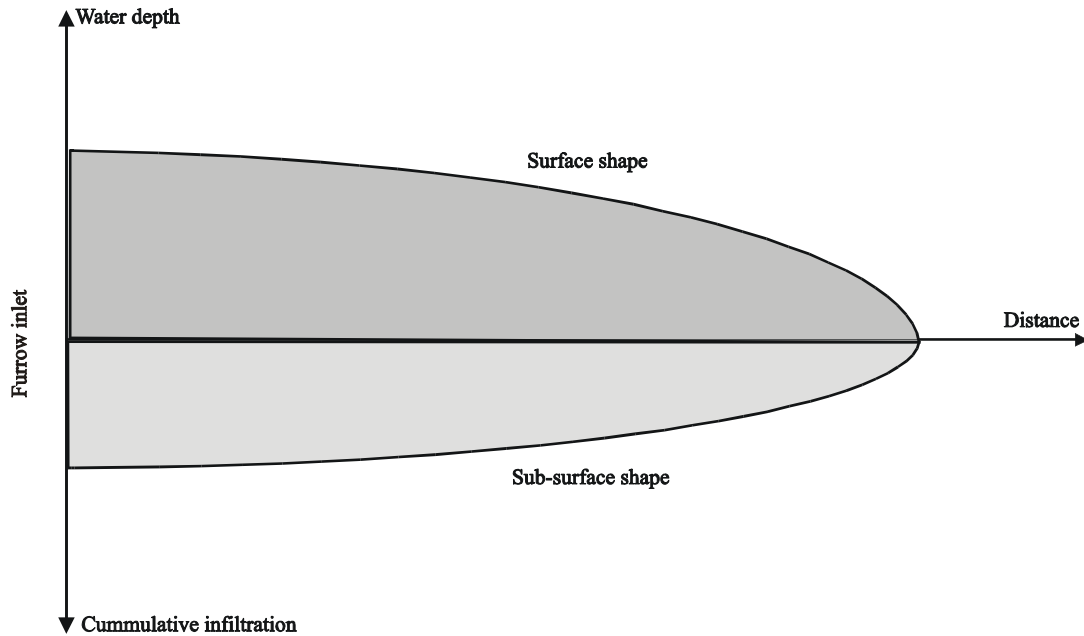


Figure 2 Perfiles de agua superficial y sub-superficial en el riego en surcos

Henggeler (1996) presentó algunas técnicas para mejorar la aplicación de agua a lo largo de un surco y a la misma vez minimizar las pérdidas de agua.

Nivelación de la tierra: para mejorar la distribución y facilitar el riego los surcos deben tener una pendiente adecuada para las condiciones específicas del suelo, lo que significa que la pendiente es ajustada a la magnitud del caudal, la longitud del surco, y la tasa de infiltración del suelo.

Corte: para una distribución a lo largo de todo el surco se requiere un gran caudal para que el agua fluya rápidamente hacia el extremo inferior. Esto puede resultar en escurrimiento excesivo, especialmente cuando el flujo es mantenido después de que el agua alcanza el extremo inferior. Idealmente, el flujo debiera ser lo suficientemente cuantioso para mantener agua a lo largo del surco sin que se salga del surco. Un flujo menor o un corte podría reducir las pérdidas y debe ser mantenido hasta que la cantidad requerida de agua infiltre. Esta práctica de corte resulta en un riego bastante uniforme y eficiente, pero el trabajo requerida es mayor y el manejo es menos simple.

Parcelas cortas niveladas: para llenar los surcos rápidamente con agua los surcos cortos pueden ser una solución. El sistema logra una distribución uniforme y una alta eficiencia de aplicación, pero los surcos cortos son más difíciles de manejar mecánicamente y la lluvia puede presentar problemas de drenaje.

Sistemas de re-utilización: muchos surcos tendrán escurrimiento excesivo después de que el agua llegue al extremo inferior. Los sistemas de recuperación/reutilización coleccionan y hacen recircular la escorrentía para lograr una mayor eficiencia de aplicación.

Riego por oleadas: la interrupción temporal del flujo en el surco y luego reaplicarlo mueve al agua hacia el extremo inferior del surco en un menor tiempo total de riego. Este flujo intermitente ayuda a reducir el escurrimiento y la percolación profunda.

2. Riego en flujo por oleadas

Hace casi dos décadas que los investigadores comenzaron a analizar el riego por flujo por oleadas como una manera de resolver algunas de las desventajas del riego en surcos. Shock et al (1997) definieron el flujo por oleadas como una herramienta para mejorar la eficiencia del agua aplicada por riego en surcos. En este método mejorado el agua es conducida desde la cabecera de la parcela hasta el final por oleadas, el flujo es detenido y recomenzado a intervalos regulares para poder conducir al agua mas rápidamente. Cuando se interrumpe el flujo temporalmente y luego se lo repone, el tiempo total de riego será menor. Inicialmente el flujo por oleadas ayuda a sellar la superficie y los flujos subsecuentes correrán con mayor rapidez. Por ello, en el flujo por oleadas el agua de riego es aplicada intermitentemente, mientras que en el riego continuo de surcos el agua es aplicada continuamente durante todo el turno de riego.

El riego con flujo por oleadas mejora la eficiencia al reducir la percolación profunda y la escorrentía y da como resultado un humedecimiento uniforme de la zona radicular, con diferencias menores en la profundidad de infiltración en la cabecera y al final del surco. El riego con flujo por oleadas contribuye a una mayor eficiencia de aplicación y a una distribución homogénea con disminuciones en las pérdidas de agua y de sedimentos (Walker and Skogerboe, 1987).

2.1 Aspectos de física de suelos del riego con flujo por oleadas

El mecanismo del riego con flujo por oleadas está basado en aplicar agua en una serie de olas intermitentes. Actualmente, muchos regantes se dan cuenta de las grandes mejoras en eficiencias de aplicación con riego en oleadas, tal como se publica en varias publicaciones, (USDI, 1993).

Hay dos fases durante el riego por oleadas:

- Fase avanzada, donde el agua avanza desde la cabecera del surco;
- Fase de corte cuando el flujo se reduce

Durante la fase de avance relativamente larga el agua fluye una cierta distancia desde la toma y después de un tiempo fijo el flujo es detenido. Después de algún tiempo el flujo es retomado y el ciclo se repite varias veces (normalmente 4 a 6 veces) hasta que el flujo llegue al extremo inferior del surco. Durante la fase de avance el periodo sin flujo debe ser lo suficientemente largo para desaguar el flujo lo suficiente y por completo. Solamente cuando la fase sin flujo es lo suficientemente prolongada se desarrollaran las ventajas de flujo en oleadas por completo. El llenado y vaciado cíclico suaviza la superficie del surco, disminuye rápidamente la tasa de infiltración, y reduce la percolación profunda. Estos cambios en el comportamiento del suelo y en las condiciones del surco resultan en un uso de agua más eficiente durante la segunda fase de retroceso. Durante esta fase el agua fluye continuamente, se infiltra uniformemente, pero la tasa de flujo es mas o menos la mitad de la tasa para aplicaciones continuas convencionales.

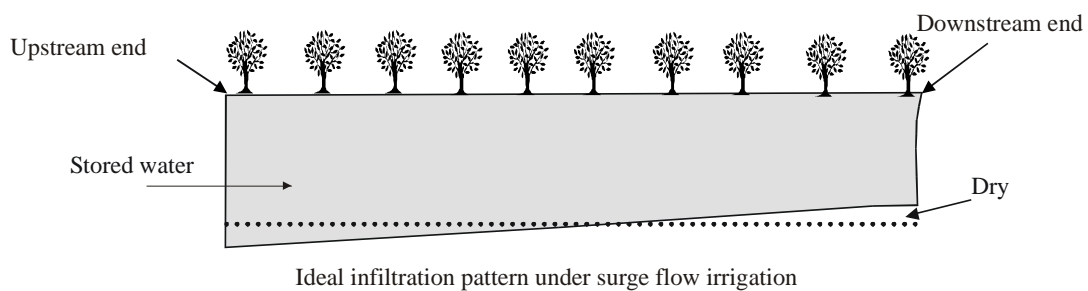
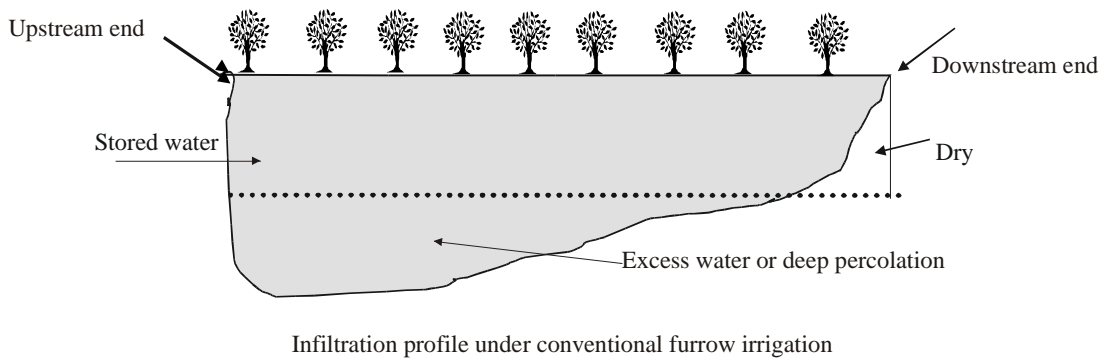


Figura 3 Perfiles de infiltración del riego en flujo por oleadas y en flujo continuo

Belt (1993), explica el riego en flujo por oleadas usando dos aspectos consistentes. Primeramente, durante la fase inicial de humedecimiento el agua que fluye suaviza el surco y deshace los grumos. En segundo lugar, durante la fase de desagüe las partículas de suelo cambian de orientación, dando como resultado el sellado de la superficie. Estos dos efectos cambian la permeabilidad del suelo y reducen la infiltración durante la siguiente oleada. Lo más probable es que efecto de las oleadas puede relacionarse al desarrollo acelerado del sellado con partículas de suelo muy finas creado por el agua en movimiento. Durante la fase de desagüe este sello se consolida por una acumulación de presión negativa.

La tasa de infiltración es alta cuando el agua se contacta con el suelo por primera vez, pero la infiltración disminuye a un valor casi constante cuando el flujo es continuado. Si el agua es detenida y se permite su infiltración, las partículas superficiales se consolidaran formando un sello. Cuando se reinicia el suministro de agua, la tasa de infiltración es mas baja debido a este sellado, dando como resultado más agua que escurre más debajo en el surco con menos agua que se infiltra en la parte ya humedecida que si el agua se aplicara continuamente (Yonts, 1995). En la fase de desagüe ocurre también algo de sellado del suelo debido a la continua infiltración, inclusive después de haber desaparecido el agua, al romper algo del flujo capilar en el suelo.

En el riego por oleadas se distinguen cuatro mecanismos específicos:

- La deposición de sedimentos en suspensión;
- La consolidación debido a la tensión temporal del agua del suelo durante las interrupciones al flujo;
- El relleno de grietas y mayores densidades;

- Tasa de humedecimiento.
- *Deposición de sedimentos en suspensión.* el material de suelo a lo largo del perímetro de un surco que está suministrado con agua limpia a una tasa de flujo “no erosiva” (SCS, 1983), se desintegra tan rápidamente que se desarrolla una cantidad importante de transporte de fondo a unos cuantos metros de la toma (Brown et al, 1986). En esta parte superior, donde ocurre la tasa de erosión más rápida, se observa muy poco sedimento en suspensión. El agua ejerce fuerzas lo suficientemente altas en los pequeños agregados como para hacerlos rodar hacia abajo a lo largo del surco hacia nuevas posiciones como carga de fondo, donde la fuerza del agua no es suficiente como para mantenerlas rodando. El material que rueda y rebota será desintegrado, por los agregados en movimiento y por aquellos en la superficie, por lo que a unos 20 m de la toma una cantidad apreciable del sedimento en suspensión se observa. Las diminutas partículas de limo y arcilla continúan en movimiento, ya que sus velocidades de asentamiento son menores que las velocidades turbulentas hacia arriba. Una gran parte de las partículas continuarán en suspensión y abandonarán el surco junto con la escorrentía especialmente con grandes caudales. (Brown, 1987). Durante el primer riego, el fondo de los surcos ligeramente inclinadas se recubren muy rápidamente con estos pequeños agregados y normalmente la sección transversal de los surcos cambia de una V a una U con un fondo plano, el cual se ensancha y se vuelve menos hondo. Después de cortar el flujo, el sedimento fino en suspensión es depositado y una delgada capa en el perímetro reduce la infiltración en un 50% mas o menos. Shainberg (1985) halló que algunos sedimentos finos depositados pueden reducir las tasas de infiltración a solamente unos pocos puntos porcentuales de las tasas no selladas.

Las oleadas también crean grandes tensiones de corte en el perímetro cuando el borde delantero corre a lo largo del fondo que ha sido previamente humedecido. La profundidad de este borde delantero puede ser de solo unos milímetros, pero la profundidad que aumenta rápidamente detrás del borde causa que la ola viaje tan rápido como la velocidad total del flujo. La tensión de corte es proporcional a la velocidad para la misma sección transversal y a la profundidad de agua para la misma velocidad. La tensión de corte es proporcional a la velocidad para la misma sección transversal y la profundidad de agua para la misma velocidad. Consecuentemente, el delgado borde delantero ejercerá tensión de corte, aflojará las partículas que no esten firmemente ancladas y las moverá a nuevos nichos en el lecho. Estas tensiones proporcionan sedimentos adicionales, el cual es efectivo en reducir la infiltración. Eisenhauer (1983) observó disminuciones en la tasa de infiltración con aumentos de la fuerza de corte ejercida por agua fluyente en tests controlados con aforadores.

- *Consolidación* ocurre especialmente cuando el flujo se corta y los grumos y agregados grandes se han desintegrado en agregados más pequeños gracias a las fuerzas ejercidas por el agua fluyente (Kemper et al, 1985b). La gran parte del recientemente formado lecho consiste en deposiciones finas y tiene una menor densidad y una permeabilidad relativamente alta. Después de cortar el suministro, el agua es absorbida y los sedimentos finos son depositados en los poros más grandes como una fina capa en el perímetro. El suelo mas profundo y seco continúa absorbiendo agua desde el perímetro, lo cual crea tensión adicional entresuelo agua. El llenado de los grandes poros en la capa del tope por sedimentos finos aumenta la

tensión máxima agua - suelo que es alcanzada antes de que el aire ingrese en esta capa. Después de que el aire ingresa en el espacio entre poros la tensión ya no ejerce una fuerza compactante en la capa entera, pero agrupa partículas de suelo juntas que descansan entre los poros llenos de aire. El continuo incremento de tensión resulta en el encogimiento y consolidación de los agregados en los vacíos más grandes del suelo. Donde estos vacíos más grandes están adyacentes entre sí, forman planos de cohesión mínima, algunas de los cuales son los precursores de rajaduras por encogimiento

Tan pronto como desaparece el agua de los surcos recientemente regadas, se forman grietas en esos lugares donde el aire ingresa en el suelo y elimina la tensión de agua como una fuerza cohesiva. Ya que el material recientemente disturbado no tuvo ningún tiempo para desarrollar lazos minerales entre las partículas, solamente la tensión del agua en el suelo las mantiene unidas (Kemper, 1987). Se hincha menos en dirección horizontal que lo que se encoge durante la interrupción, debido a que la carga de fondo ya ha rellenado una parte de estas grietas durante la nueva oleada. Las muestras de suelo han demostrado que hay menos encogimiento para el riego en flujo por oleadas que para el riego continuo. También la densidad de las muestras de suelo tomadas del riego por flujo en oleadas y por flujo continuo en surcos muestra diferencias de 10 –20%. La gran diferencia en densidad entre flujo en oleadas y flujo continuo en surcos puede explicar la reducción de la infiltración. Sin embargo las densidades observadas, relativamente bajas, inclusive con flujo por oleadas, ocasionan dudas en cuanto a la permeabilidad de las capas por debajo de la superficie desde la restricción primaria de movimiento de agua.

- *Tasa de mojado.* Existen observaciones que demostraron que la estabilidad de los agregados disminuye cuando la tasa de humedecimiento aumenta. Además la estabilidad de los agregados grandes depende no solamente de la tasa de mojado, pero también del contenido de agua inicial. Cuando grandes agregados secos son mojados rápidamente, se desintegran en pequeños agregados, que son transportados por el agua en movimiento. Caudales mas grandes que aumentan las velocidades de flujo y por lo tanto el mojado del perímetro, tienen como resultado erosiones mas altas de las que se esperarían únicamente por las tasas de flujo más altas. (Kemper, 1985c). La comparación del avance en surcos con el mismo flujo por oleada y para flujo continuo muestra que la velocidad del frente de avance es 2 a 20 veces mayor para el flujo en oleadas que para el flujo continuo.

Cuando el frente delantero del flujo continuo avanza lentamente, las fuerzas capilares humedecen una porción más grande del perímetro. En cambio cuando el frente delantero avanza rápidamente, tal como en el riego por flujo en oleadas, el humedecimiento de los grumos a lo largo del perímetro es mucho más veloz. Para este tipo de mojada la parte externa del grumo es a menudo remojada antes que el interior. Cuando el agua es absorbida en el interior del grumo por fuerzas capilares, el aire atrapado en el interior se comprime y escapará por una explosión que desintegra el grumo. Los pequeños agregados resultantes se convierten en sedimentos en suspensión, que se asentarán durante la siguiente interrupción del suministro y sellaran el perímetro de el surco.

Los mecanismos de la infiltración reducida y las mejoras en el tiempo de avance han sido atribuidos al sellado de la superficie, consolidación de la capa superficial, y reducción del gradiente hidráulico en la superficie. Ya que estos mecanismos dependen

de las propiedades físicas del suelo, es probable que todas ellas contribuyen a la reducción de la tasa de infiltración debido al humedecimiento repetido. El alcance de cada mecanismo depende de las propiedades texturales del suelo, particularmente el contenido de arcilla y de la estructura. Por lo tanto, el sellado y la consolidación son probablemente los mecanismos dominantes en suelos de textura fina durante los primeros riegos, y el efecto de un gradiente hidráulico reducido es opacado por las conductividades extremadamente bajas que resultan en estos suelos. En cambio, en suelos de textura gruesa, el sellado y la consolidación darían como resultado una reducción mínima de la tasa de infiltración, mientras que la reducción del gradiente hidráulico tendría un efecto importante, el cual sería evidente a lo largo de toda la temporada de riego (Killen et al 1987).

3. Parámetros en el riego con flujo por oleadas

Los criterios para la disposición, diseño y manejo para los surcos pueden ser divididos en general en parámetros específicos. Los lineamientos generales son válidos tanto para surcos con flujo continuo como para riego por oleadas. Los lineamientos específicos solamente son válidos para riego con flujo en oleadas. Los parámetros generales incluyen pendiente del surco, longitud, rugosidad, lomas, forma y ancho, caudal y velocidad de toma. Los parámetros específicos incluyen duración del ciclo y razón del ciclo.

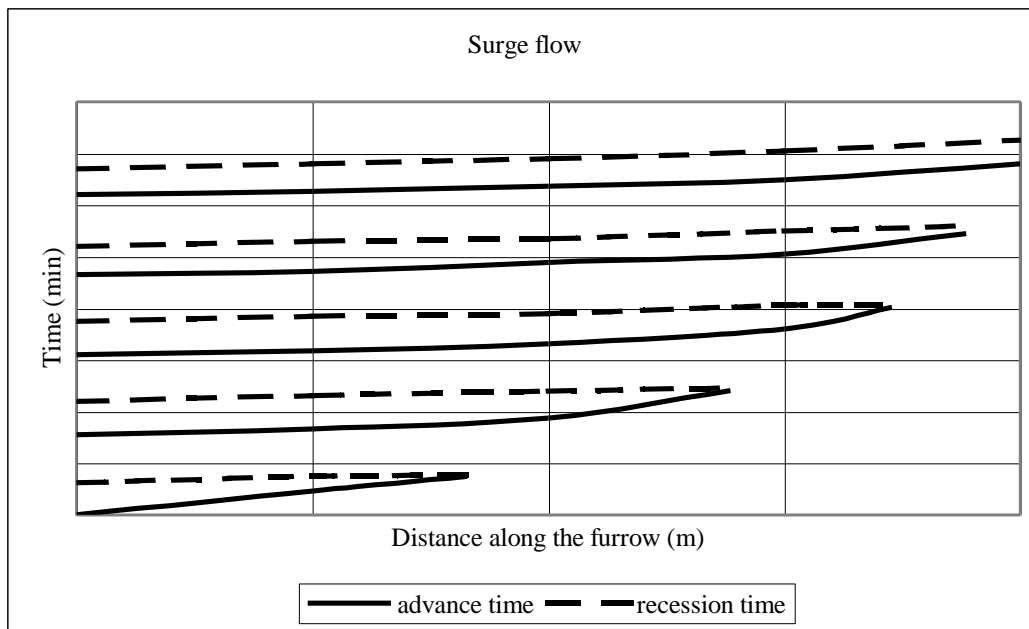


Figura 4 Fase avanzada para riego con flujo por oleadas con 5 oleadas.

3.1 Parámetros generales

Pendiente de el surco

Los surcos inclinados deberían ser rectos y paralelos hasta el final de la parcela y alineados a lo largo de la pendiente principal. Para evitar una nivelación costosa de la tierra y restricciones a las profundidades radiculares, las pendientes longitudinales son adaptadas tanto como sea posible a la topografía natural. Los surcos preferentemente tienen una pendiente uniforme, se requiere una pendiente mínima de 0.1% para permitir

que el agua fluya aguas abajo en el surco y para drenar cualquier exceso de agua. El riego de erosión de suelo determina la pendiente máxima; el flujo no debe erosionar el surco y la pendiente máxima normalmente está relacionada a una magnitud de caudal no erosivo. Los surcos con una pendiente de 0.1% pueden conducir flujos mayores a 3 l/s sin problemas, pero en la práctica este flujo resultará en el rebalse de la mayoría de los surcos.

Tabla 2. Pendiente máxima en % para diferentes tipos de suelo

Tipo de suelo	Pendiente máxima en %
Arenoso	0.25
Franco arenoso	0.40
Franco arenoso fino	0.50
Franco	1.25
Arcilla	2.50

Longitud de el surco

La longitud óptima de el surco es normalmente el surco más larga que puede ser regada sin problemas y eficientemente. La longitud de el surco depende mucho de las características del suelo, de la magnitud del caudal, de la profundidad de riego y de la pendiente (tabla 3). Los surcos pueden ser mas cortas en suelos arenosos y porosos que en suelos pesados arcillosos. Sin embargo, cuando la longitud es mucha, el agua remoja hasta percolación profunda en la toma antes de que el caudal llegue a la parte baja. Los surcos cortas requieren mas canales de distribución, lo cual involucra pérdida de parcela e incremento de trabajo. La longitud de un surco, que pueda ser regada eficientemente, puede ser tan corta como 45 m en suelos con una alta tasa de infiltración o tan larga como 300 a 400 m o más en suelos con una baja tasa de infiltración. El tiempo requerido para que el agua avance aguas abajo en el surco aumente dramáticamente con la longitud de el surco. Por ejemplo, el tiempo para que el agua avance 800 m es tres veces mayor al tiempo para que avance 400 m.

Tabla 3. Longitud de surco para diferentes tipos de suelo y para diferentes profundidades de riego

Longitud de surcos en m										
Pendiente %	Caudal máximo l/s	Arcilla		Franco			Arena			
		Profundidad promedio de riego F_n en mm								
		75	150	50	100	150	50	75	100	
0.1	3.0	340	440	180	340	440	90	120	190	
0.2	2.5	370	470	220	370	470	120	190	250	
0.3	2.0	400	500	280	400	500	150	220	280	
0.5	1.2	400	500	280	370	470	120	190	250	
1.0	0.6	280	400	250	300	370	90	150	220	
2.0	0.3	220	270	180	250	300	60	90	150	

En suelos arenosos el agua se infiltra rápidamente y los surcos deben ser cortas para que el agua fluya rápidamente hacia el otro extremo. Si el surco es muy larga para el caudal, se perderá demasiada agua en percolación profunda. En suelos arcillosos el agua infiltra mas lentamente y los surcos pueden ser mas largas, inclusive cuando solamente pequeños caudales están disponibles. Si la longitud del surco no está de

acuerdo con el caudal, el agua no alcanzará el otro extremo o puede ocurrir un exceso de escurrimiento. Los surcos pueden ser mas largas en el mismo suelo para un tamaño de caudal mayor, ya que el agua avanzará mas rápidamente aguas abajo en los surcos. La aplicación de mayores profundidades de riego también requiere de surcos más largas. Cuando los surcos se usan en pendientes mayores (hasta un 0.3%) usualmente son mas largas en la medida que el agua recorre rápidamente en los surcos. Para pendientes mayores al 0.3% caudales más pequeños y consecuentemente longitudes de surco mas cortas se utilizan para prevenir la erosión. Ya que la profundidad de riego está relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y con la profundidad radicular del cultivo, los surcos para cultivos con raíces profundas en suelos arcillosos son mas largas que para cultivos con raíces poco profundas que crecen en suelos arenosos.

Rugosidad de el surco

La rugosidad hidráulica de un surco determina la velocidad de flujo e incorpora la rugosidad de la pared y las características geométricas del canal. Los coeficientes de Chézy, Manning y Strickler son los más conocidos. La Tabla 4 muestra algunos valores del coeficiente Manning.

Tabla 4. Valores de Manning n recomendados

Fuente	n	Condiciones
SCS(1974, 1984)	0.04	Superficie de suelo desnuda suave y con surcos
SCS (1974, 1984)	0.10	Cultivos de grano pequeño, barrenados, si las filas barrenadas van en la dirección del flujo de agua y de los pliegues
SCS (1974)	0.15	Alfalfa, broadcast small grains
Clemmens (1991)	0.20	Alfalfa densa o alfalfa parcelas largas sin zanjas secundarias
SCS (1974)	0.25	Cultivos densos de césped y granos pequeños barrenados perpendicularmente al flujo

Bordes de surcos

La altura de los bordes de los surcos junto con la pendiente del terreno determina la capacidad de un surco. Si los bordes son demasiado bajos rebalsaran y bordes demasiado altos requieren un gran volumen de agua para regar la zona radicular adecuadamente, pero tienen un gran volumen de suelo drenable. Generalmente alturas de los bordes varían de 0.15 m a 0.4 m. La misma está limitada por la altura desde el suelo de los equipos mecánicos. La distancia entre bordes está basada en el espaciamiento de optimo de cultivos, el cual puede modificarse de ser necesario para obtener un humedecimiento lateral adecuado y para acomodar la huella de los equipos mecánicos. El rango de espaciamiento entre surcos va de 0.3 m a 1.8 m, el promedio es de alrededor de 1.0 m. Suelos más arenosos con humedecimiento más vertical tienen un espaciado entre surcos menor que en suelos arcillosos.

Forma de los surcos

La eficiencia de los surcos depende de su forma, la cual es normalmente en V. El ancho varía entre 250 - 400 mm y la profundidad de 150 - 300 mm. El ancho de el surco depende del caudal, tipo de suelo, cultivo y equipos de arado. La forma depende mucho de la pendiente del terreno y de la estabilidad del suelo. Mientras más empinada la pendiente mayor la velocidad y menor la profundidad de agua para un caudal dado en un surco de forma dada. Pendientes mayores necesitan surcos más anchas para incrementar el área mojada. Los surcos de base ancha son más adecuada para

pendientes de 0.5 % o mayores. Recíprocamente, mientras más suave las pendientes menor es la capacidad de el surco y de ahí la necesidad de bordes altos y empinados.

En suelos arcillosos el agua se infiltra muy lentamente y entonces los surcos anchas y poco profundas son necesarias para aumentar el área a través de la cual el agua puede ser absorbida. En suelos arenosos el agua se infiltra con mayor velocidad y la infiltración disminuye cuando el área es menor, lo que significa surcos angostas y hondas. Cuando sembramos semillas o transplantamos plantas es importante que el suelo en el borde esté completamente humedecido, lo cual se logra de mejor manera usando surcos poco profundas. A medida que crece el sistema de raíces, los surcos pueden ahondarse para mejorar la infiltración y para incrementar la capacidad de el surco.

Caudal de el surco

La aplicación de la profundidad de riego requerida depende del caudal. El caudal es normalmente entre 0.2 y 3 l/s y mientras más grande el caudal más grande el surco. En suelos más permeables el flujo máximo no erosivo debe ser utilizado para humedecer el surco. El caudal máximo sería $0.6/S$ (l/s), donde S es la pendiente (%). El caudal debería ser menor al máximo, pero aún lo suficientemente grande como para obtener una aplicación de agua relativamente uniforme. Otra limitación es la geometría de el surco, la cual normalmente no puede transportar mas de unos 3 l/s sin rebalsar.

Tasa de infiltración

La tasa de infiltración de un suelo varía con el tiempo, pero también varía con la pendiente, la textura del suelo, y el espaciamiento entre surcos y la compactación del suelo. Inicialmente, el agua se infiltra rápidamente, pero al cabo de una o dos horas la infiltración disminuye a una tasa que es relativamente constante por el resto del riego. Esta tasa de infiltración relativamente constante es la tasa básica de infiltración. Los suelos con una tasa de infiltración baja necesitan surcos mas largas, mayores tasas de infiltración requieren parcelas mas cortas (Benham et al 1998).

3.2 Parámetros específicos

El flujo en oleadas no reduce los requerimientos reales del cultivo, pero puede mejorar la eficiencia de riego y permite que una parcela sea abarcada más rápidamente cuando se lo usa de manera adecuada. La aplicación adecuada de agua para cumplir con los requerimientos de cultivo es muy importante. Por lo tanto para el riego con flujo en oleadas existen algunos parámetros adicionales.

Tiempo del ciclo

El tiempo del ciclo necesario para completar un ciclo flujo corte (tiempo de flujo mas tiempo de corte) Según Henggeler (1996) los tiempos de ciclo apropiadas varían desde unos minutos a varias horas dependiendo del suelo, longitud de el surco, caudal y otras variables. El tiempo de corte para cada ciclo debe ser lo suficientemente prolongado para desaguar el surco antes del siguiente pulso. El tiempo del flujo y el caudal dependen de la pendiente, infiltración, y longitud de surco.

Después de que el pulso alcanza el final de el surco, el riego es continuado con una caudal menor hasta que la profundidad requerida al final de el surco es suministrada. En suelos con tasas de infiltración bajas, minimizando la escorrentía mientras se

obtiene la profundidad requerida de riego en el suelo en el extremo aguas abajo puede ser difícil. Existen dos posibles estrategias de manejo. Reducir el tiempo del ciclo hasta que se cree un flujo permanente en retroceso, o abrir ambos lados de la válvula de flujo y regar los surcos a ambos costados con un caudal reducido (en retroceso) (Henggeler et al 1996).

La razón de ciclo es el tiempo de flujo dividido entre el tiempo de ciclo. Teóricamente, esta razón puede ser cualquiera, pero en la práctica normal en parcelas dos juegos iguales de surcos son regados a la misma vez, el tiempo de flujo de un grupo es igual al tiempo de corte del otro grupo y la razón de ciclo es 0.5 (Henggeler et al 1996).

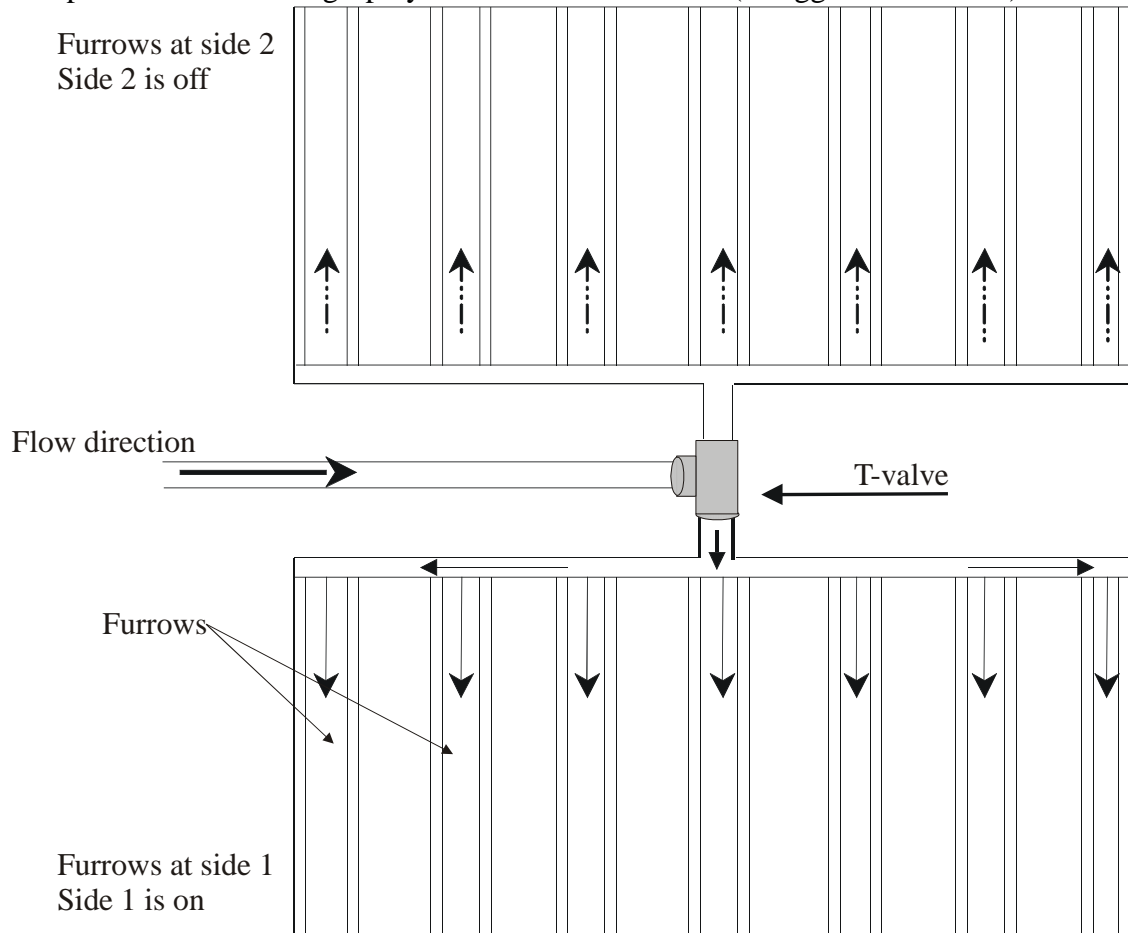


Figure 5 Posible disposición de una parcela para riego con flujo en oleadas

Caudal de el surco

La aplicación de la profundidad de riego requerida depende del caudal, Una vez conocido el caudal, se puede calcular la profundidad promedio del agua aplicada a un área (Benham et al 1998):

$$\text{Gross depth (m)} = \frac{0.073 \times \text{stream size (l/s)} \times \text{application time (s)}}{\text{furrow length (m)} \times \text{furrow spacing (m)}}$$

Se puede lograr una razón apropiada de corte y un promedio uniforme de agua aplicada con un mínimo de pérdidas por percolación profunda y escurrimiento. Para hallar la configuración óptima para un riego en una parcela en particular requiere de experimentos con diferentes combinaciones de caudal y de tiempo. La mejor combinación es una que mueva el agua hasta el extremo bajo de el surco en un tiempo

comprendido dentro de los requerimientos de la razón de corte, que sea menor que el caudal máximo no erosivo y que resulte en una aplicación promedio sin excesos (Benham et al 1998).

4. Evaluación del riego con flujo en oleadas

El flujo en oleadas funciona en muchos, pero no en todos los suelos. Las experiencias de riego con flujo continuo normalmente indican si el flujo en oleadas sería beneficioso. Por ejemplo, si hay una diferencia notoria en la velocidad con la cual el agua recorre aguas abajo en el surco por la primera vez comparada a riegos subsecuentes, entonces el flujo en oleadas puede ser beneficioso. (Henggeler et al 1996). Las ventajas del riego con flujo en oleadas son un aumento en la economización de agua, mejoras en los rendimientos de cultivo y menor carga de sal, y la posibilidad de usar riego con fertilizantes.

Cuando el agua es suministrada a un surco durante un tiempo dado, y el corte para permitir que el surco desagüe, la tasa de infiltración de el surco se reduce dramáticamente. Por lo tanto, cuando la segunda oleada es admitida, menos agua infiltrará en el suelo de la que infiltraría de otra manera, por lo tanto mas agua está disponible para las partes que aun están secas, y el avance es más rápido. Los efectos combinados de una infiltración reducida mas el avance más rápido con flujo en oleadas, conducen a una distribución de agua mas uniforme a lo largo de el surco. En algunos suelos, la mismo cantidad de agua que normalmente se requiere para llegar hasta el extremo inferior de un surco puede ser repartido para abarcar dos surcos con flujo en oleadas. Por lo tanto, la uniformidad de la aplicación mejora significativamente. (Hill et al, 1994).

El segundo ahorro de agua ocurre durante la fase de corte. Un ciclaje rápido del flujo de agua en la fase de corte reduce la velocidad de flujo y por lo tanto la escorrentía se reduce durante el tiempo necesario para saturar la zona radicular completamente. En la situación ideal, solamente se admitirá el agua suficiente en un surco para suministrar los requerimientos de infiltración (Hill et al, 1994).

El rendimiento del cultivo es mejorado con una aplicación uniforme, también el riego excesivo en la cabecera e insuficiente en el extremo inferior son prácticamente eliminados. El crecimiento de cultivo es mucho más uniforme a lo largo de la parcela. Junto con una disminución en percolación profunda la cantidad de sal no deseada es reducida (Bartholomay, 1991).

El riego con flujo por oleadas aumentará la eficiencia de la aplicación de fertilizantes (Champion y Bartholomay, 1991). Dependiendo del sistema y de la topografía, la aplicación de fertilizantes puede mejorar considerablemente. Muchos sistemas de riegos superficial dan como resultado una mayor escorrentía del fertilizante y una menor uniformidad de aplicación. La posibilidad de agregar fertilizantes con riego en flujo por oleadas puede ser una ventaja importante. Se puede agregar fertilizante de nitrógeno y fósforo líquido en un sistema de flujo por oleadas.

Algunas desventajas potenciales del riego en flujo por oleadas, suponiendo una programación adecuada del calendario de riego, son:

- Puede que no siempre reduzca el tiempo de avance, pero entonces siguen habiendo reducciones en pérdidas de agua debido a menores tasas de infiltración;
- Si las tasas de infiltración son reducidas, puede almacenarse menos agua en la zona radical y se necesitan riegos más frecuentes o tiempos de riego más largos para evitar regar de menos;
- Su aplicación está limitado a terrenos, que son adecuados para el riego superficial (Yonts, 1995 and Evans 1990).

Existen datos de riego con flujo por oleadas, pero aun hacen falta mas investigaciones, particularmente para suelos arenosos y parcelas de diferentes longitudes y pendientes para demostrar que exhiben el efecto de flujo por oleadas (Coolidge, 1982). Investigaciones posteriores tienen que examinar los tiempos de ciclo óptimos y las velocidades de flujo de corte para varias configuraciones de suelos y pendientes para un escurrimiento mínimo y para tener diferencias mínimas en el agua del suelo entre la cabecera y el extremo inferior de los surcos. Las nuevas investigaciones deben desarrollar las relaciones entre caudal, longitud de surco y tiempo de flujo, incluyendo la combinación óptima de caudal, tiempo y razón de ciclo, y número de oleadas e información con respecto a las mejores prácticas de manejo. También la variabilidad del flujo en oleadas en surcos compactadas y no compactadas necesita mayores investigaciones. Para entender el riego con flujo en oleadas se necesita aun más información de la física de suelos del flujo en oleadas (Smerdon, 1985). Un caso especial de las parcelas cortas, porque los tiempos de aplicación requeridos para infiltrar la cantidad de agua deseada pueden conducir a un escurrimiento excesivo y a una técnica de razón de corte óptima puede ayudar a sobrellevar este problema.

5. Conclusiones y recomendaciones

Los métodos dominantes de riego en el mundo son los métodos de riego superficial y el método de uso mas difundidos para todos los tipos de cultivos agrícolas es el riego en surcos, cuya eficiencia podría ser incrementada convirtiendo el riego con flujo continuo a riego con flujo en oleadas

Los motivos para el riego con flujo por oleadas son:

- El riego con flujo por oleadas se aplica a todo tipo de terrenos, que son adecuadas para riego superficial, puede ser utilizado en surcos o melgas, y es adecuado para muchos cultivos;
- El riego con flujo por oleadas no es caro de adoptar en relación al beneficio de usar menos agua para riego, algunos agricultores cortan los gastos de riego en un 50 % (Hill, 1994);
- El costo de inversión para riego con flujo en oleadas es mucho menor que para riego con aspersores o por goteo (Henggeler, 1996). Existen datos de referencias literarias muestran que su retorno neto es el mas alto en comparación con otros sistemas, incluyendo sistemas de baja presión con eje central, surcos, por inundación, y goteo subsuperficial (Williams, 1996). El sistema con flujo por oleadas tiene el mas alto retorno neto bajo condiciones típicas de riego para granos y sorgo y maíz;
- El flujo por oleadas es un método efectivo de riego para una producción de cultivo mayor (Amer, 1998, Hill et al 1994 and Miller et al 1991);
- El riego con flujo por oleadas puede ahorrar como 10% - 40% de agua debido a una eficiencia incrementada. La eficiencia será mayor en parcelas planas e inclinadas.

- Con un manejo adecuado casi toda el agua en exceso puede ser eliminada, dependiendo del tipo de suelo, pendiente del terreno, longitud de surco y manejo;
- El efecto de riego en flujo por oleadas en los parámetros hidráulicos de riego en surcos da como resultado una infiltración reducida, rugosidad disminuida y una distribución de agua altamente uniforme. También las pérdidas por percolación profunda pueden disminuir entre 6 – 12 %, mientras las pérdidas por escurrimiento pueden reducir en un 10 - 30 %;
 - El riego con flujo por oleadas disminuye los requerimientos netos de agua, mejora la eficiencia de riego y la distribución, y reduce la percolación profunda. Sin embargo, el número óptimo de oleadas, el tiempo de ciclo, la razón de ciclo y el caudal de ingreso deben ser optimizados dependiendo de las características de infiltración del suelo y los requerimientos de riego que deben ser satisfechos en el extremo inferior de el surco.

6. Referencias Bibliográficas

- Amer, M. H., 1998. *Surge irrigation as a farm practice for cotton production*. Zagazig Journal of Agriculture. Research, Vol.: 25 (4) 659 – 669. Zagazig, Egypt.
- Bartholomay, R. C., 1991. *Surge irrigation lowers salt loading in the Colorado River*. Irrigation Journal. September/October, 1991
- Belt, J. A., 1993. *Surge offer hope for surface irrigation efficiency*. Irrigation Journal, March, 1993.
- Benham B. L. D. E. Eisenhauer, C. D. Yonts and D. Varner, 1998. *Managing furrow irrigation systems*. Electronic Version: <http://www.ianr.unl.edu/pubs/irrigation/g1338.htm>
- Bishop, A. A., W. R. Walker, N. L. Allen and G. J. Poole, 1981. *Furrow advance rates under surged flow systems*. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE. Vol. 107, No IR3, P 257 – 264.
- Brown, M. J. and W. D. Kemper, 1987. *Using straw in steep furrow to reduce soil erosion and increase dry bean yield*. Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 42, No. 3, P 187 – 191.
- Champion, D. F., R. C. Bartholomay, 1992. *Fertigation through surge valve*. Cooperative Extension, U.S. Department of Agriculture, Colorado State University, Colorado.
- Clemmens , A. J. 1991. *Feedback control of a basin irrigation system*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE. Vol. 118, No. 3, P 480 - 496.
- Clemmens, A.J., and A. R. Dedrick, 1994. *Irrigation techniques and evaluations*. Chapter 7, p. 64-103. In K.K. Tanji and B. Yaron (eds). Management of water use in agriculture, Adv. Series in Agriculture Sciences, Vol. 22, Spring- Verlag, Berlin.
- Coolidge, P. S., W. R. Walker and A. A. Bishop 1982. *Advance and runoff – surge flow furrow irrigation*. Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE. Vol. 108, No. IR1, P 35 – 42.
- Depeweg, H. W. Th., 1996. *Field irrigation and drainage, Low head and overhead irrigation methods*. Lecture Notes, IHE Delft, The Netherlands
- Depeweg, H. W. Th., 1998. *Field irrigation and drainage, Surface irrigation methods*. IHE Delft, The Netherlands.
- Eisenhauer, D. E., D. J. Stieb and H. R. Duke, 1983. *Transient surface seal development with shallow overland flow*. ASAE, Paper No. 83 – 2051, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

Henggeler, J. C., J. M. Sweeten and C. Wayne Keese, 1996. *Surge flow irrigation*. Texas Agricultural Extension Service (TAEX) and Texas Agricultural Experiment Station (TAES) in Cooperation with Texas Water Resources Institute (TWRI).

Hill, R. W. and G. Stringham, 1994. *Surge flow TM irrigation*. Call Farms, Layton, Utah. Utah State University, Cooperative Extension Service, Biological & Irrigation Engineering.

Hofwegen, P. van and Svendsen, M., 2000. *A Vision of water for food and rural development*. The second World Water Forum. The Hague, The Netherlands.

Jensen, M. E., 1980. *Design and Operation of farm irrigation systems*, ASAE, Michigan, 1980.

Jina, L., 1998. *Water and irrigation*, Water resources and Third World Development. McGill student international development, Bibliography from: www.arts.mcgill.ca/152-497b/h2o/water/twater/irrig.htm

Kemper, W. D., R. C. Rosenau and A. R. Dexter, 1987. *Cohesion development in disrupted soils as affected by clay, and organic matter content and temperature*. Soil Science Society of America Journal. Vol. 51 P 860 – 867.

Kemper, W. D., T. J. Trout, A. S. Humpherys and M. S. Bullock, 1988. *Mechanisms by which surge irrigation reduce furrow infiltration rates in a silty loam soil*. Transactions, ASAE. Vol. 31, No. 3, P 821 – 828.

Kemper, W. D., T. J. trout, M. J. Brown and R. C. Rosenau, 1985c. *Furrow erosion and water and soil management*. Transactions of ASAE. Vol. 28, No. 6, P 1564 – 1572.

Killen, M. A. and D. C. Slack, 1987. *Green-Ampt- Model to predict surge irrigation phenomena*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol.113, No. 4, P 575 – 584.

Saleh Mahmoud Ismail, 2000 *Water Use Efficiency In Field Crop Production*, M.Sc. research, IHE Delft, the Netherlands, December 2000

Shainberg, I. And M. J. Singer, 1985. *Effect of electrolyte concentration on the hydraulic properties of depositional crusts*. Soil Science Society of America Journal. Vol. 49 P 1260 – 1263.

Shock C. C., E. P. Eldredge and L. Saunders, 1997. *Improved nitrogen and irrigation efficiency for wheat production*. Malheur Experimental Station, Oregon State University, Ontario. Oregon.

Smerdon E. T. and A. W. Blair, 1985. *Improving surge flow irrigation efficiency based on analysis of infiltration and hydrodynamic effects*. Technical report No. 138. Texas Water Resources Institute, Texas A & M University, College Station, Texas 77840-2118.

USDA- Soil Conservation Service, 1983. *Furrow irrigation*. National Engineering Handbook, Section 15, Chapter 5. US Govt. Printing Office P 22 – 23.

USDI, 1993. Bureau of Reclamation. *Cooperative Agreement for Surge Irrigation Research and Development Program*, Grand Valley Unit. Colorado State University, Colorado, USA.

Walker, W. R and Skogerboe, G. V., 1987. *Surface irrigation: theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Clifs.

Walker, W. R., (ed) 1989. *Guidelines for designing and evaluating surface irrigation system* FOW irrigation and drainage paper, 45.

Williams J. R., R. V. Llewelyn, M. S. Reed, F. R. Lamm, and D. R. DeLano, 1996. *Net return for Grain Sorghum and Corn under alternative irrigation systems in Western Kansas*. Original paper presented at The Great Plains Symposium 1996: The Ogallala Aquifer," March 5-6, 1996. Colby Community College, Colby, KS.

Yonts D.; E. Joel and E. Dean, 1995. *Surge irrigation*. University of Nebraska Fact Publication. Electronic Version issued July 1995.