



UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS

“Jose Marti Pérez”

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Departamento de Agronomía



TRABAJO DE DIPLOMA

**DESEMPEÑO DEL RIEGO POR SURCOS CON
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, EN UN SUELO
PARDO SIALÍTICO CARBONATADO.**

AUTOR: RAUL ERNESTO ALVAREZ MADRIGAL

Sancti Spíritus, 2016



UNIVERSIDAD DE SANCTI SPÍRITUS

“Jose Marti Pérez”

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Departamento de Agronomía



TRABAJO DE DIPLOMA

**DESEMPEÑO DEL RIEGO POR SURCOS CON
ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL, EN UN SUELO
PARDO SIALÍTICO CARBONATADO.**

Autor: Raúl Ernesto Álvarez Madrigal

Tutor: Prf. Tit. Ing. Manuel Rodríguez González Dr. C.

Sancti Spíritus, 2016

Agradecimientos

- *A la Universidad “José Martí Pérez” que hizo de mi lo que ahora soy.*
- *A mi Tutor de tesis Dr. C. Manuel Rodríguez González por su participación decidida paciencia y tiempo dedicado que mostró para la terminación del presente trabajo.*
- *A todos mis profesores de la universidad que me brindaron sus consejos que tanto me han servido en mi vida.*
- *Un agradecimiento a todos mis compañeros de aula en particular a Dailin Pérez, Cesar Antonio Acosta, Dailen Marcelo por su ayuda en la realización de esta investigación.*
- *También quisiera agradecer a todas las restantes personas que de una forma u otra me han brindado su apoyo.*

Muchas Gracias a todos

Dedicatoria

- *A mis padres Raúl Álvarez y Edanis Madrigal con todo cariño y admiración por el gran esfuerzo que realizaron para la culminación de mis estudios sin esperar recompensa alguna.*
- *A mi abuelo Arsenio Álvarez que a lo largo de nuestras vidas siempre me alentó a seguir mis estudios.*

Pensamiento

Cada vez con menos interés en las disciplinas de economía y conservación... Nuestra agricultura actual desperdicia mantilla, agua de riego, el combustible fósil, y la energía humana. Nos estamos alimentando de manera desconsiderada, como ninguna otra sociedad alguna vez ha podido hacer.

SÍNTESIS

Con el objetivo de evaluar el sistema de riego intermitente con diferentes criterios de manejo y compararlo con el riego de flujo continuo en cuanto a los indicadores de desempeño. Se toma como referencia la necesidad de manejo de agua y suelo en el cultivo frijol en la finca “La Paneca” de la comunidad “Las Tosas” en suelo Pardo Sialítico Carbonatado. Se empleó un diseño de parcelas en franjas con tres tratamientos: (A) riego con flujo continuo, (B) riego intermitente con criterio de manejo de distancias variables con tiempos incrementales y (C) riego intermitente con criterio de manejo de tiempos variable y distancias constantes. Se evaluaron los principales indicadores de desempeño para el riego por surcos con una magnitud de caudal entre $0,49 - 0,52 \text{ L s}^{-1}$ en la unidad experimental. Los resultados demostraron que con la propuesta del tratamiento B se logra reducir lámina aplicada 1,71 veces (42%) de ahorro de agua respecto al tratamiento A. En cuanto a pérdida de agua y suelo, el tratamiento C logró, reducir las pérdidas de agua 2,25 veces y las de suelo 2,3 veces respecto al método tradicional. Con la propuesta del tratamiento C se puede incrementar la eficiencia de aplicación en 6,73% con un ahorro del 31,2% del volumen de agua aplicado e incrementar la productividad del agua en 36% con respecto al riego de flujo continuo. El estudio de los indicadores de desempeño del riego, permitió corroborar, que el riego con caudal intermitente es superior al método tradicional, reduce las pérdidas de agua y suelo por escorrentía, se incrementa la eficiencia de aplicación y la productividad del riego.

SYNTHESIS

With the objective of evaluating intermittent irrigation system, with different criterius and compare with the continues flow irrigation taking in to account. It is taken as a references the necessity of maneging the water and soil, in the planting of beans in farm La Paneca in of Brown soil bean Carbonated Sialítico.. It was used a design of parcel in fringe, with three treatments (A) continius flow irrigation (B) intermittent irrigation with criterius of maniging variable distances and incremented times and (C) intermittent irrigations with criterius of maniging variable times and constant distances. It we be evaluate the principal acting indicator for the irrigation of the irrigation for rut with a discharge of magnitude between $0.49 - 0.52 \text{ L s}^{-1}$ in the experimental unit. The results showed that the suggestion of treatment (B) we can reduce the aplicated sheet 1.71 one times (42 %) of water saving taiking in to account the treatment (A). Refering the water losts and soil the treatment (C) helped to reduce the water losts 2.25 times and 2.3 of the soil. We respect to the tradicional methods. With the propouse of the (C) treatment we can increase the efficiency of application in 6.73 %.saving 31.2 % of the water valumen applied and increased the productivity of the water in 36 % with respect of the continius flow irrigation. The study of the acting indicator of the irrigation allowed us corroborate, that the intermittent discharge irrigation is superior of the tradicional method, it reduces the water lost and soil for it increased the efficiency of the application and the irrigation productivity.

ÍNDICE

<i>Contenido</i>	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1 Riego en el mundo	4
1.2 Método de riego superficial	5
1.2.1 Técnica de riego por surcos	5
1.2.2 Fases del riego	7
1.3 Riego Intermitente	10
1.3.1 Descripción general del riego intermitente	11
1.4 Eficiencia del riego	14
1.4.1 Las definiciones de eficiencia y su evolución en el tiempo	15
CAPÍTULO II	
2 MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 Ubicación de la unidad experimental	18
2.2 Diseño experimental	18
2.3 Lámina de riego	21
2.4 Medición del escurrimiento superficial	21
2.5 Eficiencia de riego	22
2.6 Procesamiento estadístico	23
CAPÍTULO III	
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
3.1 Aforo del caudal de entrada	24
3.2 Lámina de riego	25
3.3 Escurrimiento superficial y producción de sedimento	26
3.4 Eficiencia de riego	31
CONCLUSIONES	35
RECOMENDACIONES	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

INTRODUCCION

El agua es un bien cada vez más escaso no solo por la cantidad sino también por la calidad y como tal los principales usuarios, que son los agricultores, están obligados a usarla con la mayor “eficiencia” posible. Aun en los territorios hasta ahora considerados con agua para riego suficiente, una aplicación con bajo control se puede traducir en problemas de contaminación del acuífero que repercutirán negativamente en los agricultores situados aguas abajo. El uso de más agua de la necesaria para el desarrollo óptimo de los cultivos puede impedir la instalación de nuevos sistemas en otras zonas y/o provocar un sobredimensionamiento de las obras hidráulicas que las sirven (González, 2008).

Durante las últimas décadas, el riego ha sido crucial para el suministro de alimentos al mundo. La actividad agropecuaria es sin dudas el usuario más importante de los recursos hídricos, suelos y biodiversidad. Es por ello que la actividad del riego está siendo cada vez más criticada por su uso ineficiente y hoy se encuentre en el centro del debate sobre cómo conservar los ambientes del mundo. El 70 % de la extracción total del agua del planeta es usada en agricultura, con un porcentaje cercano al 85 % cuando se consideran solamente los países en desarrollo (Rojas, 2008).

Uno de los aspectos comunes de las áreas de riego en la Cuba es la baja eficiencia del uso del agua. La eficiencia de riego promedio es del 40 % y resulta baja a muy baja si se la compara con las obtenidas en otros países de similar desarrollo. Esto se debe principalmente al predominio de los métodos de riego superficial sobre aquellos más modernos como los riegos presurizados. De aquí la importancia de incrementar su eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución (Brown, 2000 y Santana, 2007).

El riego superficial en el país representa en la actualidad el 70 % (347 380,6 ha) del área beneficiada, aproximadamente, en todo tipo de cultivos y en la mayoría de los suelos y de las condiciones topográficas, se utilizan otros métodos como la aspersion (16 %) y la micro irrigación (6 %); pero las condiciones económicas actuales y el costo de energía no permiten sustituir completamente el riego superficial por métodos más eficientes (Alonso, 2010). Un incremento en área de riego solo sería posible si se

aumenta la eficiencia de aplicación, lo cual puede lograrse si se emplean con tecnologías de riego más avanzadas.

El riego superficial es el método de irrigación más utilizado en el mundo, cubre alrededor de 250 de las 270 millones de hectáreas beneficiadas con el riego a escala mundial (Playán, 2008; Arbat *et al.*, 2009 y Madrigales, 2009). Por esta razón está necesitado de asimilar las nuevas tecnologías para optimizar el diseño y operación de los sistemas, de tal manera que posibiliten su mecanización, automatización y el uso racional del agua y la energía; o sea, los especialistas están obligados a desarrollar nuevas ideas para la conservación del agua y al mismo tiempo incrementar o mantener la producción agrícola a partir de las condiciones en que se aplica actualmente el riego superficial.

Un desarrollo reciente en tecnología del riego por superficie lo constituye el llamado riego por pulsos o con caudal intermitente (*Surge flow*). Esta técnica tiene el potencial para mejorar significativamente las eficiencias de riego, al minimizar las pérdidas por percolación profunda y escurrimiento al final del surco, y ser más versátil para el regador cuando se lo compara a otros sistemas. Sin embargo implica la adopción de nuevos conceptos para el diseño.

Los estudios realizados hasta el 2003 en la provincia Sancti Spíritus en el riego superficial, fueron enfocados fundamentalmente en utilización del riego para maximizar el rendimiento de los cultivos, a partir de esta etapa se comenzaron a investigar parámetros de diseño y los indicadores de desempeño del riego por surco, principalmente con caudal intermitente, entre las principales investigaciones cuentan:

Rodríguez y Santana (2003), "*Evaluación de la modalidad de riego con caudal intermitente para el cultivo de la cebolla (*Allium cepa* L) en Banao, Sancti Spiritus*" (Tesis de grado). La misma tuvo como esencia el riego intermitente con criterios de manejo de distancias constantes y tiempos variables, utilizando como dispositivo para lograr la intermitencia del caudal de forma manual, las espitas de PET (polietileno de tereftalato). Destacándose como resultado que el tratamiento de tres intermitencias o ciclos de riego se logró reducir en 1,3 veces el tiempo de avance del riego respecto al método tradicional. La limitante fue la acumulación de sedimento en el interior de la

espita que reduce el tirante y consigo el caudal de entrada. Esta investigación fue replicada por Rodríguez y González, (2011) sobre la base del diseño y mejoramiento del dispositivo y la determinación del caudal que llega al canal que alimenta a los surcos.

Santana (2007), "*Tecnología sostenible para el mejoramiento del riego por surcos y protección del suelo en el cultivo de la cebolla (*Allium cepa*, L.) en condiciones de pre montaña*" (Tesis de Doctorado). En esta investigación se diseñó un tanque de descarga por el fondo (TDF), como dispositivo para lograr el caudal intermitente de forma automatizada bajo el principio de flotación. El mecanismo utilizado para la apertura y cierre del TDF, fue el sistema de válvula empleada en inodoros de baño sanitario doméstico. Este provoca la abertura y el cierre automático por el principio de flotación, accionado por un flotador de poli espuma, cuando se alcanza el tirante máximo. Los principales resultados están enmarcados en que el riego intermitente es superior al riego con flujo continuo, al proporcionar ahorros de agua, tiempo, mano de obra y mejorar ostensiblemente el patrón de humedecimiento del surco entre sus extremos final e inicial del surco.

El TDF demostró su funcionalidad y es posible su construcción con los recursos locales de cualquier territorio de la provincia y del país. Esta investigación fue replicada en la zona por Rodríguez *et al.*, (2011) en suelo Ferralítico Rojo Lixiviado (FRL) y Rodríguez y Viera (2013) en su (Tesis de Maestría) donde quedaron demostrados los resultados antes mencionados además del efecto del riego intermitente sobre las pérdidas de agua y suelo por escorrentía.

Rodríguez (2014), "*Tecnología para el mejoramiento del riego por surcos, asociado al cultivo de la cebolla en suelo Ferralítico Rojo Lixiviado*" (Tesis de Doctorado). En esta investigación se diseñaron varios elementos estructurales que permitieron controlar el flujo de agua para el riego su conducción y distribución en el terreno, además de la utilización de la Válvula Automática Hidráulica de Control FLUCON DN150 como dispositivo para lograr la automatización del riego. El principal resultado de esta investigación se expresó en que reduce respecto al método tradicional el tiempo de aplicación en 1,4 veces, en 24,9 % los volúmenes de agua aplicada, las pérdidas de

agua por escorrentía en un 63,6 % y la producción de sedimento en 84,8 % por cada riego.

A partir de estudios precedentes que se han hecho en la zona permitió determinar que más del 60 % de los productores utiliza el método de riego superficial, sus ingresos, dependen básicamente de este cultivo del tabaco y el frijol. En la comunidad La Tosas el recurso agua para riego es cada vez más limitado situación compromete la estabilidad de las producciones por:



Situación problemática

1. Baja eficiencia de aplicación del riego por el incorrecto diseño y operación de los sistemas.
2. Utilización de prácticas agrícolas que ocasiona una mala distribución del agua en la superficie de riego.
3. El manejo de los sistemas de producción se realiza de forma desordenada, sin tener en cuenta los límites y cursos naturales.

Problema científico

¿Cómo contribuir al diseño y el manejo del riego por surcos a nivel parcelario en suelos Pardo Sialítico Carbonatado para el incremento de la eficiencia del riego?

Objetivo general

Contribuir al mejor aprovechamiento del agua y uso eficiente del riego por surcos a nivel parcelario en suelos Pardo Sialítico Carbonatado.

Objetivos específicos

1. Determinar la eficiencia del riego por surcos con escurrimiento superficial con diferentes criterios de manejo
2. Evaluar la tecnología propuesta en el mejoramiento de los indicadores de calidad del riego y la relación caudal-escorrentía y caudal-pérdidas de suelo.



CAPÍTULO I

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 El riego en el mundo

La importancia incuestionable que tiene el agua para la vida en la tierra es demostrada por Pérez, (2002) al reafirmar que la vida en este planeta tuvo su origen en el agua, la cual permitió junto con el dióxido de carbono  algunos nutrientes esenciales la formación de células. Estas lograron producir su propio alimento a partir de la radiación solar; lo que permite posteriormente el proceso evolutivo constante de estos pequeños organismos hacia otras formas de vida más evolucionadas.

El agua forma parte de todos los ecosistemas, de su existencia y conservación depende la mayor parte de los recursos naturales, así como todas las actividades humanas. A partir de estos aspectos esenciales, define que el manejo y conservación de este recurso es el tema central de la gestión ambiental según Cabanillas (2000).

De la superficie total mundial se cultivan cerca del 11 % y de ellas 17 % se riega y esta área produce 40 % de los alimentos mundiales. Cerca de un 40 % de la tierra cultivable se encuentra en zonas húmedas, alrededor de un 40 % en zonas secas donde el riego complementario puede triplicar las producciones agrícolas; el 15 % se encuentra en zonas semiáridas donde el riego puede duplicar el volumen de producción agrícola, tanto por el aumento de las áreas de siembra como por el aumento de los rendimientos de las cosechas y el 5 % restante de toda la tierra cultivable se encuentra en zonas intermedias donde la agricultura sin riego es prácticamente imposible (Camacho, 2005).

Este propio autor plantea que dependientemente de la forma de riego que se utilice, se observa que el ingreso promedio de los campesinos es casi tres veces mayor a su contraparte sin irrigación y la proporción de sus costos con respecto a sus ingresos disminuye sustancialmente para cualquier extensión de tierra 

El conocimiento humano evoluciona a la par del desarrollo científico mundial con relación al riego, los primeros sistemas que se utilizaron en el mundo para llevar el agua a la planta fueron los superficiales, desde la época del gran Egipto y la China de los canchales hidráulicos. Un comienzo de la agricultura bajo riego en las civilizaciones que

se asentaron en el valle del Tigris - Eufrates en Mesopotamia, es frecuente denominar a este espacio geográfico “Creciente Fértil”. Isaac Asimov y Frank White en su libro “*El paso de los milenios*”, que ha sido consultado por Roqué, (2009).

El riego se define como la aplicación artificial de agua al terreno con el fin de suministrar a las especies vegetales la humedad necesaria para su desarrollo. En sentido más amplio, la irrigación puede definirse como la aplicación de agua al terreno con los siguientes objetivos: proporcionar la humedad necesaria para que los cultivos puedan desarrollarse; asegurar la cosecha contra sequías de corta duración; refrigerar el suelo a la atmósfera para de esta forma mejorar las condiciones ambientales para el desarrollo vegetal; disolver sales contenidas en el suelo; reducir la probabilidad de formación de drenajes naturales y dar tempero a la tierra. El objetivo que se persigue con el riego es aplicar a los cultivos, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua en el momento adecuado y en la cantidad necesaria para lograr un crecimiento óptimo (Morabito, 2005).

1.2 Método de riego superficial

1.2.1 Técnica de riego por surcos

El término “riego superficial” se refiere a una clasificación amplia de métodos de riego, en el cual el agua es distribuida en un campo por un flujo de agua por gravedad, con superficie libre. En este método de riego se deposita el agua sobre la superficie del suelo y esta fluye sobre la misma. En cualquier caso, hay que disponer de algún medio para regular el agua de modo que penetre a la profundidad adecuada del suelo, con el fin de suministrar a la planta el agua que necesita para que ésta pueda distribuirse uniformemente por todas partes del terreno. Para que se cumpla la potencialidad de estos sistemas se deben diseñar y operar correctamente, pues en la mayoría de los casos las deficiencias que persisten en estos aspectos constituyen la causa de las pérdidas excesivas de agua por percolación profunda y por escurrimiento superficial en el extremo inferior del surco (Delgadillo, 2000; Walker, 2003 y Pérez, 2004).

Hidráulicamente, los surcos funcionan de la misma manera que los canales; la diferencia fundamental estriba en que, mientras en éstos se intenta conducir el máximo caudal posible a distancias considerables con la mínima pérdida por infiltración, en los

surcos, precisamente lo que se intenta es hacer que en cortos recorridos se infiltre el agua que se conduce. En los canales, se desprecian las pérdidas por infiltración y evaporación, puede decirse que el caudal se mantiene constante en toda su longitud; mientras que en los surcos el caudal es variable, decreciente, a medida que aumenta la distancia. Ello plantea especiales y complejos problemas que dificultan en parte la aplicación de los conceptos de mecánica de los fluidos, por lo que deben recurrir a ellos incluso, para el diseño a ensayos en el terreno. Los esfuerzos por alcanzar altas eficiencias de aplicación en los sistemas de riego por surcos están limitados por la amplia variación espacial y temporal de las características de infiltración del suelo (Brown, 2000).

Este método es todavía el sistema más extendido en el mundo. La mayoría de las técnicas que conforman este método son fruto de la experiencia local y de procesos de ensayo. El riego superficial fue el primer sistema en ser aplicado en el mundo, pero el último en ser analizado de forma completa. Se caracteriza porque el agua aplicada corre libremente por efecto de la gravedad sobre la superficie del terreno hasta alcanzar el extremo más bajo de la parcela (Morábito *et al.*, 2012).

Según Brown, (2006) la principal característica del riego superficial es que el agua se distribuye en el campo por gravedad, de modo que el caudal de riego disminuye a lo largo del campo debido a la infiltración del terreno. En la práctica ocurre con mucha frecuencia que el suministro de agua en el surco no se suspende cuando el frente de avance alcanza el extremo final del surco, si no cierto tiempo después.

El uso internacional del riego superficial se debe a la simpleza de su operación y al bajo consumo de energía. A pesar de esas ventajas, esta forma de riego ha tenido muchos detractores en Cuba, debido a la baja eficiencia en su aplicación. Por ello, hubo un desarrollo impetuoso del riego por aspersión y de las máquinas de riego. Las limitaciones en el consumo de energía en los últimos años, han provocado la revalorización del riego superficial en el país, esta tecnología ocupa alrededor del 70 % de las áreas bajo riego, aunque la mayor parte de las mismas están ocupadas por el cultivo del arroz (*Oryza sativa* L), caracterizados por su baja eficiencia, debido a que se

obvian principios indispensables en el proyecto que faciliten un eficiente manejo del agua por el regador (Pacheco *et al.*, 2006).

1.2.2 Fases del riego

El método de riego superficial según plantean García y Fontova (1998); González (2008), cualquiera de las técnicas empleadas se divide en fases que separan procesos hidráulicos distintos y que ayudan a la comprensión y el análisis del movimiento del agua sobre la superficie del campo. Las fases del riego están separadas por los tiempos característicos en los que se producen ciertas singularidades del riego.

Fase de avance: es la parte del tiempo de riego durante la cual el agua avanza por la superficie del terreno desde la parte superior a la inferior de los límites del campo. Esta fase es la que presenta mayor interés porque es la responsable de la desuniformidad en la distribución del agua infiltrada en la sección final del surco. El objetivo del diseño y manejo del riego superficial es generalmente completar la fase de avance tan rápido como sea posible para minimizar la diferencia entre estos tiempos de oportunidad en los dos extremos del campo de riego (Elliott *et al.*, 1982) consultado por Brown, (2000).



Fase de almacenamiento: ocurre es la parte del tiempo comprendido entre el tiempo de avance y el tiempo en que se corta el suministro del gasto de entrada. El almacenamiento superficial se define como el volumen de agua que permanece sobre la superficie del surco y es una función de la sección transversal, la pendiente, la rugosidad y el gasto. El mismo cambia con el tiempo antes que el flujo alcance el régimen uniforme pues el perfil superficial varía lentamente en relación al tiempo antes de alcanzar el final del surco. Esta fase se caracteriza porque el tirante en el extremo inicial del surco se reduce gradualmente en función del decrecimiento del volumen superficial de agua debido al efecto combinado de la infiltración y el escurrimiento superficial.



Fase de vaciado o consumo: es la parte del tiempo de riego entre el corte del gasto de entrada y el comienzo de la recesión o desaparición del agua de la superficie.



Fase de recesión: es la parte del tiempo entre el comienzo de la recesión y la desaparición total del agua en el campo regado. En el riego por surcos la fase de recesión ocurre rápidamente, por tanto se asume generalmente que es instantánea, lo

que permite representarla con una línea recta. En el riego intermitente la recesión se considera importante porque se producen avances del flujo durante esta fase. Este problema puede ser crítico en el caso de tiempos de cierre pequeños, porque el frente de avance de un ciclo se mezclaría con la recesión del ciclo anterior (González, 2008).

La fase de recesión según Brown (2000), tiene dos partes: la recesión vertical y la horizontal. La recesión vertical ocurre cuando se corta el agua que entra en el surco y el tirante comienza a descender en su extremo inicial; mientras el frente de agua aún avanza hacia el final del surco. Cuando el agua inicia el retiro a lo largo del surco, se inicia la recesión horizontal en tanto que el frente de agua aún avanza hacia el extremo final y termina cuando el agua se ha infiltrado completamente en el surco.

La figura 1.1 representa los tiempos característicos y las fases que éstos definen:

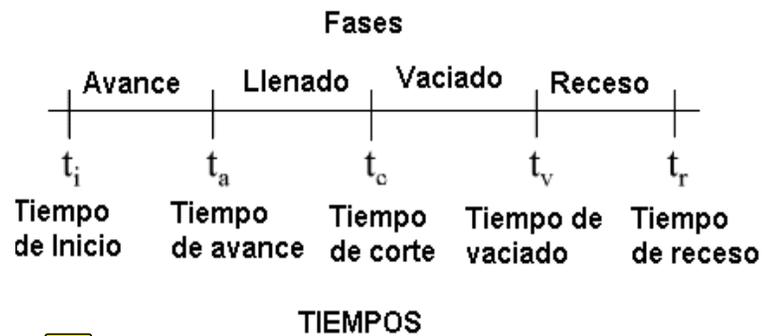


Figura 1.1. Tiempos y fases del riego. Fuente: González (2008).

Essafi (1983), señala que las fases de vaciado y recesión a menudo se desprecian en el riego por surcos pues el volumen total de agua que permanece en el surco a partir del tiempo de corte es solo un porcentaje pequeño del volumen total aplicado.

Los surcos son canales, poco profundos, y uniformemente espaciados, los cuales conducen el agua dentro del terreno y la distribución por infiltración vertical y horizontal (esta es la principal diferencia con las técnicas de inundación, terrazas y bandas, en las cuales la infiltración es vertical). Las direcciones, forma y espaciamiento entre surcos desempeñan un importante papel en la distribución del agua en el terreno (García y Fontova, 1998).

En la figura 1.2 se muestra el patrón de humedecimiento típico del riego por surcos con pérdidas excesivas por percolación profunda y escorrentía al pie del surco (Rodríguez y Santana, 2003; Pacheco *et al.*, 2006).

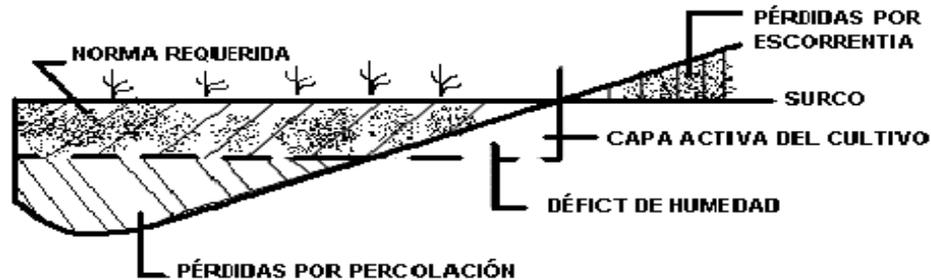


Figura 1.2. Patrón transversal típico del agua infiltrada en el riego por surcos con flujo continuo.

Fuente: Rodríguez y Santana, (2003).

El riego por surcos para que opere de manera idónea debe tener un equilibrio entre los procesos de avance y el de infiltración para que la lámina infiltrada en cada punto del surco sea similar, todas las plantas de la parcela dispongan de aproximadamente la misma cantidad de agua, y esta cantidad de agua coincida con las necesidades de las plantas. Obviamente, Camejo, (2000) plantea que la aplicación de métodos tradicionales de gravedad con diseños y ejecución deficiente, conllevan a una pobre utilización de los recursos humanos y naturales.

Alonso, 2010  al analizar la problemática del riego superficial en Cuba puntualiza que la carencia de una cultura científico-técnica dentro de la actividad del riego superficial, unido al rezagado carácter de las investigaciones técnicas, constituyen algunos de los factores que inciden negativamente en la correcta explotación de los sistemas y en su efecto sobre la calidad y efectividad de los mismos.

Por tanto, es necesario mejorar la eficiencia del uso del agua de los pequeños agricultores mediante el fomento de la difusión y adopción de cambios tecnológicos sostenibles, como la tecnificación de un sistema de riego superficial con tuberías de salidas múltiples y la aplicación del agua mediante riego con caudal intermitente, el cual se presenta como una alternativa a los problemas encontrados en un riego superficial tradicional (Rodríguez *et al.*, 2011).

1.3 Riego intermitente

1.3.1 Descripción general del riego intermitente

Las condiciones actuales de la economía cubana imponen la necesidad de encontrar medidas que conduzcan al incremento de la eficiencia en los sistemas de riego superficial. A pesar de ser estos sistemas los más utilizados en el mundo, su eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución son comúnmente muy bajas, presenta ineficiencias por percolación profunda en el primer tercio del surco y por escurrimiento superficial al final del surco (Brown *et al.*, 2003). La solución de esta problemática está en la modernización del riego superficial mediante un conjunto de medidas:

1. Conducción del agua.
2. Distribución y control del agua.
3. Nivelación del terreno.
4. Tecnología de riego.
5. Operación del sistema.

Podría suponerse que sería imposible conseguir la uniformidad en la distribución del agua en estas condiciones, porque inevitablemente penetraría más cantidad de agua en el suelo, en el extremo inicial de la zona regada que en el final. Aunque siempre existe esta tendencia, es posible reducir al mínimo la falta de uniformidad y mejorar en la distribución del agua con riego superficial comparable con la de otros métodos. Se ha demostrado que una vía para el mejoramiento del riego superficial es el riego con caudal intermitente o riego por impulso (Rodríguez y Santana, 2003).

El sistema de riego intermitente, es una técnica que fue desarrollada para el control del agua de riego. Su origen se debió a la necesidad del gobierno norteamericano de proveer a sus agricultores de un medio económico y eficaz que permita un ahorro del agua y su manejo en suelos salinos. Fue entonces, cuando las oficinas de los Distritos de Agua en conjunto con diversas universidades, perfeccionaron a principios de la década de los 80' esta metodología conocida en inglés como *Surge Flow*. En zonas semiáridas de los Estados Unidos (estado de UTA, Texas, California, etc.), se han realizado pruebas que han puesto de manifiesto, tanto en parcelas experimentales como en áreas de producción, las ventajas del riego intermitente, frente a los métodos

convencionales de descarga continua en sistemas de riego superficial (Nalvarte y Huachos, 2007; Santana, 2007 y Rodríguez y Alonso 2011).

Estos propios autores plantean que fueron los Drs. Glen Stringham, Jack Keller y A. Alvin Bishop a finales de la década del 70 del siglo pasado que introdujeron el concepto de Surge Flow en la conferencia sobre especialidades en irrigación y drenaje de la American Society of Civil Engineers. En marzo de 1986, la oficina de patentes de los EEUU registró la patente N° 4 577 802 titulada “*Método y Sistema para regar surcos*”, nombrando a los Drs. Jack Keller y G.E. Stringham como inventores y a la Fundación de la Universidad de Utah como apoderada. Desde entonces se han experimentado de manera continua en varios centros de universidades privadas y estatales de California y Texas, así como en las de Kansas y Colorado, entre otras (Romay *et al.*, 2010).

A pesar que en la actualidad dicha metodología de riego ya se ha difundido por todo el mundo, es importante indicar que los criterios para su diseño, sus rangos de aplicación práctica, así como sus ventajas y desventajas respecto a otros métodos de riego aún no están bien definidos (Cáceres, 1999; Nalvarte y Huachos, 2007).

El riego intermitente, también llamado riego por caudal discontinuo, utiliza un efecto natural que tienen todos los suelos en mayor o menor medida. La naturaleza dispersa del suelo y su consecuente actividad interfacial, da origen a fenómenos tales como la absorción del agua y los elementos químicos, el intercambio iónico, la adhesión, la contracción, dilatación, la dispersión, floculación y la disminución de la capacidad de infiltración, una vez mojado, se retira el agua y se deja "descansar" por un corto tiempo, de esa forma, el agua recorre el surco en varios ciclos discontinuos (3 a 6). 

La explicación del fenómeno del riego se debe a que entre un ciclo y otro se produce un disgregamiento de los agregados del suelo que favorece el reordenamiento de las partículas del surco y una migración de sedimentos, se dispersan los agregados en los poros y grietas, provoca un proceso de “sellado”. Por esta razón al haber una interrupción de suministro de agua queda aire atrapado en los poros del suelo, durante el proceso de recesión, la estructura del suelo se altera, los terrones se disuelven parcialmente, las partículas se acomodan y forman una sedimentación que origina el

aislamiento entre la superficie y el agua del próximo tiempo de avance en forma más rápida sobre la tierra húmeda según Ismail, (2004) y P&R Argentina, (2008). 

Según Walker, (2003) el riego intermitente esta conceptualmente determinado por la interacción de las intermitencia con las propiedades físicas del suelo, probablemente con el desarrollo acelerado de un sello superficial delgado comprimido, compuesto por partículas de suelo muy finas, creado por el movimiento del agua. Durante el periodo de drenaje, el aumento de presiones negativas consolida este sello delgado y en consecuencia reduce la permeabilidad.

En la descripción del proceso físico que ocurre en la interacción suelo-agua cuando se suspende el gasto entre impulsos. Según Rodríguez *et al.* (2011) este cambio en las propiedades del suelo, disminuyen las pérdidas por percolación profunda en el primer tercio del surco (regula la infiltración), mejora el patrón de humedecimiento, alcanza mayor equilibrio el tiempo de oportunidad y reduce las pérdidas por escorrentía superficial, se obtiene mayor eficiencia en el uso del agua (80 a 85 %) en este método de riego. La técnica de riego por pulsos se completa en dos etapas, avance y remojo. Durante el avance el agua es impulsada a través del suelo del surco hasta mojar su longitud total. Los remojos son los pulsos adicionales a fin de incrementar la profundidad de agua en el perfil para reponer la lámina de riego.

Para manejar el riego intermitente los operadores del sistema de riego tienen dos objetivos principales: (I) avanzar el agua hacia el extremo final de los surcos, tan rápido como sea posible y (II) minimizar los escurrimientos durante los ciclos intermitentes siguientes (Brown, 2000). Cuando se habla de manejo, se hace referencia a que las variables a controlar son: el gasto por surco y el tiempo de ciclo. Estas variables fluctúan siempre al cambiar las condiciones del campo.

Con el uso del riego intermitente se han obtenido resultados satisfactorios en suelos arenosos y de textura fina. Se ha logrado reducir en un 28 % el consumo de agua total sobre terrenos arcillosos del altiplano de los EE.UU. Con el primer riego intermitente el consumo de agua se redujo a un 32 % y solo un 16 % para los siguientes cuatro riegos. Un tiempo de apertura excesivo puede ser similar al riego con flujo continuo y causar excesivas pérdidas por percolación profunda. El tiempo de cierre debe ser lo

suficientemente grande durante la fase de avance para que el agua se infiltre en el surco antes del próximo ciclo de intermitencia (Nalvarte y Huachos, 2007).

Por otra parte, aunque el flujo se suspenda, en consecuencia la infiltración superficial también, las partículas de arcilla contenidas en el suelo humedecido continúan con un proceso de expansión tanto el agua como el suelo en contacto con la atmósfera, captan aire por atracción capilar y bloquean las pequeñas superficies de los poros del suelo. El proceso se repite en cada ciclo (tiempo de aplicación), por lo tanto durante los próximos suministros de agua se reduce la infiltración y la resistencia a la rugosidad de la superficie del suelo, se garantiza que el flujo circule con rapidez y se consiga un avance mayor y una mejor uniformidad en el riego (Carbajal, 2004).



La causa de la reducción entre la fase de avance y la fase de recesión, logra una distribución más uniforme del agua, gracias al riego por impulsos, no se conoce con exactitud, pero tiene que ver con la dispersión de los agregados del suelo; con la fase de corte las partículas de arcilla continúan su expansión, disminuye el tamaño de los poros; al mismo tiempo, las partículas más finas, generalmente limosas, arrastradas por la corriente del agua, tienden a depositarse sobre el fondo del surco, con lo que también disminuye la infiltración (Mitchell y Stevenson, 1993; Nalvarte y Huachos, 2007).

El patrón de humedecimiento del surco (figura 1.3), comparado con el del riego continuo mejoraría sustancialmente como se aprecia en el gráfico que sigue:

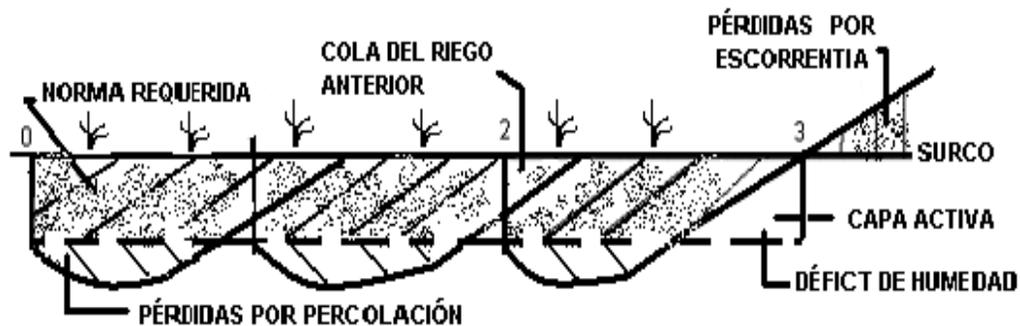


Figura 1.3. Patrón transversal típico del agua infiltrada en el riego por surcos con caudal intermitente. Fuente: Rodríguez y Santana, (2003).

El riego intermitente parece ser una técnica de destacada potencialidad para solucionar todos los problemas referidos a los sistemas gravitacionales (Brown, 2003 y Lazo,

2007). Los beneficios fundamentales del riego por impulsos consisten en la aplicación uniforme del agua, regar más áreas en menor tiempo, control del escurrimiento, prevención de la acumulación de sales dentro de la zona radical, ahorro de agua de 30 a 50 %, puede usarse en cualquier sistema de labranza, sirve para todo cultivo, controla mejor la erosión, reducción drástica de la mano de obra, alcanza eficiencias de aplicación similares a la aspersion; se reduce y elimina las pérdidas por escorrentía, se pueden aplicar láminas pequeñas o grandes, con un perfil de mojado uniforme y baja erosión (Salehm y Hussein, 2006).

1.4 Eficiencia del riego

El riego produce resultados muy favorables para una zona o región, pero su mal manejo puede llevar al deterioro del suelo y agua, en particular, y del ambiente en general. Usar racionalmente el agua desde el punto de vista agrícola, implica maximizar el beneficio a obtener y manejarla apropiadamente (oportunidad del riego y cantidad necesaria y suficiente de manera de reducir al mínimo las pérdidas y desperdicios). La evaluación de la eficacia del riego en un área determinada constituye una forma de establecer el grado de racionalidad en el uso del agua. Con el avance científico se han establecido criterios de evaluación de esta práctica, como una forma de calificarla o de evaluar su desempeño (Romay, 2008).

La evaluación de los métodos de riego tiene por objetivos: calcular las eficiencias parcelarias, conocer la efectividad de la operación del método de riego, rediseñar para mejorar el desempeño y comparar los valores de eficiencias obtenidos con otros métodos de riego alternativos. La evaluación del riego por superficie a campo no sólo proporciona información que puede ser usada para detectar posibles problemas, sino también como guía esencial para mejorar el manejo y control del riego. Pueden seleccionarse varias alternativas para evaluar los sistemas de riego por superficie, el cual depende del tiempo y del esfuerzo que se pueda invertir en el estudio (Morábito *et al.*, (2012).

Estudios realizados por este grupo de investigadores sobre la eficiencia de riego en Argentina, mencionan varios conceptos de eficiencia y esencialmente la dividen en dos grupos. La eficiencia de red de riego (eficiencias externas) y las eficiencias en el interior

de la propiedad (eficiencias internas). Conceptualmente definir si un sistema de riego es suficiente o adecuado depende de: la cantidad de agua almacenada en la rizósfera, las pérdidas por percolación por debajo de la zona radicular, las pérdidas de agua por escurrimiento, la uniformidad de agua aplicada y el déficit realmente de la rizósfera después del riego. El fin del desempeño dependerá de la optimización de la producción y de las utilidades 

El uso de más agua que la necesaria para el desarrollo óptimo de los cultivos puede impedir la instalación de nuevos sistemas en otras zonas y/o provocar sobre explotación de las obras hidráulicas. La eficiencia de aplicación del agua en un sistema de riego es la proporción porcentual entre la cantidad de agua almacenada en la zona del sistema radicular (disponible para la planta) y la cantidad de agua aplicada por el sistema de riego. Los regadores históricamente han resuelto los problemas de falta de uniformidad al aplicar mayor caudal de los que se necesitarían si la aplicación fuera uniforme. Esta solución es de carácter puramente práctico, la aplicación de más agua de la necesaria facilita el lavado de los fertilizantes e incrementa los costos de operación (González, 2008).

La política agraria actual de Cuba se orienta hacia el incremento de la eficiencia de los sistemas de riego y la conservación de suelos (Capote y Rafols, 2007) así como la implementación de variantes de riego a pequeña escala sin consumo de energía eléctrica o diesel (Sierra, 2007) y construcciones de bajo costo (Alfonso, 2007) que permitan un mejor uso de los recursos naturales (Dueñas, 2007).

1.4.1 Las definiciones de eficiencia y su evolución en el tiempo

Desde Israelsen y Hansen (1965) hasta Jensen (2007) la eficiencia de riego (IE, *irrigation efficiency*) se define como el cociente entre el volumen de agua usada beneficiosamente y el volumen total de agua aplicada. Esta definición hace foco en la cantidad de agua derivada de una determinada fuente destinada a asegurar usos beneficiosos y alcanza tanto a lo referido a agua consumida por el cultivo como -más modernamente- a lo requerido para satisfacer necesidades agronómicas como el requerimiento de lixiviación (lavado de sales). El concepto de IE proporciona una

medida del funcionamiento general del riego y el obtener altas eficiencias constituye un permanente desafío para el productor.

Los indicadores de desempeño son las herramientas de utilidad encontradas por los investigadores para mejorar una baja performance en el uso del recurso. La definición de IE involucra a las eficiencias de conducción (E_c) y de aplicación (E_{ap}) pero esto no es tan así cuando el agua cambia de objeto a sujeto de transformación al pasar de la red de canales de riego (sistema) a la propiedad del agricultor (parcela). Aquí el término IE se “contamina” con un indicador de eficacia que introduce algunas complicaciones conceptuales (Molden *et al.*, 2010).

Mientras que para Perry (2007) lo general del uso entre el término eficiencia de riego (IE) y su terminología asociada “pérdidas de agua” puede dar una falsa idea de agua “desperdiciada”, para Halsema y Vincent (2011) la IE está definida desde la perspectiva del propietario: la asignación del agua pertenece al sistema de riego y IE mide qué tan bien el sistema maneja/usa el agua, es capaz de conducirla sin desperdiciarla (componente de eficiencia) y la convierte en un uso productivo (componente de eficacia).

Por lo tanto, desde el punto de vista del agricultor, el agua que sale del manejo del sistema (dominio de la ingeniería) es considerada una pérdida. Sin embargo, desde la mirada de los responsables de la gestión, las recomendaciones apuntan a una planificación de las diversas nociones y valores de eficiencia de uso del agua (*water use efficiency*, WUE) y de los factores de productividad (*water productivity*, WP) a nivel de cuenca. Esto hace posible identificar oportunidades y potenciales conflictos en el cambio de los usos del agua, incluye también la perspectiva del “propietario” y permite conocer qué valores atribuir al numerador (producción, i.e. kg) y al denominador (uso del agua, i.e. m) del cociente que define la productividad del agua (Morábito *et al.*, 2008).

La WP es un indicador fisiológico ya que representa la capacidad productiva de un cultivo (o de un sistema) por unidad de agua (evapo) transpirada. La WUE calculada de esta manera es un parámetro que representa la eficiencia de utilización del agua a nivel de propiedad / parcela con todas las limitaciones propias de una IE e ilustra sobre la

necesidad de maximizar la producción por unidad de agua aplicada (Fraiture y Wichelns, 2010; Molden et al., 2010) 

Si bien parece ser una medida de la productividad del agua suministrada es, en realidad, una medida de la eficiencia con que se está usando el agua en la parcela (bajos valores de WUE proporcionan una falsa sensación de “derroche”). Sin embargo, el principal problema que se presenta con el uso generalizado del término WUE es la imprecisa interpretación y lo aleatorio de los diferentes componentes del balance hídrico (Bluemling *et al*, 2007; Perry, 2007) que la hacen poco confiable.

Para evitar confusiones y una inapropiada comparación de valores Halsema y Vincent (2011) aconsejan reservar el uso del concepto productividad del agua (WP) como una medida de la productividad de los procesos fisiológicos que ocurren en el cultivo destinados a la producción de biomasa (y/o rendimiento) relacionada con el consumo real de agua. Para Pereira *et al.*, (2012), el uso del agua es más eficiente cuando se maximizan los usos benéficos, se incrementa su productividad y se minimizan las pérdidas y/o la contaminación. Esto no significa que cuando se hace un uso más eficiente del agua se consuma una menor cantidad ya que maximizar los usos beneficiosos y la productividad del agua y de la tierra al utilizar la tecnología, puede dar al cultivo la oportunidad de una mayor evapotranspiración (Ahmad *et al.*  2007). El término uso eficiente del agua está pensado  como un sinónimo de uso racional o sustentable.

Grassi, (1998) y Morábito *et al.* (2012), distinguen básicamente tres eficiencias de riego, ellas son: eficiencia de aplicación *EAP*, la eficiencia de almacenamiento *EAL* y la eficiencia de distribución *EAR*. La eficiencia de aplicación ha sido definida como el cociente entre el volumen de agua almacenado en el perfil de suelo y el volumen de agua aplicado.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Ubicación de la unidad experimental

La investigación se desarrolló en el sector campesino perteneciente a la localidad Las Tosa, en la Finca “La Paneca” sobre un suelo Pardo Sialítico Carbonatado (Hernández *et al.*, 1999) de la Cooperativa de Créditos y Servicio (CCS) “Pedro Hernández Zaya”, ubicado en la región central de Cuba en la parte norte de la provincia Sancti Spiritus. Esta investigación forma parte del Proyecto Nacional de Ciencia y Técnica (00200006) “Mejoramiento de la Tecnología de Riego por surcos”.

Las propiedades hidrofísicas fundamentales del suelo en la unidad experimental se presentan en la tabla 2.1 para una profundidad promedio de 0 - 50 cm.

Tabla 2.1: Características de las propiedades hidrofísicas del área experimental

Área total de la unidad experimental	1 550 m ²
Separación entre surcos	0,70 m
Largo de los surcos	60 m
Pendiente longitudinal S_0 (%)	1,2
H: profundidad efectiva del cultivo (m)	0,30
Densidad volumétrica (α)	1,11 g cm ⁻³
Densidad real (β)	2,6 g cm ⁻³
Capacidad de campo (% bss)	28,05
Lp: límite productivo (% bss)	22,44

2.2 Diseño experimental

La determinación de los parámetros del riego por surcos en el cultivo frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), se realizó a partir de los resultados experimentales obtenidos en pruebas de campo bajo las condiciones en que se desarrolla la producción de este cultivo en la localidad, con surcos abiertos y drenaje libre en su extremo. El marco de siembra empleado fue de 0,70 x 0,10 m y la variedad de Bat-304 de testa negra. El diseño experimental que se utilizó es de parcelas en franjas con tres tratamientos (figura 2.1) con parcelas de 10 surcos y 60 m de longitud con una pendiente de 1,2 %, cada parcela se dividió en dos piquetes o lotes de riego cada uno de cinco surcos con el objetivo de imitar prácticas comunes de la comunidad.

Se evaluaron un total de cinco eventos de riego, sin considerar el mine que se efectuó de forma tradicional ni el primer riego para garantizar la mayor homogeneidad del surco. Las evaluaciones se efectuaron en los tres surcos centrales de cada tratamiento (área efectiva 126 m²).

Las atenciones culturales consistieron básicamente en las prácticas comunes de los productores de la zona bajo criterios de mínimos insumos, se mantuvo el cultivo libre de plagas y arvenses durante todo el ciclo. En tanto, la preparación del suelo fue la tradicionalmente empleada, en correspondencia con las indicaciones derivadas del estudio.

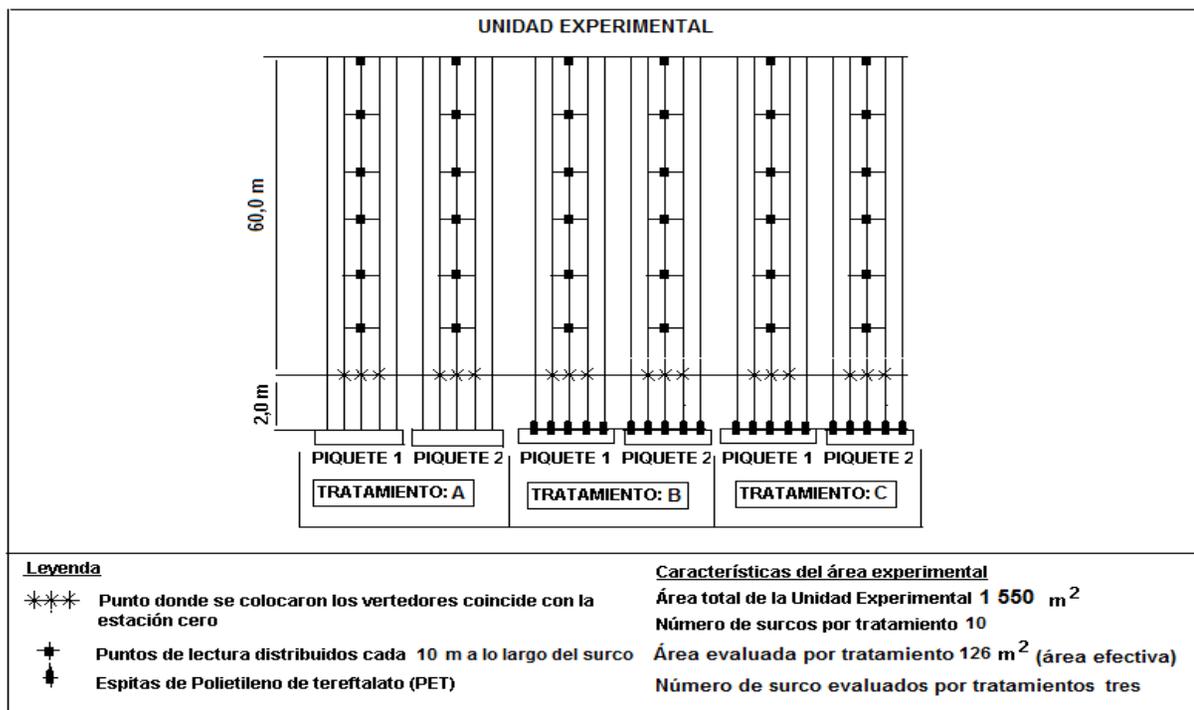


Figura 2.1: Representación esquemática de la unidad experimental

Se definieron en el campo tres tratamientos de acuerdo a los diferentes parámetros evaluados para el mejoramiento del riego por surcos, los cuales se relacionan a continuación:

Tratamiento A: riego por surcos con flujo continuo (RC) en surcos abiertos (método tradicional).

Tratamiento B: riego por surcos con caudal intermitente (RI) con criterio de manejo de tiempos variables (incrementales) con dos ciclos de riego y uno de remojo con un

intervalo de tres minutos. La forma de entrega del agua al surco fue por medio de espitas de polietileno de tereftalato (PET).

Tratamiento C: riego por surcos con caudal intermitente (RI) con criterio de manejo de tiempos variables y distancias constantes (20 m) con una sola etapa de avance y un intervalo de tres minutos entre ciclos. La forma de entrega del agua al surco fue por medio de espitas de PET.

El número de ciclos de riego (N_i) y el intervalo entre ciclos se determinó de forma experimental a partir de diferentes criterios de manejo, tecnología utilizada y estudios precedentes realizados por Rodríguez y Santana (2003); Santana (2007); Rodríguez (2014), se consideró: la rapidez, homogeneidad del avance en el surco y que el frente de avance recorriera distancias sensiblemente iguales en cada ciclo.

En el tratamiento B donde el criterio de manejo es tiempos variables incrementales el N_i se determina por la metodología propuesta por Yonts *et al.* (1996) y utilizada por Romay (2008), al desarrollar una relación entre el tiempo de aplicación de agua durante el primer ciclo de avance (T_p) tiempo que tarda el agua en avanzar $\frac{1}{4}$ del surco o sea en 15,0 m), y los subsiguientes tiempos de los ciclo para concretar la etapa de avance según la ecuación [2.1] y los tiempos de cada ciclo por la expresión [2.2].

$$RPA = PN_i^{1,52} - (PN_i - 1)^{1,52} \quad [2.1]$$

$$TC_i = T_p.RPA_i \quad [2.2]$$

Para la etapa de remojo se utiliza la expresión [2.3]

$$RPR = NPA^{1,52}.FR \quad [2.3]$$

Donde: RPA : relación intermitencia y avance; PN_i : número de intermitencia; RPR : relación intermitencia y remojo; NPA : cantidad de ciclos durante el avance; FR : factor de remojo según la clase de textura; TC_i : tiempo de cada ciclo (min).

A partir de esta metodología se determinó que los tiempos de riego para el tiramiento B fue: para el primer ciclo (RPA 1) de 2,00 min, el segundo ciclo (RPA 2) de 3,54 min y el ciclo de remojo (RPR) 2,46 min.

En la tabla 2.2 se muestran los parámetros promedios de diseño de los cinco eventos de riego realizados durante la etapa experimental. En cada uno de los surcos del área efectiva por tratamiento se instaló un aforador (vertedor triangular) en el inicio del surco (entrada del agua) y otro al final (salida). A distintos intervalos de tiempo se registró el caudal entrado y salido al pie en cada uno de los surcos.

TABLA 2.2. Valores promedios de los parámetros de riego durante el estudio realizado

Parámetros	A	B	C
Caudal de entrada Q_0 (L s ⁻¹)	0,52	0,52	0,49
Caudal de salida Q_s (L s ⁻¹)	0,03	0,04	0,03
Coefficiente de rugosidad n Manning	0,03	0,03	0,03
Tiempo total de avance t_{av} (min)	34,19	19,41	24,96
Tiempo de aplicación t_a (min)	35,39	20,39	25,37

2.3 Lámina de riego

Las láminas de riego han sido calculadas sobre la base de la determinación analítica de la humedad en el suelo en el momento del riego y la humedad a capacidad de campo. Se determinó la lámina de riego requerida (L_r) a través de la ecuación [2.4], según Morábito *et al.* (2008); La lámina total aplicada (L_a) a partir de la relación del volumen de agua ingresado a la parcela y su superficie por el método propuesto por Arbat *et al.* (2009) para los cinco eventos de riego realizados según la ecuación [2.5]:

$$L_r = 10.H.\alpha \left(\frac{C_c - L_p}{100} \right) \quad [2.4]$$

$$L_a = \frac{Q_0.t_a}{1000.W.L} \quad [2.5]$$

Donde. L_r : lámina requerida (mm); H : profundidad efectiva del cultivo (m); α : densidad del suelo (g cm⁻³); C_c : capacidad de campo (% bss); L_p : límite productivo (% bss); L_a : lámina aplicada (mm); Q_0 : caudal de diseño, (m³ min⁻¹); t_a : tiempo de aplicación, (min); W : espaciamiento entre surcos (m); L : longitud del surco (m).

2.4 Medición del escurrimiento superficial

En la investigación se determinó el escurrimiento superficial donde se utilizó un pozo de sedimentación y un cubo que permitió coleccionar los volúmenes de suelo y agua escurridos al final del surco del área efectiva de cada tratamiento. Para cada evento de riego, en todos los tratamientos, se determinó la lámina escurrida (L_e) y las pérdidas de suelo (A_s). Estas variables fueron determinadas por el método volumétrico a partir de los procedimientos recomendados por Betancourt *et al.* (2004) y Carolina *et al.* (2009) para

medir la lámina escurrida [2.6] y la producción de sedimento [2.7]. La influencia del suelo, la pendiente y la vegetación fueron uniformes en la parcela de escurrimiento en cada tratamiento.



$$L_e = \frac{V_e}{A} \quad [2.6]$$

$$A_s = P_s \cdot V_e \quad [2.7]$$

Donde. L_e : lámina escurrida ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); V_e : volumen de agua escurrida (m^3); A : área del lote de escurrimiento (ha); A_s : producción del sedimento ($kg \text{ m}^{-3}$); P_s : peso del sedimento (kg);

Morábito *et al.* (2012) sugieren además otro indicador para separar el porcentaje de pérdidas por escurrimiento superficial (Pe) en el final del surco se determinó como la relación entre el volumen escurrido en el extremo final del surco y el volumen de agua aplicado en el surco [2.8] según:

$$Pe = \frac{V_e}{V_{Apl}} \cdot 100 \quad [2.8]$$



Donde. Pe : pérdida por escurrimiento superficial (%); V_e : volumen escurrido (L); V_{Apl} : volumen de agua aplicada (L).

2.5 Eficiencia de riego

Eficiencias de riego en el casos riego con drenaje libre: se usó la metodología de Morábito *et al.* (2012) que se basa en la medición del hidrógrama de entrada y salida para realizar un balance de volúmenes. Se calculó la eficiencia de aplicación (EAP) a partir de la expresión matemática [2.9] empleada por Morábito *et al.* (2007) y Schilardi (2010). El volumen infiltrado y almacenado se determinó experimentalmente al emplear la ecuación de balance de volumen [2.10] para el riego por surcos y el volumen escurrido, se obtuvo de forma experimental por el método volumétrico. El volumen aplicado se obtuvo por la expresión [2.11]

$$EAP = \frac{V_{IAL}}{V_{Apl}} \cdot 100 \quad [2.9]$$

$$V_{IAL} = V_{Apl} - V_e \quad [2.10]$$

$$V_{Apl} = Q_0 \cdot ta \quad [2.11]$$

Donde. *EAP*: eficiencia de aplicación (%); *V_{IAL}*: volumen de agua infiltrada y almacenada (L); *V_{Apl}*: volumen de agua aplicada (L); *Q₀*: caudal de diseño, (L min⁻¹); *ta*: tiempo de aplicación, (min); *V_e*: volumen escurrido (L).

La productividad del agua (*WP*) se define como un indicador fisiológico ya que representa la capacidad productiva de un cultivo (cosecha física o económica) por unidad de agua consumida bajo el concepto de riego (kg m⁻³) y se determinó por la expresión [2.12] utilizada por Molden *et al.* (2010) y Pereira *et al.* (2012).

$$WP = \frac{Prod}{V_{Apl}} \quad [2.12]$$

Donde. *WP* productividad del agua en el cultivo (kg m⁻³); *Prod.*: producción obtenida (kg); *V_{Apl}* volumen de agua aplicada por riego (m³).



2.6 Procesamiento estadístico

Los datos referidos a las variables estudiadas para los distintos parámetros de eficiencia del riego se analizaron estadísticamente con el software Statistical Package for the Social Science SPSS 11.5 (2002). Se determinó la distribución normal según la prueba de Kolmogorov- Smirnov y el estadístico de Levene para comprobar la homogeneidad de varianza. A partir de un análisis varianza simple para cada variable y se aplicó la prueba de rangos múltiples de Tukey para un nivel de significación de $p \leq 0,05$. También se realizó una estimación curvilínea de regresión para determinar el modelo que más se ajusta y las dependencias entre las variables.

Capítulo III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Aforo del caudal de entrada

En la figura 3.1 se aprecian el caudal de entrega en los cinco riegos y la media \pm desviación estándar (Media \pm S) se hace evidente que no existe diferencias significativas bajo las condiciones en que se desarrolló el experimento. El valor de caudal promedio en la unidad experimental fue de $0,51 \text{ L s}^{-1}$, a partir de la transformación de la unidad lineal (cm) con una carga hidráulica promedio en el vertedor de 4,2 cm. El caudal promedio utilizado para esta pendiente 1,2 % y tipo de suelo oscila entre $0,44$ a $0,61 \text{ L s}^{-1}$ y se entrega en grupos de cinco surcos. Se confirma que los caudales utilizados para las condiciones referidas son adecuados y coinciden con el utilizado por los campesinos de la zona y que no existieron diferencias significativas entre los tres tratamientos bajo las condiciones de esta unidad experimental.

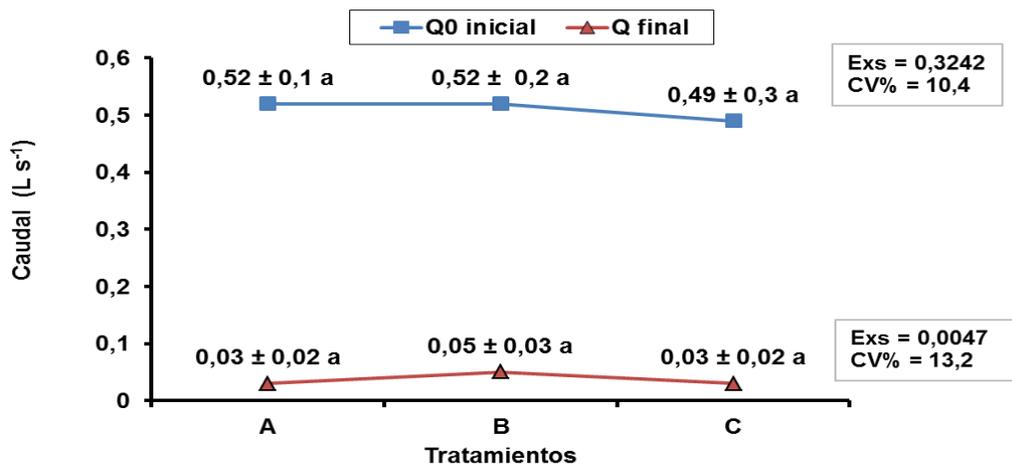


Figura 3.1 Histograma de entrada y salida durante los cinco eventos de riego

En el caudal de salida tampoco se manifestó diferencias significativas, se mantuvo constante durante todo el tiempo de aplicación para un coeficiente de variación de 13,2 %. El coeficiente de variación se mantuvo entre el rango permisible para este tipo de experimento, según *Fuentes et al.* (1999). En condiciones experimentales de campo debe ser inferior al 20 %, lo que representa una estimación del indicador muy bueno, para que permita eliminar la dimensionalidad de las variables y tener en cuenta la

proporción existente entre medias y desviación típica de una forma adecuada y confiable.

3.2 Lámina de riego

En la tabla 3.1 se muestra la lámina total aplicada durante el experimento para cada tratamiento, donde se manifiestan diferencias significativas entre los tres tratamientos, bajo las condiciones en que se desarrolló el experimento. Se destaca el tratamiento con el criterio de manejo de distancias variables y tiempos incrementales con una reducción de la lámina aplicada de 1,71 veces, respecto al de riego continuo lo que representa un 42 % de ahorro. El otro tratamiento donde se utilizó el riego intermitente también se manifiesto una reducción en la *La* 1,45 (31 %) veces respecto al tratamiento A. Por lo que el riego por surcos con caudal intermitente con el criterio de manejo de los tratamientos B y C se logra incrementar el ahorro de agua por concepto de riego respecto al método tradicional.

Tabla 3.1 Lámina aplicada en los cinco eventos de riego.

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S La (mm)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	46,07	46,22	47,41	44,29	45,68	45,93 \pm 1,12 c
Tratamiento B	25,77	25,31	26,22	28,24	28,22	26,75 \pm 1,13 a
Tratamiento C	39,18	34,40	25,84	26,66	31,96	31,61 \pm 1,2 b
CV %						19,3
Esx						0,6192

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

Si el volumen de agua utilizado en el riego continuo se aplicara con flujo intermitente, con la propuesta del tratamiento B, se pueden regar un 72 % de superficie adicionalmente que equivalen 43 m respecto al método tradicional. El tratamiento C con el mismo volumen de agua del tratamiento A incrementa el área regada en un 45 % que representa 27 m. Se demuestra que con el uso del riego intermitente con estos dos criterios de manejo se puede regar más área con la misma unidad de volumen. Este comportamiento se corresponde con lo verificado por Brown (2000); Camacho (2005); Santana (2007) y Romay *et al.* (2010) al definir como ventajas del riego con caudal intermitente el ahorro de tiempo, el ahorro de agua y el incremento de área regada, lo que aumenta la productividad del riego.

La lámina requerida (L_r) para el cultivo del frijol, se consideró la densidad volumétrica del suelo (α), la profundidad efectiva (H) de las raíces y la humedad del suelo antes de cada evento de riego (anexo  nos permite definir que durante los cinco eventos de riego, en los tres tratamientos la lámina total aplicada satisface las necesidades del cultivo hasta la profundidad efectiva de 0,30 m como se muestra en la tabla 3.2. Resultados que se justifican el patrón de absorción de agua que describe Cisneros, (2003) en condiciones homogéneas del suelo (extrae aproximadamente el 40 % de sus necesidades de agua del $\frac{1}{4}$ de la profundidad radicular, el 30 % más en la $\frac{1}{2}$ de profundidad, el 20 % en el $\frac{3}{4}$ y el 10 % restante en el último cuarto más profundo respectivamente).

Tabla: 3.2. Lámina requerida para el cultivo del frijol en función de la profundidad efectiva

Parámetro	Profundidad efectiva H		
	0,20 (m)	0,30 (m)	0,40 (m)
L_r ($m^3 ha^{-1}$)	103,4	155,1	206,8 

3.3 Escurrimiento superficial y producción de sedimento

El pozo de sedimentación y el cubo permitió determinar volumétricamente las pérdidas de agua y suelo por escorrentía. Como se muestra en la tabla 3.3, existen diferencias significativas entre los tres tratamientos bajo estas condiciones experimentales y para este tamaño de muestra. Se destaca el tratamiento de riego continuo (tradicional) con la mayor pérdida de la lámina escurrida promedio. Este tratamiento tuvo niveles de pérdidas de 5,23 litros de agua por cada metro cuadrado de superficie regada, que supera de 1,11 a 2,25 veces a los tratamientos donde se utilizó el riego con caudal intermitente.

En el tratamiento C las pérdidas alcanzó valores más bajos en la unidad experimental de $2,32 L m^{-2}$ regados. Para el caso de riego con flujo continuo uno de los principales indicadores de ineficiencia son las excesivas pérdidas por escurrimiento superficial por unidad regada.

Tabla 3.3 Lámina escurrida en los cinco eventos de riego.

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S Le ($m^3 ha^{-1}$)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	54,50	49,95	52,00	53,04	52,14	52,33 \pm 0,02 c
Tratamiento B	45,48	48,08	47,19	45,95	49,23	47,19 \pm 0,01 b
Tratamiento C	21,78	21,71	24,19	24,20	24,30	23,24 \pm 0,01 a
CV %						14,3
Esx						0,1961

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

En la tabla 3.4 se puede observar el porcentaje de pérdidas por escurrimiento superficial durante los cinco eventos de riego respecto al volumen aplicado. Se destaca el tratamiento C que difiere significativamente del resto, las pérdidas promedio representan el menor porcentaje de la unidad experimental, respecto al tratamiento B, se reduce en 1,4 veces. Al comparar el tratamiento C con el A se puede apreciar que el porcentaje de pérdidas de agua es 1,5 veces menor como promedio que equivale a un 33,5 % de reducción perdida de agua por concepto de escorrentía.

Es de destacar que los dos tratamientos de menores pérdidas de agua fueron los que utilizaron el riego con caudal intermitente. El tratamiento B con criterio de manejo de distancias variables y tiempos incrementales también se alcanzó menores porcentajes de pérdidas por escurrimiento de 7,5 % menor respectivamente con relación al tratamiento A.

TABLA 3.4 Perdidas de agua por escurrimiento en los cinco eventos

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S Pe (%)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	20,87	19,06	19,35	21,12	20,13	20,11 \pm 0,9 b
Tratamiento B	18,39	19,52	18,77	17,22	19,03	18,59 \pm 0,8 b
Tratamiento C	9,81	11,13	16,51	16,01	13,41	13,38 \pm 1,0 a
CV %						13,2
Esx						0,4044

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

Resultados similares fueron obtenidos por Romay y Morábito (2010) en el cultivo del tomate en Argentina, alcanzaron pérdidas por escurrimiento superficial de 18,5 % respecto al volumen aplicado. Rodríguez (2014) con riego intermitente tecnificado logró reducir estas pérdidas hasta un 48,5 %, con caudales de diseño muy similares a los

utilizados en esta investigación. Resultados que demuestran la efectividad del riego con caudal intermitente relacionado con la disminución de las pérdidas de agua por escorrentía.

Con esta tecnología de riego se cumplen los dos principales objetivos a alcanzar por los operadores de los sistemas de riego intermitente (Henggeler y V^one consultados por Brown, 2000): (I) avanzar el agua hacia el extremo final de los surcos, tan rápido como sea posible y (II) minimizar los escurrimientos durante los ciclos intermitentes.

En la tabla 3.5 se aprecia que el tratamiento A, fue el de mayores pérdidas de suelo por escorrentía, supera 5,0 veces al tratamiento C que fue el de menos pérdidas. El tratamiento de criterio de manejo distancias constantes y tiempos variables difiere significativamente del resto de los tratamientos de la unidad experimental, bajo esas condiciones y el mismo tamaño de muestra. Las pérdidas del tratamiento B representan el 76,8 % comparado con el riego continuo.

Tabla 3.5 Producción de sedimento en las cinco eventos de riego.

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S As (kg ha ⁻¹)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	0,59	0,52	0,55	0,57	0,55	0,56 \pm 1,6 c
Tratamiento B	0,42	0,44	0,44	0,41	0,45	0,43 \pm 1,5 b
Tratamiento C	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11 \pm 1,3 a
CV %						16,1
Esx						0,0121

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

La figura 3.2 ilustra el promedio de sedimento que se arrastra en cada riego en el área efectiva por tratamientos, determinado de forma volumétrica. Donde se destaca en el tratamiento A, que las pérdidas promedio representan 2,31 veces mayores que el tratamiento C en cada riego. Este tratamiento C difiere significativamente del resto. El índice de pérdidas de la variante B respecto al C fue de 1,96 veces mayor. Al analizar estos resultados se puede apreciar que con la tecnología propuesta en el tratamiento C, se reduce las pérdidas de suelo por lixiviación frontal y las arcillas dispersas en el surco.

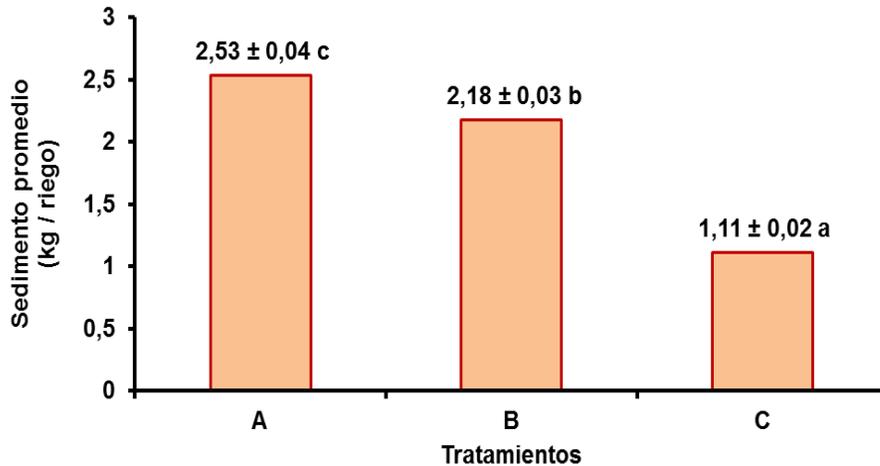


Figura 3.2 Cantidad de sedimento escurrido por cada norma de riego aplicada.

En figura 3.3 se muestra el análisis de estimación curvilínea (regresión) entre las variables producción de sedimento (dependiente) y lámina escurrida (independiente) en toda la unidad experimental, el modelo que más se ajusta es el lineal para toda la unidad experimental con tendencia positiva muy fuerte con un coeficiente de correlación 0,96 y un nivel de significación alto entre las variables y el coeficiente de determinación 0,98.

La calidad del modelo encontrado se reafirma en el análisis de varianza que resultó altamente significativo. Se determinó como tendencia que a medida que se incrementa la variabilidad de la producción de sedimento aumenta la lámina escurrida, con un nivel de exactitud de 98,6 %. Esto significa que por cada unidad que varía la variable (Le) independiente (m^3) se incrementa la dependiente (As) en 0,0148 kg, lo que indica una correlación adecuada entre el modelo matemático y la evaluación de campo.

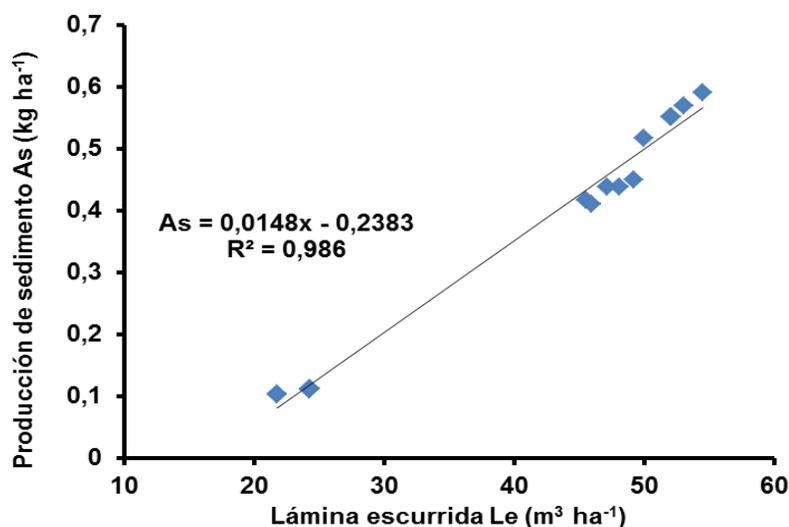


Figura 3.3 Análisis de regresión entre las variables: producción de sedimento y lámina de escurrimiento.

En la tabla 3.6 se muestra la ecuación funcional resultante para cada tratamiento en la unidad experimental que constituyen, un modelo empírico que les permiten a los investigadores y productores predecir las pérdidas de suelo a partir de la lámina escurrida. Se destacan en todos los tratamientos que la relación entre las variables producción de sedimento y lámina escurrida es alta con coeficiente de determinación entre 0,96 a 0,97. El nivel de probabilidad inferior al prefijado en la investigación y un error estándar de estimación relativamente bajo; todos los coeficientes de regresión resultaron altamente significativos, se demostró que las variables independientes describen adecuadamente el proceso.

Se destacan los dos tratamientos donde se utilizó el riego intermitente con variaciones entre 0,0101 y 0,0036 kg de sedimento por cada m³ de la lámina escurrida. En el tratamiento de riego continuo, esta relación fue de 0,0163 kg m⁻³ que equivale de 1,61 a 4,52 veces superior a los tratamientos de mejor comportamiento. El modelo empírico encontrado en cada método de riego resulta una herramienta práctica importante para la cuantificación de las pérdidas de sedimento en función de la lámina escurrida (Le) para cada riego.

Tabla: 3.6. Funciones de ajuste entre la producción de sedimento y lámina promedio escurrida para cada tratamiento.

Tratamientos	Ajuste Lineal ($A_s = b(Le) - a$)	Coefficiente de determinación (R^2)	Coefficiente de correlación (r)	Error std.	p-valor ANOVA
A	$A_s = 0,0163. Le - 0,2971$	0,96	0,97	0,013	0,000
B	$A_s = 0,0101. Le - 0,0456$	0,96	0,98	0,005	0,0001
C	$A_s = 0,0036. Le - 0,0239$	0,97	0,98	0,002	0,001

Esta investigación logra mejoras sustanciales en la principal carencia del riego por surco: conseguir una distribución del agua de riego lo más uniforme posible, de modo que las partes de la parcela que menos agua reciben tengan el agua suficiente para asegurar el desarrollo del cultivo y reducir las pérdidas de agua por percolación profunda y por escorrentía superficial.

3.4 Eficiencia de riego

En la tabla 3.7 se representan, para cada tratamiento, los valores de eficiencia de aplicación (EAP) medios en las evaluaciones realizadas. El mejor tratamiento fue el C que difiere significativamente del resto de los tratamientos, por lo que la probabilidad de obtener valores mayores o como el anterior, es menor que 0,05 bajo estas condiciones. El tratamiento C es seguido de forma cuantitativa por el tratamiento B. En el anexo 2 se muestran los valores de los volúmenes empleados para poder determinar la eficiencia de riego.

Tabla 3.7. Eficiencia de aplicación en los diez eventos de riego

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S EAP (%)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	79,13	80,94	80,65	78,88	79,87	79,89 \pm 1,6 a
Tratamiento B	81,61	80,48	81,23	82,78	80,97	81,41 \pm 1,5 a
Tratamiento C	90,19	88,87	83,49	83,99	86,59	86,62 \pm 1,3 b
CV %						8,12
Esx						0,387

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

Los dos tratamientos donde se utiliza el riego intermitente superan al riego continuo en la eficiencia de aplicación, lo que coincide con lo planteado por Brown (2000) al citar: “El riego intermitente es una técnica dentro del riego por surcos revolucionaria, que alcanza mayor eficiencia en el uso del agua, que el riego por surcos con flujo continuo”.

La eficiencia de aplicación en los tres tratamientos fue superior al 65 %, y llegó en una ocasión a superar el 86 % por encima de los rangos citados para este sistema de riego por Vázquez (2001); Morábito (2005) y Rodríguez (2014), estos consideran que es habitual que la EAP del riego superficial oscile de 40 al 60 %. Esta baja eficiencia se debe fundamentalmente a un mal manejo del riego condicionado por una alta variabilidad espacial y temporal en cuanto a las características del suelo, que unido a un conocimiento no exacto de las características de infiltración del suelo, origina un mal manejo del riego.

La figura 3.4 muestra el porcentaje en que se incrementa la eficiencia de aplicación para igual longitud de surco que el tratamiento A y el porcentaje de volumen de agua utilizado, respecto al total empleado por este propio tratamiento. En la unidad experimental bajo estas condiciones y con la tecnología propuesta en el tratamiento C se puede incrementar en un 6,73 % la eficiencia de aplicación, que implica disminuir a 31,2 % los volúmenes de agua aplicada con el criterio de manejo de tiempos variables con distancias constante respecto al tratamiento A.

Con la propuesta del tratamiento B se ahorra 1,02 veces el volumen de agua aplicada por tratamiento A y alcanza 1,01 veces mayor EA  Lo anterior demuestra que el uso del riego con caudal intermitente, se incrementa el área regada en menos tiempo aumenta la eficiencia de aplicación y ahorro del agua, por lo que aumenta la productividad del riego.

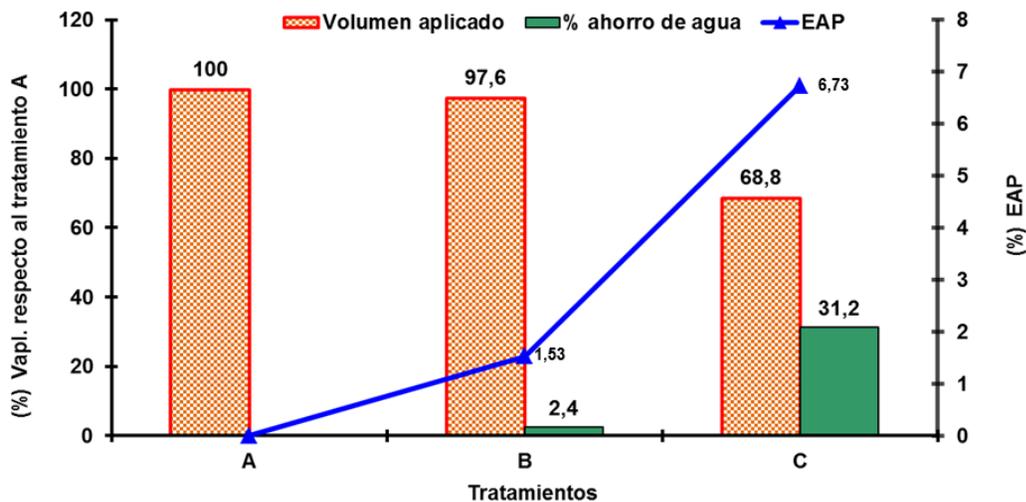


Figura 3.4. Incremento de la eficiencia de aplicación promedio y porcentaje de agua consumida respecto al riego

Según Cisneros (2003) y Morábito *et al.*, (2008) la eficiencia de aplicación está muy relacionada con la cantidad de agua útil para el cultivo que queda en el suelo, después de un riego, en relación al total del agua que se aplicó. Generalmente, se mide en porcentajes; pero expresada litros de agua útil en el suelo por cada 100 litros aplicados, se puede apreciar que el tratamiento C aporta 86,6 litros de agua útil para la planta y supera al riego continuo en 6,71 litros por cada 100 litros aplicados.

El rendimiento del riego en la finca “La Paneca” se puede incrementar, a partir de la introducción del riego con caudal intermitente con los dos criterios de manejo evaluados. Se destaca el tratamiento C que implica disminuir, en 33,47 % la lámina escurrida al pie del surco y en 80,36 % la pérdida de suelo por escorrentía en cada riego, el 31,17 % del volumen de agua aplicado, alcanzar eficiencia de aplicación con valores 86,62 % respecto al riego continuo. Por lo que se puede afirmar que el riego superficial alcanza elevada eficiencia cuando está bien diseñado y correctamente manejado.

Estos valores son superiores a los reportados por Playán *et al.* (2005); Smith *et al.* (2009) y Schilardi *et al.* (2009) con sistemas de riego superficiales tecnificados (*Surge Flow*) en Australia y en la cuenca del río Tunuyán Superior en Argentina. En Cuba

supera a los valores obtenidos por Santana (2007) y Rodríguez (2014) en suelos Ferralíticos Rojos Lixiviados asociados al cultivo de la cebolla, en surcos cortos.

En la tabla 3.8, se aprecia que con la aplicación del riego intermitente en el cultivo de la frijol, se logra incrementar la productividad del agua (*WP*) con la propuesta del tratamiento C desde un 36 % al riego con flujo continuo hasta un 31,3 % al riego intermitente con criterios de manejo de distancias variables con tiempos incrementales, como consecuencia de la aplicación de un volumen de agua inferior y de los niveles de rendimiento agrícola alcanzado.

Tabla: 3.8. Productividad del agua en el cultivo del frijol

Tratamientos	Volumen aplicado ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Producción (t ha^{-1})	Productividad del agua (kg m^{-3})
A	260,40	1,12	4,30
B	254,12	1,18	4,60
C	179,19	1,20	6,70

Con la tecnología aplicada en el tratamiento C se logra reducir desde 31,2 a 29,5 % el volumen de agua aplicado e incrementa los rendimientos en 6,7 a 1,7 % el rendimiento obtenido por el resto tratamiento. Estos resultados indican que con el mejoramiento del riego por surcos a partir del suministro del caudal intermitente se pueden incrementar los rendimientos del cultivo del frijol con innovaciones locales en la comunidad Las Tosas, en la Finca “La Paneca”. Se aumentan los rendimientos, el ahorro de agua y la eficiencia del riego superficial.

CONCLUSIONES

- El tratamiento con criterios de manejo de distancias contaste y tiempos variables alcanzó los mejores índices de eficiencia del riego bajo estas condiciones en que se desarrolló el experimento.
- El estudio de los indicadores de calidad del riego superficial en el cultivo del frijol  permitió corroborar, en este caso, el riego por surcos con caudal intermitente es superior al riego con flujo continuo y proporciona reducir las pérdidas de agua y suelo por escorrentía, ahorro de agua, que se traduce en productividad del riego.

RECOMENDACIONES

- Debe continuarse el estudio sobre el riego intermitente con el uso de estas tecnologías a escala parcelaria, para su generalización en la agricultura, como vía para lograr el mejoramiento del riego por surcos, protección del medio edáfico e incremento la productividad del riego.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

-  AHMAD, M.D., TURRAL, H., MASIH, I., GIORDANO, M. y MASOOD, Z. Water saving technologies: Myths and realities revealed in Pakistan's rice-wheat systems. Research report 108, IWMI, Colombo, Sri Lanka, 2007. 44 pp
- ALFONSO, D. Modificación de una comunidad rural en asentamiento ecológico. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura. Congreso Internacional de riego "Cubariego 2007". La Habana, Cuba: MINAG, 2007.
- ALONSO, A. *Ingeniería del agua para la agricultura*. Sancti Spiritus, Cuba: Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico "José A. Echevarría", 2010. Maestría Ing. Hidráulica *Módulo 5*.
- ARBAT, G.; OLIVÉ, F.; ROSELLÓ, A.; PUIG-BARGUÉS, J. y RAMÍREZ, F. Distribución del agua en el suelo en riego por surcos alternos y no alternos en el cultivo de Maíz. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo, noviembre 2009, vol. IX, nº 124, pp. 1-8.
- BETANCOURT, P.; OROPEZA, J.; FIGUEROA, B.; ORDAZ, V. y ORTIZ, C. Pérdidas de Suelo y Potencial Hidrológico en parcelas con Cobertura Vegetativa de Especies Forrajeras: manejo de agua y suelo. TIERRA Latinoamericana, julio  2004, vol. 18, nº 003, pp. 263-275.
- BLUEMING, B., YANG H. y PAHL-WOSTL, C. Making water productivity operational. A concept of agricultural water productivity exemplified as a wheat-maize cropping pattern in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 91 (1-3), 2007. 11 – 23.
-  BROWN, O (a). Mejoramiento del diseño y manejo del riego por surcos con flujo continuo e intermitente en suelos ferralíticos, mediante la utilización de un modelo matemático simplificado. Tesis de Doctorado. Ciego de Ávila, Cuba: UNICA, 2000. h. 118.
- BROWN, O. Aplicación de métodos numéricos al diseño del riego por surcos en suelos ferralíticos. En: Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Memorias del Congreso Internacional de Riego y Drenaje Cubariego. Palacio de las convenciones, Ciudad de la Habana, Cuba: IIRD, 2003.
- BROWN, O. Modelos matemáticos para la simulación de riego superficial. Ciego de Ávila, Cuba: Informe final del PNCT 00200006. CEH-UNICA, 2006.
- BROWN, O.; ARTEAGA, R.; CASTELLANO, A.; ABREÚ, E.; LÓPEZ, I. y RODRÍGUEZ, B. Diseño hidráulicos de tuberías con salidas múltiples utilizadas en los sistemas

de riego superficiales. *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, enero 2003, vol. XXIV, nº 1, pp. 9-13.

- CABANILLAS, N. El agua subterránea y su importancia [en línea]. Conferencia regional para África Johannesburgo, Sudáfrica, Ordenación Integrada de los Recursos Hídricos y Seguridad Alimentaria en África, 01 marzo 2000 [Consulta: 20 diciembre 2010] 
- CÁCERES C., Diseño y construcción de un dispositivo de control para la aplicación del riego intermitente. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú. 1999. h 108.
- CAMACHO, E. Tendencias actuales en el riego. Ciego de Ávila, Cuba: Curso predoctoral. 10 de noviembre de 2005. Centro de Estudios Hidrotécnicos. Universidad de Ciego de Ávila. 2005. 
- CAMEJO E.: Estudio de diferentes manejos del agua (stress hídrico) en el cultivo del boniato (*Ipomoea batata* L) y su influencia en la incidencia de tetuán (*Cylas formicarius* Fab.). Informe final proyecto nacional CITMA 002-0008. Universidad de Ciego de Ávila Cuba. 2000. 
- CAPOTE, R. y RAFOLS, G. Dinámica del riego, decenio 1995-2005. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura. Congreso Internacional de riego "Cubariego 2007". La Habana, Cuba: MINAG, 2007.
- CAROLINA, M.; CATIGLIONI, M.; PAZ, J.; WILSON, M. y OSZUS, J. Propiedades hidrológicas edáficas bajo diferentes secuencias de cultivos en siembra directa. Barcelona, España: INTA- EEA, Panamá, 2009.
- CISNEROS, R. *Apuntes de la materia de Riego y Drenaje*. 1ra ed. México: Centro de Investigación y Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luís Potosí, Bolivia. 2003. p. 164. 
- De FRAITURE, C. y MICHELNS, D. Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management* 97, 2010. 502-511 
- DELGADILLO, O. Algunos apuntes conceptuales sobre los métodos y tipos de riego campesino y su relación con el diseño de sistemas de riego. En: CORA 2000. Ponencia presentada en el Seminario Internacional CORA. Cajamarca, Perú; noviembre: Centro Agua, 2000.
- DUEÑAS, R. Proyecto de Metodología para el manejo integral de cuencas hidrográficas en Cuba. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura. Congreso Internacional de riego "Cubariego 2007". La Habana, Cuba: MINAG, 2007.
- ELLIOTT, R.; WALKER, W. y SKOGERBOE, G. Zero Inertia modeling of furrow

- irrigation advance. *Journal Irrigation and Drainage. Division ASCE*, 1983, vol. 108, nº 3, pp. 179-195.
- ESSAFI, B. Recursive volume balance model for surge flow irrigation. *Tesis de Maestría*. EE.UU: Utah State University, Logan, 1983.
- FUENTES, FELICITA; ABREU, E.; FERNÁNDEZ, E. Y CASTELLANOS MAGALY. *Experimentación agrícola*. 2da ed. Félix Varela. El Vedado. Ciudad de La Habana, Cuba. 1999.
- GARCÍA, E. y FONTOVA, MARTHA. Ingeniería de Riego. 1ra ed. Ciudad de la Habana, Cuba: Centro de Investigaciones Hidráulicas Instituto Superior Politécnico "José A. Echevarría", 1998. p. 260.
- GONZÁLEZ, P. Introducción al riego y drenaje. 1ra ed. La Habana, Cuba: Convenio Bilateral Cuba- Venezuela IIRD, 2008. pp. 1- 66.
- GRASSI, C. *Fundamento del Riego*. 2da ed. Mérida, Venezuela: Centro Internacional de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CDIAT), 1998. p. 118.
- HALSEMA, G. y VINCENT, L. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management* 108 (2012) 9-15. ELSEVIER. 2011.
- HERNÁNDEZ, A.; PÉREZ, J. M.; BOSCH, D.; RIVERO, L.; CAMACHO, E.; RUIZ, J.; JAIMEZ, E.; MARSÁN, R.; OBREGÓN, A.; TORRES, J.; GONZÁLEZ, J. E.; ORELLANA, ROSA.; PANEQUE, J. y MESA, A. *Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba*. 1ra ed. Ciudad de La Habana: AGRINFON Ministerio de la Agricultura, 1999. p. 64. ISBN 959-246-022-1.
- ISMAIL, S. Effectiveness of surge flow irrigation in Egypt: Water use efficiency in field crop production. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University and UNESCO/IHE institute for water Education, the Netherlands. 2004.
- ISRAELSEN, O. y HANSEN, V. *Principios y Aplicaciones del Riego*. 2da ed. Barcelona, España: Reverté, S.A, 1965. pp. 110-115.
- JENSEN, M. Beyond irrigation efficiency. *Irrig. Sci.* 25, 233-245. 2007.
- LAZO, C. Diseño de un sistema de riego intermitente- Surge  Flow. Lima, Perú: Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2007.
- MADRIGALES, N. R. Evaluación de tres métodos de riego por superficie durante la etapa de elongación de la caña de azúcar (*Saccharum* sp) bajo condiciones de Tiquisate, Escuintla. *Tesis de Maestría*. Facultad de Agronomía, Instituto de investigaciones agronómicas, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2009. h. 123.
- MITCHELL, A. y STEVENSON, K. *Surge flow and alternating furrow irrigation of*

- peppermint to conserve water*. EE.UU: Tleaching. Central Oregon Agriculture Research Center Annual Report, 1993.
- MOLDEN, D., OWEIS T., STEDUTO, P., BINDRABAN, P., HANJRA, M.A., KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agricultural Water Management* 97, 2010. pp. 528-535.
- MORÁBITO, J. A. Desempeño del riego por superficie en el área del río Mendoza, eficiencia actual y potencial. Parámetros de riego y recomendaciones para un mejor aprovechamiento en un marco sustentable. Tesis de Maestría. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencia Agrarias (UNCuyo - FCA), 2005. h. 12-28.
- MORÁBITO, J.; SALATINO, SANTA. y MIRABILE, C. Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). *Ingeniería del Agua*, septiembre 2007, vol. 14, n° 3, pp. 199-213.
- MORÁBITO, J.; SALATINO, SANTA. y SCHILARDI, C. El desempeño del uso agrícola del agua en los Oasis de los ríos Mendoza y Tunuyán a través de nuevos indicadores. En: Mendoza Irrigación, INTA y INA. VI JORNADAS DE ACTUALIZACIÓN EN RIEGO Y FERTIRRIEGO, Prácticas para incrementar la productividad y asegurar la sostenibilidad del uso del agua y del suelo. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo - Facultad de Ciencias Agrarias (UNCuyo - FCA), 2012.
- MORÁBITO, J.; SALATINO, SANTA.; ANGELLA, G. y PRIETO, D. Evaluación de campo al riego de los agricultores: casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada; asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad. En: Red Riegos, CYTED y AECID. Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad". La Antigua (Guatemala): CYTED y La Agencia Española de Cooperación Internacional, 11 al 14 de agosto de 2008. p. 80.
- NALVARTE, R. y HUACHOS, R. Necesidades de agua y evaluación de los sistemas de riego intermitente y continuo en el cultivo de Brócoli. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola: UNALM, 2007, n° 4.
- P&R Argentina S.A. Riego por Caudal Discontinuo Hoja Técnica [en línea]. Av. Roqué Sáenz Peña 974 9 A, CP (1035) Ciudad de Buenos Aires. Argentina: p&r Argentina, 15 abril 2008 [Consulta: 11 marzo 2011]. Disponible en: <http://www.prsurge.com/espanol>.
- PACHECO, J.; ALONSO, N.; PUJOL, P. y CAMEJO, E. Riego y Drenaje. 2da ed. La Habana, Cuba: Félix Varela, 2006. p. 170. ISBN 959-258-999-2.

- PEREIRA, S., CORDERY I. y IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management* 108, 2012. 39 - 51.
- PÉREZ, D. Los Recursos Hídricos y su significación en el siglo XXI. El caso particular de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, mayo 2002, vol. 23, nº 1, pp. 9-12.
- PÉREZ, R. Modernización de las formas de entrega de agua a los surcos en el riego superficial. Proyecto 22-17. Departamento Investigaciones, Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura. C. Habana. 2004.
- PERRY, C. Efficient irrigation: inefficient communication; flawed recommendations. *Irrig. Drain.* 56 (4), 2007. 367 – 378.
- PLAYÁN, E. *Design, Operation, Maintenance and Performance Evaluation of Surface Irrigation Model*. Bari, Italia: Land and Water Resources Management. Irrigated Agriculture. Instituto Agronómico Mediterraneo-CIHEAM, 2008.
- PLAYÁN, E.; LECINA, S.; ISIDORO, D.; DECHMI, F.; CAUSAPÉ, J. y FACI, M. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V of Bardenas (Spain). *Agricultural Water Management*, marzo 2005, nº 73, pp. 223-245.
- RODRÍGUEZ, M. Tecnología para el mejoramiento del riego por surco, asociado al cultivo de la cebolla en suelo Ferralítico Rojo Lixiviado. Tesis de Doctorado (*en progreso*) UCLV: Departamento de Ingeniería. Universidad Central de La Villa, 2014. h. 143.
- RODRÍGUEZ, M. y ALONSO, F. Desarrollo de una tecnología para el mejoramiento del riego por surcos asociado al cultivo de la cebolla (*Allium cepa* L.), en suelo Ferralítico Rojo Lixiviado. Trabajo de Diploma. Sancti Spíritus, Cuba: UNISS Universidad de Sancti Spíritus "José Martí", 2011. h. 87.
- RODRÍGUEZ, M. y SANTANA. Evaluación de la modalidad de riego intermitente en el cultivo de la cebolla (*Allium cepa* L.) en Banao, Sancti Spíritus. Trabajo de Diploma. UNISS, Cuba: Departamento de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Sancti Spíritus "José Martí Pérez", 2003. h. 67.
- RODRÍGUEZ, M.; SANTANA, M.; ALONSO, F. y DELGADO, BETTY. Mejoramiento del riego por surcos en el cultivo de la cebolla (*Allium cepa* L.) con el uso de un Tanque de Descarga por el Fondo. En: UNISS. I Conferencia Científica Internacional YAYABOCIENCIA, 2011, 28-30 del mes de noviembre, Sancti Spíritus. Cuba, 2011.
- RODRÍGUEZ, M.; SANTANA, M.; BROWN, O. y OLIVERA, D. (a). Evaluación del riego por surcos, con caudal intermitente a distancias constantes, asociado al cultivo de

- la cebolla (*Allium cepa* L.) en Banao. En: INCA. XVIII Congreso Científico del INCA, San José de las Lajas, Mayabeque, a los 9 días de noviembre de 2012. Cuba: Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, 2012 
- ROMAY, CATALINA y MORÁBITO, J. *Evaluación de los sistemas de riego por superficie técnica de caudal discontinuo*. Mendoza, Argentina: Cátedra de Hidrología Agrícola FCA - UNCuyo, 2010, nº 12. 
- ROMAY, CATALINA y MORÁBITO, J. *Evaluación de los sistemas de riego por superficie técnica de caudal discontinuo*. Mendoza, Argentina: Cátedra de Hidrología Agrícola FCA - UNCuyo, 2010, nº 12.
- ROMAY, CATALINA. Riego por pulsos. Manejo y diseño. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires y el Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino, 2008. p. 12.
- ROMAY, CATALINA.; GÉNOVA, L.; SALGADO, H. y ZABALA, S. Recomendaciones para mejorar la eficiencia en el riego discontinuo programando la válvula automática. Buenos Aires, Argentina: Riego y Drenaje, Facultad de Agronomía de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 C1417DSE, CABA, 2010.
- ROQUÉ, C. Caudal discontinuo, la última vanguardia en la técnica del riego [en línea]. Argentina, 10 marzo 2009 [Consulta: 15 febrero 2011] 
- SALEHM, I. y HUSSEIN, M. Improvement of Irrigation Efficiency and Water Productivity By Surge Flow Irrigation in Short Furrows. En: International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi-Arid Environments. Marrakech, Morocco. University, Assiut, Egypt: ISCO, 2006. p. 19. 
- SANTANA, M. Tecnología sostenible para el mejoramiento del riego por surcos y protección del suelo en el cultivo de la cebolla (*Allium cepa*, L.) en condiciones de premontaña. Tesis de Doctorado. UNICA: Centro de Estudios Hidrotécnicos. Universidad de Ciego de Ávila, 2007. h. 126. 
- SCHILARDI, C.; MORÁBITO, J. y VALLONE, R. (a). *Parámetros físicos de riego por superficie en el área de regadío de la cuenca del Río Tunuyán superior Argentina*. Mendoza, Argentina: Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino, y la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo, 2009. 
- SCHIRLARDI, C. Desempeño del riego por superficie en áreas de regadío de la cuenca del Río Tunuyán Superior. Mendoza, Argentina. Tesis de Maestría. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de UNCuyo. Facultad de Ciencias Agrarias, 2010.  h. 138.
- SIERRA, L. Implementación del riego al utilizar la carga hidráulica desde la fuente de abasto hasta la parcela sin gasto de energía. Instituto de Investigaciones de Riego

- y Drenaje del Ministerio de la Agricultura. Congreso Internacional de riego "Cubariego 2007". La Habana, Cuba: MINAG, 2007.
- SMITH, R.; GILLIES, M.; SHANAHAN, M.; CAMPBELL, B. y WILLIAMSO, B. *Evaluating the Performance of Bay Irrigation in the GMID*. Irrigation Australia Ltd, Swan Hill, Vic, Australia, 18 -21 Oct: Irrigation and Drainage conference, 2009.
- VÁZQUEZ, E. Diseño del riego con incremento de gasto en surcos cerrados. *Ingeniería del agua*, septiembre 2001, vol. 8, nº 3, p. 339.
- WALKER, R. Surface irrigation simulation, evaluation and design. Guide and technical documentation, software SIRMOD III. 1ra ed. Utah, USA: Utah State University. Logan, 2003.
- YONTS, C.; EISENHAUER, D. y FEKERSILLASSIE, D. Impact of surge irrigation on furrow water advance. *ASAE*, febrero 1996, vol. 36, nº 3, pp. 973-979.

Anexo 1 Humedad del suelo antes de cada evento de riego

Humedad del suelo antes de cada riego (% bss)					
Profundidad (m).	Número de riegos				
	Riego 1	Riego 2	Riego 3	Riego 4	Riego 5
0-10	82,84	78,99	79,61	82,66	78,81
10-20	83,50	80,78	83,13	81,67	80,41
20-30	81,83	81,90	80,27	81,83	83,31
30-40	88,67	87,31	85,17	83,42	84,89
40-50	87,58	85,25	86,52	83,77	83,98
Promedio	84,88	82,85	82,94	82,67	82,28

Determinada por el método analítico (24 horas en la estufa), se utilizaron como instrumentos la barrena de sonda, los pesafiltros y una balanza digital con un error inferior a 0,1 gramo.

Anexo: 2 Volúmenes de riego empleados para determinar la eficiencia de riego

Volumen aplicado en los cinco eventos de riego

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S Vapl (m ³)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	1,1	1,1	1,13	1,05	1,09	1,093 \pm 0,2 b
Tratamiento B	1,04	1,03	1,06	1,12	1,09	1,067 \pm 0,3 b
Tratamiento C	0,93	0,82	0,62	0,63	0,76	0,752 \pm 0,2 a
CV %						14,9
Esx						0,0457

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

Volumen escurrido en los cinco eventos de riego

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S Ve (m ³)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	0,23	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22 \pm 0,006 c
Tratamiento B	0,19	0,2	0,2	0,19	0,21	0,20 \pm 0,006 b
Tratamiento C	0,09	0,09	0,1	0,1	0,1	0,097 \pm 0,005 a
CV %						12,4
Esx						0,014

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).

Volumen infiltrado en los cinco eventos de riego

Tratamientos	Número de riegos					Media \pm S Vinf (m ³)
	1	2	3	4	5	
Tratamiento A	0,87	0,89	0,91	0,83	0,87	0,87 \pm 0,02 b
Tratamiento B	0,85	0,83	0,86	0,93	0,88	0,86 \pm 0,02 b
Tratamiento C	0,84	0,73	0,51	0,53	0,66	0,65 \pm 0,03 a
CV %						16,6
Esx						0,1309

Letras no comunes difieren según Tukey ($p \leq 0,05$).