

DESARROLLO DE TECNOLOGÍAS APROPIADAS PARA RIEGO POR SURCOS EN TERRAZAS PARALELAS Y TIERRAS CON PENDIENTE

P.J. Durán

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), España
pduran@irnase.csic.es

M. García Petillo

Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía
Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Resumen: Se presenta una metodología de sistematización de tierras y un equipamiento para riego por surcos ambos especialmente adaptados a la producción intensiva en pequeñas explotaciones en topografías accidentadas. Las condiciones económico-financieras de los productores impiden el uso de métodos de aspersión o goteo. Fue desarrollado para campos ondulados con pendientes entre 2.5 % y 7 %. Pone el énfasis en la conservación de suelos pero también en la facilidad para efectuar las labores culturales y especialmente el riego por surcos. El mismo se implementa mediante un sistema de terrazas paralelas de pendiente variable (entre 0.5 % y 1.75 %), con surcos paralelos a las mismas. El equipo para riego por surcos fue desarrollado tomando en cuenta la metodología de sistematización presentada y posee las siguientes características: tiene bajos costos de inversión y operativos, es liviano, portátil y de fácil operación, permite el control de los caudales derivados y la utilización de la técnica de doble caudal, logra altas eficiencias en el uso del agua y de la mano de obra, permite la inyección de fertilizantes y posibilita el riego nocturno. Consiste en la sustitución de las regueras a cielo abierto por regueras entubadas con sectores con salidas regulables y accesorios de derivación y control.

INTRODUCCIÓN

En muchas regiones del mundo, las investigaciones se conducen para sustituir el riego por surcos por métodos a presión (Oosthuizen *et al.*, 2005; Rajak *et al.*, 2006; Mazur and Harris, 2006). Sin embargo, la situación económico-financiera de los productores estudiados impide la inversión en métodos de aspersión o goteo, por lo que la alternativa posible es el riego por superficie. La solución necesaria debía contemplar el logro de buenos resultados productivos, utilizando riego superficial de una manera apropiada tanto desde el punto de vista del uso del agua como de la energía y la mano de obra, conjuntamente con un adecuado control del riesgo de erosión del suelo.

La mayoría de la investigación actual está destinada a mejorar la eficiencia del riego, mediante la utilización de modelos de simulación (Wöhling *et al.*, 2004; Eldeiry *et al.*, 2005; Mailhol *et al.*, 2005; Mateos and Oyonarte, 2005; Walker,

2005) en general con base en experimentos de campo (Horst *et al.*, 2005). Sin embargo, en la situación que nos ocupa, se imponía la necesidad de desarrollar una tecnología apropiada.

La tecnología presentada comprende dos aspectos fundamentales: una metodología de sistematización y un equipamiento para riego por surcos. Tuvo como objetivo brindar soluciones técnicas a una situación de producción concreta, planteada en el Sistema de Riego de la Colonia "Tomás Berreta" del INC, situada próxima a la ciudad de Fray Bentos, Uruguay. Se trata de un área de producción intensiva, integrada por parcelas pequeñas (alrededor de 20 ha), sobre una topografía accidentada, con pendientes en promedio 4 % con zonas de hasta 7 %. Experimentos recientes en Córdoba (Fernández-Gómez *et al.*, 2004) demuestran que puede haber erosión en riego por surcos aún con pendientes muy inferiores a las de la situación planteada.

La metodología de sistematización fue desa-

rollado para campos ondulados con pendientes generales superiores al 2.5%. Pone el énfasis en la conservación de suelos pero también en la facilidad para efectuar las labores culturales (laboreo, siembra y cosecha) y especialmente el riego por surcos.

Los trabajos iniciales en Uruguay sobre implantación de terrazas como medidas mecánicas (Molinelli, 1948), realizaron una adaptación de las recomendaciones incluidas al respecto en el Manual de Conservación de Suelos del Soil Conservation Service (USDA, 1947). Diversos autores (Cayssials *et al.* 1978; García, 1992) indican los problemas encontrados en la implementación de sistematizaciones mediante terrazas, especialmente por las dificultades para el laboreo y el mantenimiento. Dichas dificultades llevaron al fracaso y al abandono de los sistemas implantados en la década de 1950. Entendemos que las conclusiones expuestas por los autores citados, se refieren al fracaso del "modelo" de sistematización por medio de terrazas aplicado en su momento, el cual fue implementado sin mediar un análisis suficientemente profundo de su adaptabilidad a nuestras condiciones naturales y características de nuestros sistemas productivos.

Nuestro estudio presenta diferencias en cuanto a algunos criterios adoptados en la citada publicación del SCS - USDA respecto a la conformación en sí de las terrazas, pendientes de las mismas, separación entre ellas y longitud máxima. Al desarrollar una nueva metodología de sistematización, también se hizo necesario desarrollar tecnologías para riego por surcos que fueran funcionales a esa nueva situación.

Los objetivos de este trabajo fueron: a) desarrollar y evaluar una metodología de sistematización mediante terrazas de intercepción, paralelas entre sí, con pendientes variables entre 0.5% y 1.75%, que permita proporcionar un adecuado control de los escurrimientos como medida de prevención de la erosión, que altere lo menos posible los métodos de laboreo y demás prácticas culturales utilizadas en los diferentes cultivos, que sirva de guía permanente a la realización del laboreo en contorno, que se adecue tanto a la implantación de cultivos densos (cereales y pasturas) como a cultivos en línea y huertos frutales y que posibilite el riego superficial, especialmente el riego por surcos; b) desarrollar un equipo que permita el riego por surcos en la situación descrita, que sea de bajo costo de inversión, y que se pueda construir con las herramientas disponibles en un predio agrícola y no con equipamiento especializado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los trabajos se realizaron en la Colonia "Tomás Berreta" del Instituto Nacional de Colonización, ubicada en el Departamento de Río Negro, 300 km al noroeste de Montevideo. Las fincas son pequeñas explotaciones de 20 a 40 has., dedicadas a diferentes producciones intensivas, horticultura, lechería, cultivos, en todos los casos con características de producción familiar. Los suelos predominantes son Brunosoles Eutríticos Típicos (Argiudoles Típicos) pertenecientes a la Unidad Fray Bentos, de textura limo arcillosa a francos, y moderadamente profundos.

La metodología de trabajo para la sistematización fue construir un modelo de simulación que permitiera optimizar criterios de sistematización y distintas conformaciones de canal de las terrazas, mediante una doble evaluación. Este modelo de simulación incluyó dos submódulos: a) módulo de análisis hidrológico (estimación de caudales de escurrimiento); b) módulo de comportamiento hidráulico de las terrazas. Este modelo de simulación fue implementado mediante el software terrazas.exe desarrollado en Turbo Basic (compilado) para este fin.

Para el diseño del equipamiento de riego también se utilizó un modelo de simulación hidráulica implementándose un software de similares características para el cálculo de los escenarios. El estudio de simulación pretendió evaluar la posibilidad de instalar sistemas de terrazas, paralelas entre sí, con pendientes variables entre 0.5% y 1.75%, que interceptaran el escurrimiento en la ladera. De esta forma quedarían definidos cuadros de cultivo de ancho uniforme, con la dirección de los surcos paralela a las terrazas.

Supuestos básicos del modelo de simulación de las terrazas

Distancia entre terrazas y longitud de las mismas

Dado que el criterio general fue la instrumentación de terrazas paralelas, nos parece más adecuado hablar de distancia entre terrazas que de intervalo vertical, aunque para la definición de la separación entre terrazas, hemos considerado las pautas definidas por Schwab *et al.* (1990), expresadas en la función:

$$IV = 0,3(X*S + Y) \quad (1)$$

donde *IV* es el intervalo vertical en *m*; *X* es la constante de la localización geográfica, *S* es el porcentaje de pendiente promedio, del terreno, arriba de la terraza y *Y* es la constante para la

susceptibilidad del suelo a la erosión y condiciones de la cubierta del suelo durante los períodos críticos de erosión.

Para el caso de Uruguay, los valores de X y de Y más adecuados serían 0.7 y 2 respectivamente. El primero corresponde a la zona 4 (Iowa, Illinois, Indiana, Ohio), la más parecida climáticamente al Uruguay. Sustituyendo los valores de X e Y en la expresión (1) se obtienen los datos presentados en la Tabla 1.

Pendiente(%)	Int.Vertical(m)	Distancia(m)
3	1.23	41
4	1.44	36
5	1.65	33
6	1.86	31

Tabla 1. Intervalo vertical y distancia entre terrazas

Considerando estos criterios y razones de facilidad de realización de las labores culturales, se ha asumido, como pauta general, no superar los 40 m de separación entre terrazas.

Por razones de manejo de las labores culturales, en general el largo normal de los surcos de cultivos no supera, en la zona, los 100-120 m. Resulta entonces que cada terraza debería evacuar el escurrimiento producido por aproximadamente media hectárea (120×40 m).

Módulo de análisis hidrológico

Un sistema de terrazas es en definitiva un sistema de pequeñas cuencas. Cada terraza es el canal de salida del escurrimiento de la cuenca delimitada por las líneas de divorcio de aguas (en el caso de la primer terraza del sistema), o por la terraza superior (para las subsiguientes terrazas en la ladera). Dadas las reducidas dimensiones de las cuencas de las terrazas, podríamos considerar que los parámetros que afectan el escurrimiento mantienen el mismo valor en cualquier punto de estas micro-cuencas. Se asume que el tipo de suelo, la pendiente, ubicación en la ladera, la condición de la superficie, etc., son idénticos en todos los puntos de la superficie entre terrazas.

El caudal pico que sería necesario evacuar, fue calculado utilizando la fórmula racional (Chow *et al.*, 1994):

$$Q = C * I * A \quad (2)$$

donde Q es el caudal de escurrimiento en m^3 hora $^{-1}$, C es el coeficiente de escurrimiento, I

es la intensidad máxima en m hora $^{-1}$ para el tiempo de concentración y A es el área de la cuenca en m^2 (4000-5000).

Este método se desarrolla bajo los siguientes supuestos (Chow *et al.*, 1994):

- La lluvia se registra a una intensidad uniforme con una duración por lo menos igual al tiempo de concentración de la cuenca.
- La lluvia se registra con una intensidad uniforme sobre todo el área de la cuenca.

Dado los tiempos de concentración relativamente cortos que se manejan en este trabajo y la reducida superficie de las cuencas que desaguan en las terrazas, se entiende que ambos supuestos se cumplen. El método racional es una gran simplificación de un proceso complicado. Sin embargo, se le considera suficientemente exacto cuando se estima el escurrimiento para diseñar estructuras relativamente de bajo costo, donde las consecuencias de fallas no serían graves (Chow *et al.*, 1994). Para suelos del grupo hidrológico B, con cultivos en surcos, práctica deficiente, con intensidades de lluvias de 200 mm h^{-1} , el coeficiente de escurrimiento C adquiere un valor promedio de 0.66 (Schwab *et al.*, 1990). Los suelos de la asociación Fray Bentos, pertenecen a la clase hidrológica C (Durán, 1997), por lo que los valores de coeficiente de escurrimiento deben corregirse por el factor 1.09 (Schwab *et al.*, 1990), con lo que el valor del coeficiente "C" sería de 0.72. Chow *et al.*, (1994) para áreas de cultivo, con pendientes entre 2 y 7% y un período de retorno de 100 años, proponen un coeficiente "C" de 0.51. No obstante la fuerte base experimental sobre la que se elaboraron los datos presentados por Chow *et al.*, hemos considerado ubicarnos del lado de la seguridad adoptando en este trabajo para el cálculo del caudal pico el valor de coeficiente de escurrimiento "C" recomendado por Schwab, es decir 0.72. Este criterio trae como consecuencia una posible sobrevaloración de más del 40% del caudal pico calculado. Por consiguiente el análisis hidráulico que realizamos en este trabajo resulta sumamente conservador, en cuanto a las longitudes máximas que podrían adoptar las terrazas.

Para calcular el caudal de escurrimiento que se acumulará en los tramos finales de una terraza, será preciso considerar el tiempo que demorará en llegar a este punto el agua que ha caído en el sitio más remoto de la cuenca. Cuando el agua que llega desde el punto más alejado se reúne con la que viene de los lugares más cercanos, se obtendrá el máximo caudal concentrado.

Se estimó el tiempo de concentración utilizando tres metodologías diferentes: el método de distancia y velocidad usando los valores de Chow *et al.* (1994), la ecuación de Kirpich (Schwab *et al.*, 1990) y el California Culvert Practice (Hotchkiss *et al.*, 1995). Con estos tres métodos, el tiempo de concentración calculado varió entre 3 y 4 minutos. A los efectos del cálculo del escurrimiento hemos tomado entonces un valor de tiempo de concentración de 4 minutos.

En relación a la intensidad máxima, no existen en el país datos medidos de intensidad de lluvia para un lapso tan corto. Molinelli (1948) estima una intensidad de 150 mm hora⁻¹ para un tiempo de 5 minutos. Rovira *et al.* (1981), para la localidad de "La Estanzuela", estiman una intensidad de 140 mm hora⁻¹ para un tiempo mínimo de 10 minutos y un período de retorno de 10 años. Rodríguez Fontal (1985) desarrolló ecuaciones para las diferentes regiones del Uruguay. Para la sub-región VII, que es donde se encuentra la zona estudiada, y para eventos menores a 2 horas, la ecuación es la siguiente:

$$h = 27,2 \left(1 + 0,707 * \log \frac{1}{1 - (1 - r)^{1/T}} \right) * t^{0,478} \quad (3)$$

donde h es el máximo valor de lluvia ocurrida en t horas consecutivas, con un período de recurrencia de T años, a menos de un riesgo r , r es el nivel de riesgo, t es la duración de la lluvia en horas y T es el período de recurrencia en años.

Mediante la utilización de esta ecuación sería posible estimar la intensidad máxima para nuestra situación, considerando el tiempo de concentración, y definiendo los valores de las variables "riesgo" y "período de recurrencia".

Chow *et al.* (1994) indican que la selección de la vida útil y el riesgo se deben definir en base a las características de las obras a construir y el costo de los daños que se ocasionarían si la tormenta supera a la de diseño. Si consideramos la implementación de terrazas en el marco de un sistema de conservación de suelos basado en el manejo de una rotación y a otras prácticas conservacionistas (laboreo reducido, etc.) tendientes a incrementar la estabilidad estructural del suelo, podríamos tomar la vida útil de las terrazas como el período requerido para el establecimiento del sistema integrado de conservación. En este caso, el período durante el cual debemos asegurar el funcionamiento de las terrazas podría ser de 10 a 15 años. Vale decir que deberíamos estimar la intensidad máxima esperable (para nuestro tiempo de concentración), cuyo valor no sea superado durante el período

de la vida útil, con un cierto nivel de seguridad (o de riesgo). Considerando lo anterior, hemos entendido adecuado utilizar un período de retorno de 90 años, para contar con un nivel de riesgo de ocurrencia del evento máximo de sólo el 20 %, para una vida útil de 20 años.

Con estos parámetros y utilizando la ecuación (3), con un tiempo de concentración de 4 minutos, la tormenta de diseño tendrá una intensidad de 318 mm hora⁻¹. En resumen, utilizando la fórmula racional, y los valores de coeficiente de escurrimiento e intensidad máxima de precipitación ya definidos y considerando un área de cuenca de 4800 m², constituida por la melga que queda encerrada entre dos terrazas (120 m × 40 m), el caudal pico resultante fue de 308 l s⁻¹.

Módulo de análisis hidráulico

Se ha tomado este valor de caudal pico (308 l s⁻¹) como base para el análisis del comportamiento hidráulico de los canales. Las estructuras utilizadas para la intercepción y conducción del escurrimiento fueron canales en tierra de tipo "de ladera", vale decir con terraplén de un solo lado. La tierra para la construcción del terraplén se extrae del área del canal.

Al plantearnos la utilización de este tipo de terrazas hemos tomado en cuenta, por un lado, que se pudieran construir con maquinaria agrícola convencional sin requerir maquinaria especializada para movimiento de tierras y por otro, la utilización de la menor proporción posible de terreno.

Respecto al primer aspecto, consideramos el uso para la construcción del canal de la terraza, de una hoja de nivelación de enganche de tres puntos, acoplada a un tractor de tamaño medio (50-60 HP). Hemos evaluado en la práctica que este equipo puede construir, con relativa facilidad, terraplenes con relaciones de inclinación "Z" de hasta 1.5 a 1 (33° de inclinación respecto a la horizontal). Con mayor inclinación (por ejemplo 1 a 1; 45°) la construcción es más difícil. Cabe indicar que por la ubicación que tendrían las terrazas, no se pensaba en la posibilidad del pasaje de maquinaria agrícola sobre ellas, en ninguna de las operaciones de laboreo, siembra, etc. Tampoco se realizaría ningún tipo de cultivo en la terraza. Tanto el canal como el terraplén de las terrazas, se mantendrían empastados, como forma de preservarlos de la erosión que podría causar el tránsito del agua, a altas velocidades. Por otra parte, con el mismo equipamiento, es posible construir terraplenes de hasta 0.6-0.7 m de altura, medidos desde el fondo del

canal hasta el coronamiento del terraplén.

Para minimizar el terreno ocupado, hemos optado por el uso de terrazas de base angosta. Una forma de reducir el ancho de la terraza es aumentar la inclinación de los taludes y reducir el ancho de la base del canal. El talud del canal de la terraza, ladera arriba, es decir el talud de ingreso del escurrimiento al canal, se ha prefijado con una inclinación de 3 a 1, como forma de asegurar su estabilidad, evitando una gran aceleración del agua que pudiera dar lugar a procesos de erosión en dicha zona. Para los taludes del terraplén de la terraza se adoptó una inclinación de 1.5 a 1 (Figura 1).

Se utilizó la fórmula de Manning de velocidad del agua en canales en tierra para analizar el comportamiento hidráulico (Chow, 1994) y mediante la ecuación de continuidad, es posible obtener el caudal conducido por el canal:

$$Q = A * V \quad (4)$$

donde Q es el caudal en $m^3 s^{-1}$, A es el área de la vena líquida en m^2 y V es la velocidad media del agua en $m s^{-1}$.

Para el análisis hidráulico se ha considerado un valor del coeficiente de rugosidad "n" de 0.035, correspondiente a la condición de las paredes del cauce cubiertas de malezas, al considerar que ésta puede ser la condición habitual del canal de las terrazas.

Según Schwab *et al.* (1990), la velocidad máxima permisible para canales con vegetación (pasto Bermuda) y pendientes del canal entre 0% y 5%, es de $2.4 m s^{-1}$. En el manual de conservación de suelos del SCS (USDA, 1947), se indica que el pasto bermuda ha resistido velocidades de 2.5 a $3 m s^{-1}$, mientras que otras gramíneas (p.ej. *Poa pratensis*) sólo resisten velocidades de 1.5 a $2.1 m s^{-1}$. El *Penisetum clandestinum* tiene los mismos valores de resistencia a la velocidad del agua que el pasto Bermuda. Al tratarse de canales empastados, de uso intermitente, se ha adoptado como criterio de velocidad, no sobrepasar $1.2 m s^{-1}$ como velocidad

instantánea máxima, a fin de evitar procesos erosivos en el propio canal de la terraza.

Considerando la profundidad máxima del canal que es posible lograr con la maquinaria utilizada, a fin de prevenir desbordamientos que ocasionarían la rotura de la terraza, se ha entendido como criterio deseable, que el tirante "h" (profundidad de agua en el canal) máximo no sobrepase la profundidad de corte, la cual se sitúa alrededor de los 0.30 m. Así, prácticamente toda la vena líquida circularía bajo el nivel del terreno, sobre material inalterado, dejando un borde libre de otros 0.30 m, lo cual otorga un importante margen de seguridad. El límite máximo admisible del tirante, a los efectos de calcular la máxima capacidad de conducción de cada una de las secciones tipo, lo hemos fijado en 0.5 m (0.1 a 0.2 m de borde libre).

El trazado de terrazas paralelas sobre topografías desuniformes lleva a variaciones en la pendiente de la terraza. No es posible mantener el paralelismo con la utilización de pendientes fijas en las terrazas. Por otra parte, queríamos ubicar los surcos de riego en forma paralela a las terrazas (o viceversa). Considerando las pendientes que es posible adoptar en los surcos, hemos evaluado el comportamiento hidráulico de las terrazas, dentro de un rango de pendientes entre 0.5% y 1.75%.

Desarrollo de tecnologías para riego por surcos

Siguiendo las pautas de sistematización del modelo reseñado, en la mayoría de los casos la cabecera de los cuadros de riego queda ubicada en la máxima pendiente (> 3%) lo cual plantea un problema para la conducción y distribución uniforme de agua a los surcos. Es posible la sustitución de las regueras en la cabecera de los cuadros, por tuberías de distribución del agua, obteniéndose un control preciso del riego suministrado a cada surco, de acuerdo a la metodología planteada por Durán (1999 y 2000).

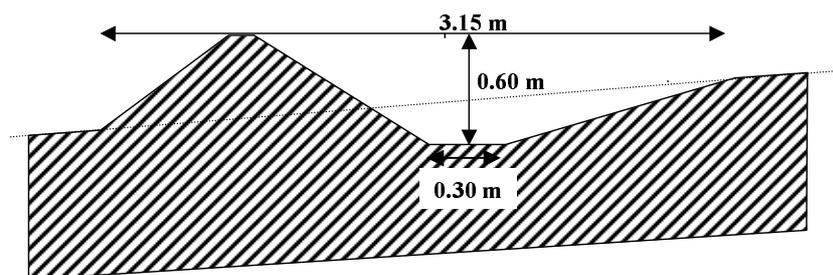


Figura 1. Perfil transversal de la terraza tipo

El equipamiento diseñado para tal fin se compone de unidades de salidas regulables, que pueden ser alimentadas por gravedad a través de tuberías de conducción, desde la reguera principal. Estas tuberías de conducción y derivación constituyen verdaderas "regueras entubadas", sustituyendo a las tradicionales regueras en tierra a cielo abierto, con las siguientes ventajas:

- Regulación precisa de los caudales derivados a los surcos, permitiendo variaciones de caudal, de acuerdo a las necesidades.
- Fuerte disminución de las tareas de atención durante el riego, dado que una vez reguladas las salidas, los caudales se mantendrán invariables.
- La inexistencia de regueras en tierra facilita las labores culturales mecanizadas.
- Elimina pérdidas de agua y problemas de erosión cuando se realiza la conducción en pendientes fuertes.

La unidad de salidas regulables (USR) debe permitir asimismo la derivación del agua a cada surco de riego. Para ello se pensó en una tubería con perforaciones frente a cada surco. Sin embargo, la fuerte pendiente del terreno combinada con las pérdidas de carga por fricción que ocurre en tuberías con salidas múltiples genera perfiles de carga curvilíneos con una gran desuniformidad. No es posible entonces derivar el mismo caudal a cada surco realizando simples perforaciones del mismo tamaño, por lo que la reguera entubada debe contar con salidas de apertura regulable para compensar las diferencias de presión. Por otra parte, a mayor longitud de tubería de derivación, mayor son las diferencias de presión generadas y mayores las necesidades de

regulación del caudal. El diámetro de la conducción, el caudal requerido en cada surco y el espaciamiento entre salidas influyen notablemente en la generación de las líneas de presión y las necesidades de regulación.

El dispositivo de regulación utilizado fue diseñado de tal forma que puede ser construido con las herramientas que usualmente se poseen en un establecimiento agrícola, y con materiales fácilmente disponibles en plaza. No obstante su sencillez, el diseño permite una regulación muy precisa y un cierre suficientemente bueno como para considerar despreciables las pérdidas de agua, a las presiones relativamente bajas que se alcanzan en estas tuberías. El mecanismo de cierre resulta eficaz para contener presiones de hasta 1 metro de columna de agua y este valor ha sido tomado en cuenta en la modelación hidráulica.

Para la construcción de la Unidad de Salidas Regulables (USR), se utilizaron tres tubos de PVC DN 63 y PN 6, de 6 metros de longitud, con acople rápido, o bien un tubo de polietileno (PE) de longitud, diámetro y timbraje equivalente. Estos tubos fueron perforados con orificios de 2,5 cm de diámetro para derivar un caudal de $0,63 \text{ l s}^{-1}$ con una carga mínima de 0.20 m. Sobre cada orificio se sobrepuso un trozo ("manguito") de 10-12 cm de PVC o PE, abierto longitudinalmente, el cual gira permitiendo la regulación de la abertura y consecuentemente del caudal. El "manguito" se sujeta con dos bandas de goma o abrazaderas de alambre, a los efectos de lograr un buen ajuste con el caño perforado. El dispositivo se completa fijando a la tubería, a ambos lados del "manguito", unas guías del mismo material, a efectos de evitar que el mismo se desplace de su posición al ser arrastrado los caños para el cambio de posición. (Figura 2).

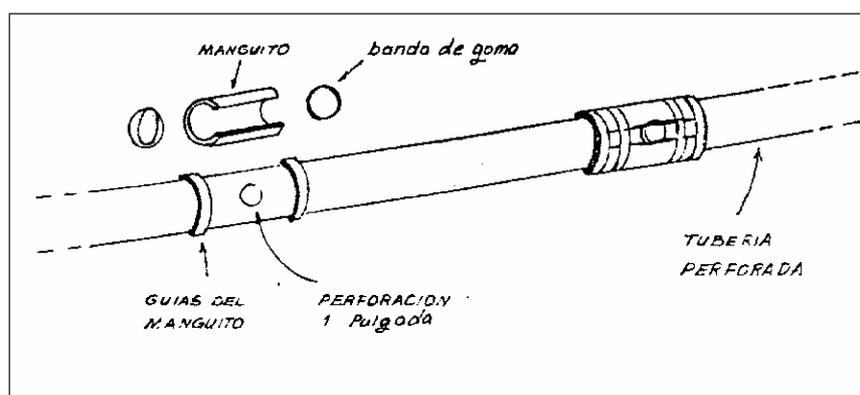


Figura 2. Unidad de salidas regulables

Este sistema USR permite la variación (reducción) del caudal, una vez que el agua ha llegado al final del surco, disminuyendo las pérdidas por escurrimiento al pie del cuadro, mejorando tanto la eficiencia de aplicación como la distribución (Walker and Skogerboe, 1987). Con este método llamado de doble caudal o caudal reducido, primeramente se moja el surco de riego con el máximo caudal no erosivo (Q_m) y luego se reduce el caudal durante la fase de infiltración (Q_r). Este caudal de riego suele ser del orden de 1/3 del caudal de mojado, aunque esto depende de varias consideraciones que no abordaremos en este trabajo. Entonces definimos $Q_r = Q_m/3$.

Q_m es el máximo caudal no erosivo y puede estimarse considerando el tipo de suelo y la pendiente longitudinal de acuerdo con la fórmula empírica $Q_m(l\ min^{-1}) = 38 * s^{-1}$, siendo "s" la pendiente (%) para suelos de textura media (Criddle *et al.*, 1956). Dado que en promedio la pendiente de los surcos, de acuerdo a las pautas de sistematización ya presentadas, es de 1%, el Q_m resultante sería de $38l\ min^{-1}$ ($0,63l\ s^{-1}$) y el $Q_r = 12,7l\ min^{-1}$ ($0,21l\ s^{-1}$).

El riego se inicia derivando el caudal Q_m a un surco sí y dos no durante la fase de mojado, repitiéndose tres veces hasta lograr el mojado de todos los surcos. Una vez logrado esto, se abren las salidas a todos los surcos simultáneamente derivando en cada uno de ellos el caudal reducido (Q_r).

La conducción del agua por gravedad, desde la reguera principal hasta la unidad de salidas regulables se realiza mediante una tubería, que debe cumplir las siguientes condiciones:

- Un diámetro suficientemente grande como para que la pérdida de carga por fricción al conducir los caudales requeridos, fuese despreciable, y de esta forma prescindir de los requerimientos de una pendiente más o menos importante para lograr la conducción.
- Liviana y fácilmente transportable.
- De bajo costo.
- Colapsable, de forma de evitar que se produzca el efecto de sifón cuando la conducción se realiza en direcciones de pendiente fuerte.

La tubería utilizada fue una manguera tubular de polietileno de 150 micrones de espesor y 11 cm de diámetro. Esta manguera fue evaluada en los ciclos de riego 1982/83 y 1983/84, utilizándose en gran escala en el ciclo 1984/85,

en el Sistema de Riego de la Colonia "Tomás Berreta" (Río Negro, Uruguay).

A partir de una reguera madre se realiza la derivación a los cuadros por medio de un trozo de unos 0,50 m de tubo de PVC de baja presión y DN 110, dotado de un dispositivo de guillotina para controlar el caudal. A partir de ese tubo o "toma" de agua, se acopla un trozo de la manguera antes mencionada, hasta llegar a los primeros surcos de riego. Allí se acopla (artesanalmente) a la unidad de salidas regulables. La manguera se corta en tramos de igual longitud que la unidad de salidas regulables (18 m), de forma que, una vez regados los primeros surcos, se desplace la unidad, añadiendo un tramo de manguera flexible. La manguera se sujeta en los puntos de unión con una banda de goma, utilizándose como acople entre dos tramos de manguera, un trozo de tubo de PVC del tipo utilizado para la confección de la toma. Este sistema de acople, tiende a zafarse cuando hay una sobrecarga en la tubería, actuando como fusible, ya que, dado el reducido espesor de la pared de la manguera, la misma no puede resistir presión.

Posteriormente, en 1999 se realizó un rediseño del equipamiento utilizándose en esa ocasión, para la conducción, tubería de PVC (rígido) de baja presión DN 110, en tramos de 6 m. Esta tubería se acoplaba a un sifón que extraía el agua de la reguera principal. Éste fue diseñado para sustituir los cortes en regueras y canales, lo cual evita el deterioro de dichas estructuras. El sifón se conecta directamente a las tuberías de conducción y derivación que constituyen "regueras entubadas" y permite la derivación precisa de los caudales requeridos. Posee un tubo respiradero, colocado en su sección de aguas abajo, para evitar que la tubería de conducción colocada en una fuerte pendiente actuara como parte del sifón, aumentando el caudal extraído más allá de la capacidad de la USR conectada al final de la misma (Figura 3).

Modelación hidráulica del equipo

El software calculó la carga disponible en cada salida considerando que los caudales derivados por cada una de ellas eran idénticos (lo cual se asegura mediante el mecanismo de control de la apertura de la salida). Se consideró el caudal circulante en cada tramo entre salidas y se calculó la pérdida de carga mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, considerando la ganancia topográfica y la variación del componente cinético. La resolución del cálculo se realizó mediante iteraciones sucesivas hasta obtener valores de carga inicial requerida iguales a los ingresados por el usuario.



Figura 3. Equipo para riego por surcos. A) Detalle de toma de agua. a - canal principal, b - sifón PVC DN 110, c - bomba de vacío, d - tubería de conducción B) Detalle de aducción. e - tubería de riego de PVC con orificios, f - surcos de riego en contorno

El dimensionado de las USR se realizó mediante un análisis hidráulico de tuberías de diferente longitud y diámetro ubicadas en un rango de pendientes entre 2.5 % y 5.5 % Las demás condiciones de operación se fijaron como sigue:

- Los surcos eran abiertos al final, y su ancho de fondo era de 0.20 m aproximadamente.
- El riego se realizó con reducción de caudal (cut back) con caudal de mojado $Q_m = 0,63 \text{ l s}^{-1}$ y el caudal de riego $Q_r = 0,21 \text{ l s}^{-1}$.
- La pendiente de los surcos, por ser paralelos a las terrazas, varía en el rango de 0.50 a 1.75 %.
- La distancia entre surcos fue de 0.80 m por ser la usual en la zona, por lo que la distancia entre salidas abiertas durante el mojado era de 2.40 m y durante la fase siguiente era de 0.80 m.

- Las longitudes de tubería consideradas fueron múltiplos de 6 m ya que esa es la longitud de tubos de PVC con acople rápido disponibles en el mercado.

Se asumió una carga máxima disponible al inicio de la USR de 0.40 m y una carga máxima en cualquier punto de la USR de 1.0 m.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del modelo de sistematización

En la Tabla 2 se presentan los resultados de la simulación, para distintas pendientes de terraza, las velocidades y tirantes alcanzados para una longitud de 120 m y una separación entre terrazas de 40 m, los caudales máximos que serían capaces de conducir, sin sobrepasar los límites máximos establecidos ($h \leq 0,5 \text{ m}$ y $V \leq 1,2 \text{ m s}^{-1}$) y las longitudes máximas posibles de las terrazas tales que el caudal conducido no supere a los caudales máximos anteriores.

Pendiente (%)	Velocidad (m/s)	Tirante h (m)	Máximos admisibles	
			Caudal (l/s)	Longitud (m)
0.50	0.62	0.40	532	207
0.75	0.81	0.35	651	275
1.00	0.90	0.33	752	293
1.25	0.98	0.31	841	328
1.50	1.05	0.30	921	359
1.75	1.11	0.29	994	388

Tabla 2. Comportamiento hidráulico de la terraza

Surge de los resultados del análisis de comportamiento hidráulico que la principal limitante viene dada por el riesgo de que una sobre elevación del tirante pueda provocar un desbordamiento de la terraza, con los consiguientes daños, y no por la velocidad que adquiere el agua en el canal ya que esta nunca sobrepasa la máxima velocidad no erosiva.

Las observaciones indican que el perfil de los canales tiende a estabilizarse en una sección parabólica que podría asimilarse bastante bien a un canal trapezoidal con un ancho de fondo reducido, tal como sería el perfil con "a" = 0.30 m.

La sección trapezoidal con $a = 0.30$ m admite largos de terrazas de más de 200 m (con una pendiente de la terraza de 0.5%) sin sobrepasar los 0.5 m de tirante máximo admisible que habíamos definido como el límite (Tabla 2). Esta sección tendría un ancho de terreno ocupado por la terraza de 3.15 m.

En los análisis hidrológicos y de comportamiento hidráulico de las terrazas, se calcularon los tirantes y las velocidades de la vena líquida en los canales de las terrazas, en todas las posibles condiciones que pudieran surgir a partir de las pautas de sistematización adoptadas. Considerando que el tipo de canal más adecuado es el de sección trapezoidal con un ancho de base de 0.30 m, una inclinación de taludes 1.5:1, un tirante máximo de 0.30 m y un ancho de solera de 0,35 m, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- El área máxima absoluta que puede servir una terraza de este tipo, varía con el porcentaje de pendiente del canal, desde 5500 m² con 0.5% de pendiente hasta 10.000 m² con 1.5%.
- Las velocidades dentro de este rango de áreas y pendientes se sitúan entre 0.75 y 1.25 m s⁻¹, las cuales son admisibles como no erosivas si se considera que el canal se

encuentra empastado y funciona en forma intermitente.

- Si consideramos los anteriores criterios para la sistematización de cuadros, con un ancho máximo de 40 m y una longitud máxima de 120 m, en todos los casos nos situamos dentro del rango de seguridad en cuanto a la capacidad de las terrazas.

Del equipo de riego por surcos

Se presenta a continuación (Figura 4A) un gráfico con los perfiles de presión obtenidos con tubos de DN 63 PN 6, para 3 pendientes. Si limitamos la carga inicial disponible a 0.40 m observamos que para una pendiente de 2.5% no es posible sobrepasar los 3 tramos de tubos (18 m) mientras que para las otras dos pendientes podríamos utilizar 4 tramos de tubos (24 m). Para las tres pendientes consideradas, las mínimas presiones requeridas para la operación de las salidas con el máximo caudal (0.20 m para 0.63 l s⁻¹) se logran con longitudes entre 12 y 18 m siendo 18 una longitud máxima en la cual se puede trabajar en todas las situaciones de pendiente.

Se consideró la utilización de tubos de mayores dimensiones a fin de manejar un mayor número de surcos simultáneamente y un mayor caudal en cada USR, lo cual podría aumentar la eficiencia de la mano de obra. El análisis hidráulico de tubos DN 75 se presenta gráficamente en la Figura 4B.

Vemos que es posible utilizar hasta 5 tubos de DN 75 en la pendiente menor sin superar los 0.40 m de presión inicial requerida. Sin embargo, en la pendiente mayor (5.5%) se produce una acumulación de presión hacia el final de la tubería al haberse reducido las pérdidas de carga por fricción. Por otra parte, los tubos DN 75 resultan algo más pesados y difíciles de manipular y tienen un mayor costo. Concluimos que las

USR construidas con 3-4 tubos de DN 63 resultan en la solución más versátil y económica para la derivación de agua a los surcos en cabeceras con alta pendiente (2.5% a 5%).

Operación de riego

A modo de ejemplo podemos tomar una situación teórica de riego de un cultivo de maíz, con surcos de 120 m de longitud, separados 0,75 m, en un suelo con una infiltración de 8 mm h^{-1} (en surcos), habiéndose determinado una lámina neta de riego de 40 mm. Se utiliza un sistema con dos tuberías de conducción, cada una de las cuales posee una USR en el extremo. Una comienza el riego por los surcos de la parte superior del cuadro y la otra por los de la parte inferior.

Una vez que se han regado los 48 surcos que pueden regarse simultáneamente (24 por cada USR), se acorta la tubería que regaba la parte más baja del cuadro quitándole tres tramos (18 m), los cuales se utilizan para alargar la tubería

que estaba regando los surcos de la parte más alta del cuadro. Los tubos, por ser sumamente livianos pueden ser arrastrados unidos de a tres, lo cual agiliza en gran forma la tarea del cambio de posición.

El equipo permite la utilización del método de caudal reducido, vale decir el mojado previo y posterior riego de los surcos. El mojado se realiza en tres grupos de 16 surcos simultáneamente (ocho en cada unidad de riego; uno sí y dos no) durante el tiempo necesario para alcanzar el final del surco, que en este caso se ejemplifica en una hora (tres horas en total para mojar los tres grupos de surcos). El caudal por surco utilizado para el mojado es el máximo no erosivo ($0,63 \text{ l s}^{-1}$, en el ejemplo). Luego se procede a regar simultáneamente los 48 surcos durante 5 horas (para lograr la infiltración de la lámina neta requerida), con un caudal de $0,21 \text{ l s}^{-1}$ (un tercio del caudal de mojado). Por lo tanto, el tiempo total de riego (en este caso particular) es de 8 horas.

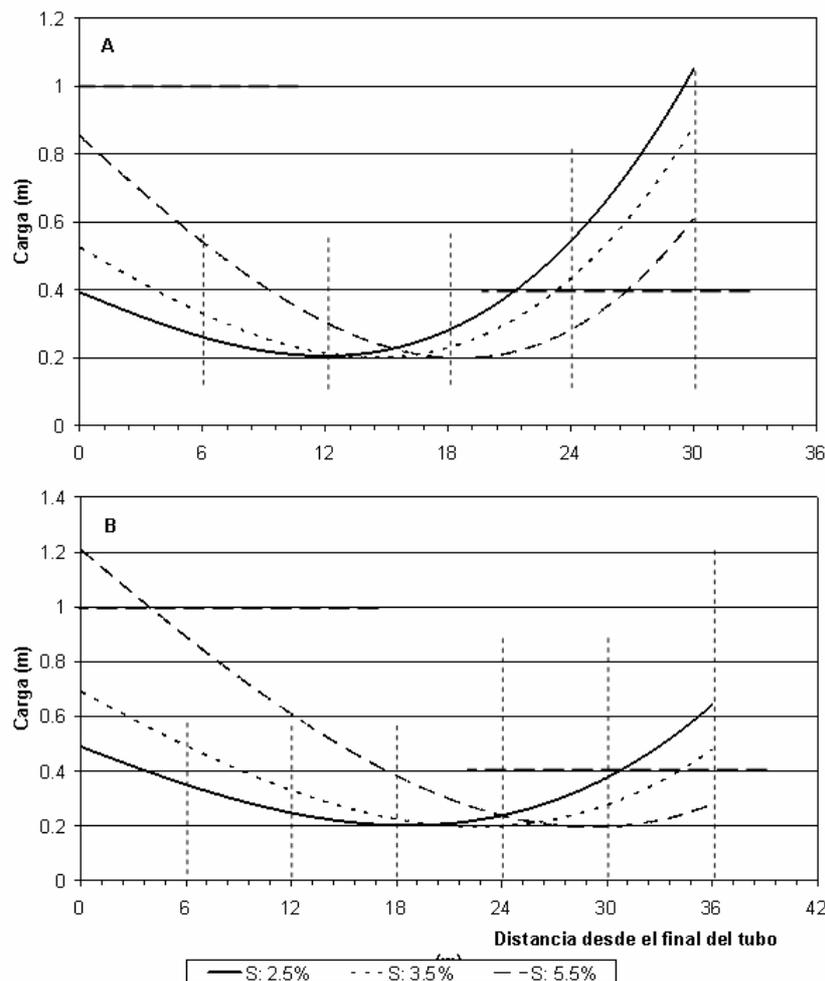


Figura 4. Perfiles de carga de regueras entubadas de PVC PN6 en surcos a 0,80 m. A) DN63. B) DN75

El cambio de posición insume alrededor de 15 minutos procediéndose entonces al mojado de otros 48 surcos, luego de lo cual se dejan regando durante la noche, cortando el suministro de agua una vez cumplido el tiempo de riego. De esta forma, y considerando un equipo constituido por 15 tubos de conducción y 6 tubos perforados (dos USR), con un tiempo de mojado de una hora y un tiempo de riego de 5 horas, para una frecuencia de 7 días, es posible cubrir 96 surcos de alrededor de 100 m diariamente; vale decir alrededor de 5 ha en un ciclo de riego, para una jornada de riego de 16 horas. Obviamente si se reduce la jornada de forma de cubrir una sola posición por día, el rendimiento del equipo se reduce a la mitad (2.5 ha).

Puede verse que agrupando las tareas de cambio de posición y realizando una atención coordinada de las unidades de riego, un regante puede manejar 4 grupos de tuberías dobles simultáneamente en dos posiciones diarias (una de las cuales es nocturna). Así, el área regada por día es de aproximadamente 3 ha, lo cual significa que utilizando este método un regante cubre unas 20 ha en un ciclo de riego semanal. Vale nuevamente la aclaración que, si realizamos el riego de una sola posición por día, el área total se reduce a la mitad (10 ha). Lo anterior significa que los requerimientos de mano de obra pueden llegar a valores tan bajos como 1/3 de jornal por hectárea regada.

Las ventajas del equipo descrito en relación al manejo tradicional del riego por surcos, se pueden resumir en las siguientes características:

- No requiere la construcción de regueras. La ausencia de regueras en la cabecera de los surcos simplifica las labores culturales, a la vez que significa un aprovechamiento total de la superficie cultivable, considerando que el equipo es totalmente portátil.
- Realiza un control preciso de los caudales derivados a los surcos, sin tener pérdidas en la conducción y permitiendo el manejo de dos caudales (mojado y riego) lo cual incrementa notablemente la eficiencia de aplicación de agua. Permite además, la inyección de fertilizantes en el agua de riego.
- Además de ser un sistema de muy práctico manejo, que requiere muy poca mano de obra por ha, brinda la posibilidad de realizar riegos durante la noche, en forma controlada.

- Gracias a su gran flexibilidad de ubicación y operación, supera en muchos casos los inconvenientes ocasionados por una mala sistematización de las chacras o superficies mal niveladas.
- El método se adapta especialmente a campos con pendiente entre 2.5 % y 5.5 % (debidamente sistematizados). Para campos más planos existen otros equipamientos en el mercado que se adaptan mejor a esta situación.
- Requiere muy baja inversión en componentes y puede ser construido fácilmente con las herramientas disponibles en un establecimiento rural.

CONCLUSIONES

Mediante un correcto diseño (especialmente la sistematización de tierras) y una inversión reducida en equipo, es posible implementar un sistema de riego por superficie de manejo sencillo y práctico, adaptado a condiciones topográficas consideradas adversas para este método.

Las terrazas de intercepción paralelas reducen la longitud de la ladera y consecuentemente la erosión del suelo en los períodos "sin surcos" facilitan el laboreo en contorno y el trazado de los surcos de riego en orientaciones con pendientes controladas.

Las terrazas se ubican de forma que, además de cumplir su función principal de intercepción y conducción de la escorrentía, sirven como una guía para el laboreo y la orientación de los surcos. De esta forma, en lugar de entorpecer las prácticas culturales, las facilitan.

La sustitución de las regueras en la cabecera de los cuadros por tuberías de distribución del agua, elimina el riesgo de erosión en dicho punto y logra un control preciso del riego suministrado a cada surco. Este equipamiento permite además la utilización de la técnica de reducción de caudal, mejorando tanto la eficiencia de aplicación como la distribución.

Con este equipo, en campos bien sistematizados, un regante puede manejar unas 20 ha.

Entendemos que la metodología presentada podría considerarse como una alternativa de bajo costo para el riego de cultivos en laderas con pendientes elevadas, capaz de proporcionar un manejo eficiente del riego, con bajos requerimientos de mano de obra y de necesidades de bombeo.

REFERENCIAS

- Cayssials, R., J.E. Liesegang y J. Piñeyría, (1978). Panorama de la erosión y conservación de suelos en el Uruguay. M.A.P. Uruguay. Boletín Técnico N. 4.
- Chow, V.T., (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill. Colombia.
- Chow, V.T., D.R. Maidment y L.W. Mays. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw Hill. Colombia.
- Criddle, W.D., S. Davis, C.H. Pair y D.G. Shocley, (1956). Methods for evaluating irrigation systems. USDA, Handbook 82.
- Durán, A., (1997). Clasificación Hidrológica de los Suelos del Uruguay. Agrociencia, Vol I, N. 1, 15–29.
- Durán, P.J., (1999). Procedimiento de Riego y Artefactos Necesarios para la Implementación del mismo. M.I.E.M.: 25.793. Uruguay, fecha de prioridad, 9/11/1999. Patente.
- Durán, P.J., (2000). Un Modelo Alternativo de Sistematización de Tierras. Agrociencia, Volumen IV, N. 1, 111–122.
- Eldeiry, A.A., L.A. García, A.S.A. El-Zaher y M.E. Kiwan, (2005). Furrow irrigation system design for clay soils in arid regions. Applied Engineering in Agriculture, 21(3), 411–420.
- Fernández-Gómez, R., L. Mateos y J.V. Giraldez, (2004). Furrow irrigation erosion and management. Irrigation Science, 23(3), 123–131.
- García, F., (1992). Guía para la toma de decisiones en conservación de Suelos. 3a. aproximación. INIA, Uruguay, Serie Técnica N. 26.
- Horst, M.G., L.S. Shamutalov, L.S. Pereira y Gonçalves, J.M., (2005). Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin. Agricultural Water Management, 77(1-3), 210–231.
- Hotchkiss, R.H. y B.E. McCallum, (1995). Peak Discharge for Small Agricultural Watersheds. Journal of Hydraulic Engineering, 121 No. 1.
- Mailhol, J.C., P. Ruelle y Z. Popova, (2005). Simulation of furrow irrigation practices (SOFIP): a field scale modelling of water management and crop yield for furrow irrigation. Irrigation Science, 24(1), 37–48.
- Mateos, L., N.A. Oyonarte, (2005). A spreadsheet model to evaluate sloping furrow irrigation accounting for infiltration variability. Agricultural Water Management, 76(1), 62–75.
- Mazur, K. y G. Harris, (2006). Is it worth converting furrow irrigated cotton to drip?. Australian Cottongrower, 27(1), 62–64.
- Molinelli, J.C., (1948). Sistematización por medio de terrazas, de predios destinados a la agricultura. Ministerio de Ganadería y Agricultura, Dirección de Agronomía, Uruguay. Publicación No. 93.
- Oosthuizen, L.K., P.W. Botha, B. Grove y J.A. Meiring, (2005). Cost-estimating procedures for drip, micro and furrow irrigation systems. Water SA, 31(3), 403–406.
- Rajak, D., M.V. Manjunatha, G.R. Rajkumar, M. Hebbara y P.S. Minhas, (2006). Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and the water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol. Agricultural Water Management, 83(1/2), 30–36.
- Rodríguez Fontal, A., (1984). Fórmulas lluvia-duración-riesgo en las ocho subregiones del Uruguay (Aplicación a la agricultura). Agua en la Agricultura, No. 2. DUMA-MGAP, Montevideo.
- Rovira, L., F. García, R. Hofstadter y W. Corsi, (1982). Intensidades máximas de lluvia en las zonas de influencia de las estaciones agroclimáticas La Estanzuela, Paysandú, Bella Unión y Treinta y tres, MGAP, Montevideo.
- Schwab, G.O., R.K. Frevert, T.W. Edminster y K.K. Barnes, (1990). Ingeniería de Conservación de Suelos y Aguas. Noriega Editores, Editorial LIMUSA, México.
- USDA Manual de Conservación de Suelos. (1947). Publicación TC-243. Oficina Central de Traducciones, Secretaría de Estado de los Estados Unidos, Washington D.C.
- Walker, W.R., (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 131(2), 129–136.
- Walker, W.R. y G.V. Skogerboe. (1987). Surface Irrigation. Theory and Practice. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
- Wöhling, T., G.H. Schmitz y J.C. Mailhol, (2004). Modelling two-dimensional infiltration from irrigation furrows. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 130(4), 296–303.