



**ALTERNATIVAS DE MANEJO EN RIEGO POR SURCO PARA EL
CULTIVO DE MAÍZ (*ZEA MAYS L*) EN EL VALLE INFERIOR DEL RIO
NEGRO.**

Autora

EVELYN NEFFEN

Director

Dr. ROBERTO SIMON MARTINEZ

Co-directora

Ing. (Ms. Sc.) ROSANA VALLONE

Para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Noviembre 2020

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y a la Estación Experimental del Valle Inferior de Río Negro en particular, por la oportunidad de realizar un magister.

A todas las personas que colaboraron con este estudio de tesis, desde el trabajo a campo, dirección y sugerencias, no existen logros individuales en una sociedad.

Mi especial cariño y agradecimiento a quienes me contienen a diario, las amigas y amigos, la familia y sobre todo mi compañero Lucio.

RESUMEN

El valle Inferior del río Negro presenta 24000 hectáreas bajo riego, más del 90% de las mismas se desarrollan por el método de riego gravitacional. El objetivo del estudio fue mejorar la eficiencia de uso del agua mediante el estudio de diferentes técnicas de riego por surco y frecuencias de riego, y su relación con el cultivo de maíz (crecimiento, desarrollo, eficiencia en el uso del agua y productividad). Los tratamientos se establecieron a través de la frecuencia de riego, la distribución del agua en los surcos y la continuidad temporal de cada evento de riego. Las comparaciones en la dinámica del agua bajo el criterio de desempeño de riego (estudio de láminas y eficiencias) permiten hacer sugerencias bajo el supuesto de llevar réplicas de ensayos a las chacras del valle. Por otro lado las incorporaciones de sensores de humedad y software de simulación se consideran un aporte para la transición hacia una agricultura que optimice el uso de los recursos involucrados.

Los 8 tratamientos se establecieron con dos factores: técnicas y frecuencias de riego. El factor técnica presentó 4 niveles: riego por surco Tradicional (RST), riego por surco Discontinuo o por Pulsos (RSP), riego por surco Alterno (RSA) y riego por surcos Alterno duplicando el caudal (RSAD); y 2 niveles para frecuencia de riego, alta frecuencia (AF), con periodo medio entre riegos de 10 días y baja frecuencia (BF) con un período entre riegos de 16 días.

El conjunto de eventos de riego presentó una eficiencia de aplicación (EA) promedio de 63%, la EA global, es decir sin considerar la evaluación individual de los riegos, fue de 61%. De las técnicas bajo estudio, el RSA se diferenció con un desempeño de 84%.

Los tratamientos que presentaron una relación igualitaria entre la lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado del surco y la lámina objetivo, se asociaron a los mayores valores de eficiencia en el uso del agua (EUA), productividad del agua (PA) y rendimiento. La técnica de RSA presentó los mayores valores de EUA, $2,3 \text{ kg.m}^{-3}$, de PA $2,9 \text{ kg.m}^{-3}$ y de rendimiento de grano 18900 kg.ha^{-1} . El rendimiento de grano promedio fue de 16661 kg.ha^{-1} , se encontraron diferencias estadísticas según las técnicas de riego, separando dos grupos, las técnicas de RST y RSP y por otro lado las técnicas de riego Alterno (RSA, RSAD), presentando estas últimas los mayores rendimientos.

Se evidenció estadísticamente el mayor peso de las técnicas de riego por sobre las frecuencias de riego estudiadas. RSA permitió aumentar un 30% la EUA por sobre el RST. Una reducción moderada del agua de riego del 15% asociada a BF, mejoró la EUA en un 10 % sin disminuir el rendimiento.

La eficiencia de aplicación media potencial estimada con el software WinSRFR, mejoró de 63% a 78% en términos generales, a través de un aumento del caudal unitario de 57% y una disminución en el tiempo de aplicación de 40%.

Palabras clave: Surcos alternos, Eficiencia en el uso del agua, Distribución de agua en el suelo, WinSRFR, *Zea mays*.

ABSTRACT

The lower Río Negro valley has 24000 hectares under irrigation, and more than 90% of them are developed under gravitational method. The objective of the study was to improve the efficiency of water use through the study of different furrow irrigation techniques and irrigation frequencies, and their relationship with the cultivation of corn (growth, development, efficiency in the use of water and productivity). The treatments were established through the irrigation frequency, the water distribution in the furrows and the timing of each irrigation event. The comparisons in the dynamics of the water under the criterion of irrigation performance (study of depth of water and efficiencies) allow to make suggestions under the assumption of taking replicas of tests to the farms of the valley. On the other hand, the incorporation of humidity sensors and simulation software are considered a contribution to the transition towards an agriculture that optimizes the use of the resources involved.

The 8 treatments were established with two factors: irrigation techniques and frequencies. The technical factor presented 4 levels: Traditional furrow irrigation (RST), surge flow irrigation (RSP), Alternate furrow irrigation (RSA) and Alternate furrow irrigation doubling the flow rate (RSAD); and 2 levels for irrigation frequency, high frequency (AF), with average period between 10-day irrigation and low frequency (BF) with a period between 16-day irrigation.

The set of irrigation events presented an average application efficiency (EA) of 63%, the global EA, that is, without considering the individual assessment of the risks, was 61%. Of the techniques under study, the RSA had an EA of 84%.

The treatments that presented a balance between the water required and applied, were associated with the highest values of water use efficiency (EUA), water productivity (PA) and yield. The RSA technique presented the highest values of EUA, 2.3 kg.m^{-3} , PA 2.9 kg.m^{-3} and grain yield 18900 kg.ha^{-1} . The average grain yield was 16661 kg.ha^{-1} , statistical differences were found according to the irrigation techniques, separating two groups, the RST and RSP techniques and, on the other hand, the Alternate irrigation techniques (RSA, RSAD), the latter presenting the highest yields.

The greater weight of irrigation techniques was statistically evident over the irrigation frequencies studied. RSA allowed to increase the EUA 30% over the RST. A moderate reduction in irrigation water of 15% associated with BF, improved the EUA by 10% without diminishing the yield.

The estimated average application efficiency estimated with the WinSRFR software, allowed to rise from 63% to 78% in general terms, through an increase in unit flow by 57% and a decrease in application time of 40%.

Keywords: Alternate furrow, water use Efficiency, Distribution of water in the soil, WinSRFR, *Zea mays*)

INDICE

RESUMEN	iii
Lista de tablas	3
Lista de figuras	5
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Antecedentes y fundamentos generales	11
1.2 Avances en la técnica de riego por surcos	14
2. HIPÓTESIS	17
3. OBJETIVO GENERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4. MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1. Sitio Experimental	19
4.2. Diseño experimental	21
4.2.1. Programación del riego	26
4.3. Análisis estadístico	29
4.4. Seguimiento de la humedad en el suelo	30
4.4.1. Método directo gravimétrico.....	31
4.4.2. Método indirecto con bloques de resistencia	31
4.4.3. Método indirecto a través de la constante dieléctrica.....	32
4.4.4. Método indirecto con sonda electromagnética	32
4.5. Evaluaciones de riego.....	34
4.5.1. Caracterización de los riegos	34
4.5.2. Determinación de láminas de interés.....	36
4.5.3. Cálculo de eficiencias de riego.....	37
4.6. Mediciones en el cultivo	39
4.6.1. Manejo agronómico.....	39
4.6.2. Registro fenológico	40
4.6.3. Componentes del rendimiento.....	41
4.6.4. Eficiencia de uso del agua	41
5. RESULTADOS Y DISCUSION	43
5.1. Lámina de reposición	43
5.1.1. Método balance de agua simplificado (suma de evapotranspiración diaria)	44
5.1.2. Método gravimétrico	46

5.2.	Lámina de riego	47
5.2.1.	Lámina bruta	47
5.2.2.	Lámina infiltrada, almacenada y percolada	51
5.3.	Parámetros físicos y de manejo	54
5.3.1.	Pendiente, geometría de surco y densidad aparente.	54
5.3.2.	Caracterización: tiempos de riego, caudal unitario, tiempos de avance, receso y oportunidad.	56
5.3.3.	Avance, receso y tiempo oportunidad.....	57
5.4.	Seguimiento de la humedad en el suelo	63
5.4.1.	Niveles de humedad a través de la Gravimetría.....	63
5.4.2.	Mediciones con bloques de resistencia, sensor Watermark.....	66
5.4.3.	Mediciones con el método de la constante dieléctrica, sensor Diviner.....	71
5.4.4.	Mediciones con sonda electromagnética, sensor EM38-mk2.....	78
5.5.	Desempeño de riego	81
5.5.1.	Eficiencia de aplicación	82
5.5.2.	Eficiencia de almacenamiento	85
5.5.3.	Porcentaje de percolación	85
5.5.4.	Uniformidad de distribución	86
5.5.5.	Cociente de adecuación.....	86
5.5.6.	Déficit.....	86
5.6.	Indicadores actuales y potenciales a través de WinSRFR	89
5.7	Respuesta del cultivo a los diferentes manejos del riego.....	103
6.	CONCLUSIONES.....	111
7.	BIBLIOGRAFIA	116

Lista de tablas

Tabla 1: Variables climáticas del Valle Inferior del rio Negro.....	20
Tabla 2: Tratamientos evaluados en el ensayo de riego en maíz.....	22
Tabla 3: Láminas de reposición simuladas en base a la suma de evapotranspiración diaria promedio para dos frecuencias de riego.....	27
Tabla 4: Clasificación de eficiencias de aplicación, uniformidad y almacenamiento.....	38
Tabla 5: Medidas de resumen para láminas de reposición promedio bajo dos frecuencias de riego y diferentes métodos de cálculo.....	44
Tabla 6: Comparación de láminas requeridas según suma de evapotranspiración durante la temporada 2016-201 para las dos frecuencias de riego, AF y BF.....	45
Tabla 7: Comparación de láminas requeridas según gravimetría durante la temporada 2016-2017 para las dos frecuencias de riego, AF y BF.....	46
Tabla 8: Láminas totales aplicadas durante el ciclo de cultivo según las técnicas de riego evaluadas.....	48
Tabla 9: Comparación de la lámina bruta aplicada por riego según técnicas y frecuencias de riego.....	49
Tabla 10: Secuencia de lámina bruta promedio aplicada en cada riego en AF según cuatro técnicas bajo estudio (RSA, RSAD, RST y RSP).....	50
Tabla 11: Secuencia de lámina bruta promedio aplicada en cada riego en BF según cuatro técnicas bajo estudio (RSA, RSAD, RST y RSP).....	50
Tabla 12: Comparación de la lámina media almacenada según las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.....	53
Tabla 13: Comparación de la lámina media percolada por riego según técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.....	54
Tabla 14: Pendientes longitudinales promedio para el área de estudio.....	54
Tabla 15: Tiempos de aplicación de riego promedio para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.....	56
Tabla 16: Comparación de los componentes de la ecuación de avance del agua de riego para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.....	59
Tabla 17: Comparación de los tiempos de oportunidad promedio según frecuencia de riego.....	60
Tabla 18: Comparación de tiempos de oportunidad para la interacción técnica y posiciones dentro del surco.....	61
Tabla 19: Comparación de tiempos de oportunidad de riego para la interacción según técnica y frecuencias de riego.....	61
Tabla 20: Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría en diferentes profundidades de suelo para AF.....	63
Tabla 21 Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría en diferentes profundidades de suelo para BF.....	64
Tabla 22: Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría para los cuatro manejos estudiados a tres profundidades de suelo.....	65
Tabla 23: Tensiones registradas con el sensor Watermark a dos profundidades de medida durante un cuatrimestre de riego en RST.....	67

Tabla 24: Tensiones registradas con el sensor Watermark a dos profundidades de medida bajo distintas posiciones en el surco y frecuencias de riego durante un cuatrimestre de riego en RST. ...	67
Tabla 25: Mediciones de humedad volumétrica con sonda Diviner.	71
Tabla 26: Modelos de estructura de varianza analizados.	81
Tabla 27: Eficiencias de aplicación según técnicas de riego propuestas.	83
Tabla 28: Eficiencias de almacenamiento según las técnicas de riego propuestas.	85
Tabla 29: Porcentajes de percolación según técnicas de riego propuestas.	85
Tabla 30: Relaciones entre lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado y lámina objetivo según técnicas de riego.	86
Tabla 31: Valores de déficit en los riegos según técnicas en estudio.	86
Tabla 32: Análisis de componentes principales entre variables de interés.	87
Tabla 33: Eficiencias de aplicación reales y potenciales promedio según técnicas y frecuencias de riego en estudio.	90
Tabla 34: Tiempos térmicos y duración en días de las distintas etapas fenológicas del maíz durante la temporada 2016-2017.	103
Tabla 35: Alturas de plantas de maíz promedio, según su ubicación en el surco y frecuencia de riego en diferentes momentos del ciclo.	104
Tabla 36: Rendimientos de grano según las técnicas de riego en estudio.	104
Tabla 37: Rendimientos de grano según frecuencias de riego en estudio.	105
Tabla 38: Rendimientos de grano según la posición en el surco de riego.	105

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación geográfica de la provincia de Rio Negro en Argentina y la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Valle Inferior.	19
Figura 2: Distribución mensual promedio de la temperatura media y máxima para la serie histórica de 1965-2018 y el periodo en estudio 2016-2017.	20
Figura 3: Distribución anual promedio de la precipitación y la evapotranspiración en milímetros para la serie de 2006-2015.	21
Figura 4: Disposición de los tratamientos y sus repeticiones.	22
Figura 5: Disposición en el mapa a escala de los bloques y las mangas de riego.	23
Figura 6: Caudal máximo no erosivo (QMNE) en función de la textura arcillo-limosa del suelo y pendiente, según Hammad y Stringham (1978).	24
Figura 7: Imágenes del proceso del armado, instalación y funcionamiento de la manga de riego.	25
Figura 8: Simulación con WinSRFR del desempeño de los riegos en la programación.	28
Figura 9: Simulación con WinSRFR de los tiempos de avance y receso.	29
Figura 10: Medición con los sensores Watermark.	31
Figura 11: Descripción del proceso de instalación a través de imágenes representativas, y medición con sonda Diviner.	32
Figura 12: Medición con la sonda EM38-mk2.	33
Figura 13: Transectas paralelas a los surcos de riego realizadas con la sonda EM38-mk2.	34
Figura 14: Medición de la infiltración con el método del infiltrómetro tipo doble anillo.	36
Figura 15: Siembra mecánica de maíz con formación de surco.	40
Figura 16: Siembra mecánica de maíz con incorporación de fósforo.	40
Figura 17: Estimación de ETo y ETc diaria calculada con Cropwat a través de los valores diarios obtenidos de la estación meteorológica del valle Inferior de Rio Negro en 2016 y 2017.	44
Figura 18: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en AF, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).	47
Figura 19: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en BF, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).	47
Figura 20: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en AF y RSA, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).	48
Figura 21: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en BF y RSA, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).	49
Figura 22: Curva de infiltración para el suelo en estudio suelo en el Valle Inferior del río Negro.	51
Figura 23: Histogramas con la frecuencia relativa para lámina infiltrada en riegos de baja frecuencia (promedio entre riegos 16 días) (BF) y alta frecuencia promedio entre riegos 10 días) (AF); para cuatro técnicas: RSA riego por surco Alterno, RSAD: riego por surco Alterno doble, RST: riego por surco tradicional y RSP: riego por surco por pulsos o discontinuo.	52
Figura 24: Estimación de lámina promedio almacenada con sus respectivos desvíos para AF y BF por evento de riego.	53

Figura 25: Pendiente promedio longitudinal del ensayo de riego en el valle Inferior de Rio Negro periodo 2016-2017 previamente nivelado con láser.	55
Figura 26: Sección transversal promedio del surco que caracteriza el estudio de técnicas y frecuencias de riego.	55
Figura 27: Distancias de avances promedio del frente de agua de riego por surco en el tiempo.	57
Figura 28: Curvas de avance y receso promedio para riego por surco en AF.....	58
Figura 29: Curvas de avance y receso promedio para riego por surco en BF.	58
Figura 30: Curvas de avance promedio para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.	59
Figura 31: Curvas de avance promedio para los ciclos que caracterizaron la técnica de riego por Pulso (RSP).....	60
Figura 32: Comparación de tiempos de oportunidad para la interacción técnica y distancias desde el inicio al fin del surco.....	61
Figura 33: Esquema representativo del onceavo evento de riego en alta frecuencia (AF) y en el manejo RSAD en el bloque 1.....	62
Figura 34: Esquema representativo del segundo evento de riego bajo en baja frecuencia (BF) y en el manejo RSA en el bloque 2.....	62
Figura 35: Evolución del contenido de humedad promedio expresado en porcentaje en tres estratos del perfil de suelo, con valores antes (A) y después (D) de cada riego, a partir del tercer evento en BF.....	65
Figura 36: Evolución del contenido de humedad promedio expresado en porcentaje en tres profundidades de suelo para para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.	66
Figura 37: Lecturas de tensión en el suelo con sensores Watermark en RST a dos profundidades (30 y 60 cm), en AF y en dos posiciones dentro del surcos de riego.....	68
Figura 38: Lecturas de tensión en el suelo con sensores Watermark en RST a dos profundidades (30 y 60 cm), en BF y en dos posiciones dentro del surcos de riego.....	69
Figura 39: Correlación entre lecturas de tensión con sensores Watermark y humedad volumétrica por gravimetría en RST para el estrato de 0-30 cm de profundidad.	70
Figura 40: Correlación entre lecturas de tensión con sensores Watermark y humedad volumétrica por gravimetría en RST para el estrato de 30-60 cm de profundidad.	70
Figura 41: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 12 de enero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.....	71
Figura 42: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 12 de enero de 2017 en la posición final o pie de surco.....	72
Figura 43: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 26 de enero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.....	72
Figura 44: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 26 de enero de 2017 en la posición final o pie de surco.....	73
Figura 45: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 14 de febrero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.	73
Figura 46: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 14 de febrero de 2017 en la posición final o pie de surco.	74

Figura 47: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 4 de marzo de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.....	74
Figura 48: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 4 de marzo de 2017 en la posición final o pie de surco.....	75
Figura 49: Lecturas realizadas con la sonda Diviner (línea de puntos) y a través del método gravimétrico (línea continua) expresadas en contenido volumétrico, para los primeros 30 cm de profundidad en RST.....	75
Figura 50: Correlación entre lecturas de humedad volumétrica a través de la sonda Diviner y de la técnica gravimétrica en RST, a los 30 cm de profundidad.	76
Figura 51: Correlación entre lecturas de humedad volumétrica a través de la sonda Diviner y de la técnica gravimétrica, a los 60 cm de profundidad en RST.	76
Figura 52: Correlación entre contenido volumétrico de agua con la sonda Diviner y las lecturas de tensión registradas con el sensor Watermark a los 30 cm de profundidad, en BF y RST.	77
Figura 53: Correlación entre contenido volumétrico de agua con la sonda Diviner y las lecturas de tensión registradas con el sensor Watermark a los 60 cm de profundidad, en BF y RST.	77
Figura 54: Regresión lineal entre la humedad volumétrica en la profundidad de 30-60 cm de suelo y la conductividad eléctrica aparente medidos a través del sensor EM38-mk2.	78
Figura 55: Mapa de Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a una profundidad de 0,75 metros y categorizada en 5 rangos.....	79
Figura 56: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 27/12/2016.	79
Figura 57: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 30/12/2016.	80
Figura 58: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 14/01/2017.	80
Figura 59: Comparación entre las variables eficiencia de aplicación y lámina bruta, para los tratamientos que combinan técnicas de riego y frecuencias.	84
Figura 60: Análisis de los componentes principales para las variables que caracterizan el desempeño de riego y el rendimiento del cultivo.	88
Figura 61: Escenarios de desempeño potencial para RSA en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).	91
Figura 62: Escenarios de desempeño potencial para RSAD en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).	92
Figura 63: Escenarios de desempeño potencial para RSP en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).	93
Figura 64: Escenarios de desempeño potencial para RST en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).	94
Figura 65: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSA en AF.	95
Figura 66: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSAD en AF.	95
Figura 67: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en AF.....	95

Figura 68: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en AF.....	96
Figura 69: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSA en BF.	96
Figura 70: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSAD en BF.	96
Figura 71: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en BF.....	97
Figura 72: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RST en BF.....	97
Figura 73: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSA en AF.	97
Figura 74: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSAD en AF.	98
Figura 75: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSP en AF.....	98
Figura 76: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en AF.....	98
Figura 77: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSA en BF.	99
Figura 78: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSAD en BF.	99
Figura 79: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en BF.....	99
Figura 80: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en BF.....	100
Figura 81: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSA en AF.	100
Figura 82: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSAD en AF.	100
Figura 83: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RST en AF.....	101
Figura 84: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSP en AF.....	101
Figura 85: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSA en BF.	101
Figura 86: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSAD en BF.	102
Figura 87: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RST en BF.....	102
Figura 88: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSP en BF.....	102

Figura 89: Relación entre la eficiencia de uso de agua y las diferentes láminas aplicadas según propuesta de técnica de riego y frecuencia durante el ciclo de cultivo de maíz 2016-1017.....	106
Figura 90: Valores promedio de eficiencia en el uso del agua para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.	107
Figura 91: Valores promedio de productividad de agua (PA) y de lámina aplicada durante el ciclo de cultivo para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.	108
Figura 92: Valores promedio de Productividad del agua para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.	108

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 *Antecedentes y fundamentos generales*

En Argentina la superficie agropecuaria es de aproximadamente 180 millones de hectáreas, el área cultivada abarca 39 millones de hectáreas (ha), un 5 % de ese total corresponde a ha cultivadas bajo riego (2,1 millones de ha) (FAO, 2015). El 65% de la superficie se riega a partir de fuentes superficiales, y el resto con agua subterránea. Se estima existe un gran potencial de ampliación del riego, del orden de 6,2 millones de hectáreas, lo cual representa aproximadamente tres veces el área actualmente irrigada (FAO, 2015).

Las principales áreas en donde los recursos hídricos son usados con fines de regadío y podrían expandirse son: el noroeste argentino (comprende las provincias de Salta, Jujuy, Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca), la región central (San Luis, Córdoba y La Rioja), la región de Cuyo (San Juan y Mendoza) y las zonas del Comahue/Patagonia (Buenos Aires, Río Negro, La Pampa, Neuquén y Chubut). (Chambouleyron & Morábito, 2008).

Con respecto a las áreas regadas en la provincia de Río Negro, el departamento provincial de aguas registra hasta la actualidad 117.000 hectáreas bajo riego, sobre un total de 136.000 hectáreas registradas para tal fin. En proyectos de FAO para la región se proyecta como mínimo el doble de la superficie a incorporar considerando áreas aun no sistematizadas (FAO, 2015).

El Valle Inferior del río Negro presenta una cifra similar, el 90% del método de riego utilizado es gravitacional, producto de una serie de obras hidráulicas de conducción y distribución del agua que permiten su desarrollo desde la década del 70'. La superficie regable del valle muestra un aumento de su superficie productiva desde 2005, con predominancia de cultivos de especies forrajeras, luego frutales, cereales y hortalizas. Actualmente existen 24.000 hectáreas bajo riego, parceladas en 500 chacras aproximadamente. (IDEVI, 2011). En cuanto a la producción de maíz, la superficie sembrada está en aumento, debido a su alto rendimiento y uso en la producción animal. Según trabajos realizados por la EEA de INTA Valle Inferior en condiciones hídricas y nutricionales óptimas el rendimiento potencial logra 18 tn.ha⁻¹ (Margiotta. *et al.*, 2008 y 2009) (Reinoso *et al.*, 2009, 2014 y 2018).

El cultivo de maíz en zonas donde el promedio de la precipitación media anual es de 395 mm, como los valles del norte de la Patagonia, necesita del riego para poder lograr una producción de grano, a diferencia de la región núcleo (norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sur-este de Córdoba), donde se puede producir sin depender del riego o bien este es complementario. Desde el punto de vista térmico, el Valle Inferior presenta temperaturas máximas no excesivas (32-35 °C), y

una alta amplitud térmica, condiciones óptimas para mantener altas tasas de asimilación de CO₂ y disminuir las pérdidas por respiración, permitiendo que los procesos de crecimiento se prolonguen y aumente la producción de materia seca (Andrade *et al.*, 1996). La calidad del agua de riego según estudios locales es de una conductividad eléctrica de 0,17-0,30 dSm⁻¹ (Quichán *et al.*, 2016) y los suelos no presentan limitaciones para la producción (FAO, 2015). Sin embargo, diversos factores, producen variaciones en el rendimiento, la heterogeneidad de los suelos, el manejo del agua, la aplicación de fertilizantes y el control de malezas, son consideradas las principales causas de variación (Martínez *et al.*, 2012).

Diversos autores estiman bajas eficiencias de riego gravitacional en promedio para el país (35-40%), (Bos & Chambouleyron, 1998, Morábito *et al.*, 2007; Vallone *et al.*, 2007; Schilardi, 2011) encontrándose en el Valle Inferior de Río Negro valores similares (Lui *et al.*, 2012). Estos datos coinciden con la información del Estudio Integral del Río Negro (CIL) realizado en 1988, por lo que se evidencian limitaciones para mejorar el desempeño del riego.

Las razones para la utilización del método de riego gravitacional son diversas: flexibilidad y adaptación a situaciones locales, bajo costo, disponibilidad de agua, conocimientos empíricos arraigados a distintas condiciones topográficas, culturales, etc. Otro motivo es la falta de recursos económicos para instalar riegos presurizados, que además de una fuerte inversión, requieren una fuente energética adicional y generalmente tienen mayores costos operativos. Diversos estudios se han enfocado en mejorar la eficiencia energética mediante la optimización del funcionamiento para disminuir costos en el riego presurizado (Moreno *et al.* 2007; Córcoles *et al.* 2016).

El riego gravitacional cuando la microtopografía de los lotes agrícolas es adecuada, con pendientes uniformes menores al 2 %, el riego gravitacional por surcos constituye una alternativa con viabilidad tecnológica y financiera, accesible a pequeños y medianos productores (Génova, 1994). Asimismo, el riego por surco se adapta a los cambios de caudal, permitiendo regar más o menos surcos en función del mismo, cuando la preparación y el manejo del terreno son adecuados las eficiencias de aplicación que pueden obtenerse son elevadas, del orden del 70% o superiores (Grassi, 1987). Por otra parte, en zonas con elevada salinidad, los sistemas de riego gravitacionales son los adecuados para lavar las sales del perfil. (Martínez *et al.*, 2016).

Existen otros estudios de comparación de tres métodos de riego comúnmente utilizados en frutales; riego por surcos con sistema de aducción a baja presión, goteo y microjet, que concluyen en ventajas energéticas y uniformidad de rendimiento para el riego por surco (Carreño & Humberto, 2000). Mientras que Gomensoro y colaboradores en 2011 consideraron que la adopción de riego presurizado es la opción más adecuada en las localidades bajo estudio, donde la escasa oferta de

agua, la competencia con el abastecimiento poblacional y las fuertes pendientes del terreno dificultan la práctica gravitacional.

Pereira & Trout, en 1999, consideran que no hay un mejor método de riego, sino que se deben tener en cuenta ventajas y desventajas de acuerdo a cuestiones topográficas, de disponibilidad de agua, propias de los cultivos, económicas, sociales y culturales.

El riego produce resultados muy favorables para una zona o región, pero su mal manejo puede llevar al deterioro del suelo, el agua y el ambiente. En hortalizas y frutales, las prácticas de riego gravitacional inadecuadas determinan la desuniformidad de la producción, desarrollo de enfermedades, ineficiencia en la aplicación de fertilizantes, entre otras (Martínez *et al.*, 2008). La evaluación de la eficiencia de aplicación en un área determinada constituye una forma de establecer el grado de racionalidad en el uso del agua (Grassi, 1998). La evaluación de desempeño del riego tiene como objetivo su optimización e incluye la observación, registro e interpretación de las actividades relacionadas al mismo (Bos & Chambouleyron, 1998). Los ensayos de campo para evaluar los métodos de riego son necesarios para definir cuantitativamente su desempeño, no solamente en relación con las variables físicas del sistema, sino también con relación a su diseño y manejo.

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. (Pereira *et al.*, 2012). Entendiéndose como uso benéfico el agua usada en la producción de un cultivo (evapotranspiración, percolación profunda para contribuir a la lixiviación de sales del perfil del suelo, control de la temperatura de la planta, germinación de la semillas, control de erosión a través del mejoramiento de la estructura del suelo, ser hábitat de insectos o de fauna benéfica, etc.), el exceso de percolación profunda para control de heladas con suelo en capacidad de campo, el agua escurrida al pie pero usada para regar otra parcela localizada aguas abajo, el agua almacenada en la parcela para usarse en otro momento. (Burt *et al.*, 1997). El término uso eficiente del agua está pensado como un sinónimo de uso racional o sustentable.

Dos indicadores muy importantes para un sistema productivo atravesado por el riego son la productividad de agua (PA) y la eficiencia de uso del agua (EUA). La PA es un indicador fisiológico que representa la capacidad productiva de un cultivo por unidad de agua evapotranspirada. Mientras que la EUA es una variable que representa la utilización del agua a nivel de parcela con todas las limitaciones que con lleva la producción agropecuaria, ya que expresa la relación entre biomasa total o rendimiento del cultivo y el agua aplicada o entrada total de agua al sistema (Van Halsema & Vincent, 2012).

1.2 Avances en la técnica de riego por surcos

El riego por surcos es un sistema muy utilizado en el cultivo de maíz y permite obtener elevadas eficiencias de aplicación (Clemmens & Detric, 1994; Margiotta. *et al.*, 2008 y 2009). La técnica de bloquear la parte final del surco para impedir las pérdidas de agua por escorrentía, ha resultado eficaz para mejorar la eficiencia de aplicación (Arbat *et al.*, 2008).

Un desarrollo en la tecnología del riego por superficie lo constituye el llamado riego por caudal discontinuo, con él se ha logrado aumentar la eficiencia de riego y facilitar la automatización. (Roqué, 2003; Romay & Génova, 2011; P&R, 2019; Antúnez *et al.*, 2015). Esta técnica fue originalmente concebida como un medio para lograr el avance del frente de agua más rápido en unidades largas, para luego establecer un tiempo promedio de aplicación de agua que minimice el escurrimiento al pie. (Romay, 2012).

Durante el riego por pulsos, el proceso de humedecimiento y secado en cada ciclo de aplicación es responsable de la disminución de la tasa de infiltración por la modificación de las características físicas e hidrodinámicas de la capa superficial del suelo. Cada tramo humedecido provoca la desagregación de terrones y otros agregados del suelo, sellando los poros con las pequeñas partículas liberadas. En estas condiciones, en el primer ciclo de humedecimiento, el agua avanza hasta una fracción de la longitud total del surco, generalmente un cuarto de la misma. En el ciclo siguiente, el agua recorre este tramo húmedo más rápidamente. De esta manera, la suma de los tiempos de humedecimientos necesarios para completar el avance es menor que el tiempo que sería necesario para tal fin si el caudal sería suministrado de manera continua. (Romay & Génova., 2011). Se recomiendan entre 4 a 5 pulsos usualmente para surcos de hasta 400 metros. Mientras que de 5 a 6 son usados para surcos de más de 400 metros de largo (USDA, 1984). Yonts y colaboradores (1996) desarrollaron una relación entre el tiempo requerido para el primer ciclo de avance respecto al tiempo necesario en los ciclos siguientes, para concretar aproximadamente la misma distancia.

En línea con prácticas que aumentan la eficiencia de riego, se encuentra el riego por surco alterno (RSA) que consiste en regar un surco dejando el surco adyacente sin regar, ya que permite la distribución del agua con una menor lámina (Arbat *et al.*, 2009). El RSA permite inducir un aumento en la EUA, numerosos trabajos refuerzan la noción de que reduce el consumo de agua manteniendo la producción del cultivo (Kang *et al.*, 2000; Webber *et al.*, 2006; Horst *et al.*, 2007)

En las últimas décadas, se han logrado mejoras en el diseño, operación y evaluación del riego gravitacional a través de modelos de simulación, el software WinSRFR del USDA (Bautista & Walker , 2010) permite estimar la potencial mejora de los indicadores de desempeño en diferentes

escenarios de optimización del riego. Los resultados de las simulaciones con WinSRFR dependen de las propiedades hidráulicas del suelo y de su variación entre riegos durante un ciclo de cultivo (Michael & Pandya, 1971), de los cultivos, la geometría del sistema (largo, pendientes, etc.), y del manejo del riego: caudales, duración, etc. Las salidas del modelo incluyen las trayectorias de avance y recesión, hidrogramas de entrada y salida, perfil de infiltración e indicadores de desempeño.

Cuantificar la demanda real del cultivo, estimar láminas óptimas de riego y realizar evaluaciones de desempeño durante todos los eventos de un ciclo de cultivo, contribuye al proceso de mejorar no solo la EUA, sino también la PA, ya que la eficiencia de aplicación presenta una relación positiva directa con EUA y PA en óptimas condiciones de crecimiento.

Por todo lo mencionado es prioritario contribuir al mejor aprovechamiento del agua de riego, a través del estudio de alternativas de manejo para sistemas gravitacionales, que optimicen la eficiencia de uso del agua y la productividad. Es importante precisar la cantidad de agua aplicada durante un ciclo de cultivo de maíz bajo riego gravitacional, estudiar la oferta hídrica planteada con respecto a la demanda de evapotranspiración de la zona y comparar diferentes técnicas y frecuencias para riego por surco.

En el presente estudio se describe la dinámica del agua a través de la humedad del suelo en la rizófera (estimaciones directas e indirectas) y su relación con el cultivo de maíz (crecimiento, desarrollo, eficiencia en el uso del agua y productividad), bajo diferentes técnicas y frecuencia de riego por surco. Las alternativas en el riego por surcos se establecieron con cambios en el: caudal, continuidad temporal del riego y distribución del agua en los surcos. Las comparaciones en la dinámica del agua bajo el criterio de desempeño de riego (láminas y eficiencias de riego) permiten hacer sugerencias bajo el supuesto de llevar réplicas de ensayos al campo productivo. Por otro lado las incorporaciones de sensores de humedad y software de simulación bregan por la transición a una agricultura de precisión que optimice el uso del recurso hídrico.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2. HIPÓTESIS

- ✓ Las técnicas de: riego por surco alterno (RSA) y caudal discontinuo (RSP), logran una eficiencia de aplicación promedio superior al 70%.
- ✓ Las técnicas de riego gravitacional que logran una mínima lámina de percolación se asocian con los mayores rendimientos de cultivo.
- ✓ Una baja frecuencia de riego (BF) no disminuye estadísticamente el rendimiento del cultivo, pero aumenta la eficiencia de uso de agua con respecto a una alta frecuencia de riego (AF).

3. OBJETIVO GENERAL

Contribuir al mejor aprovechamiento del agua de riego en el valle Inferior del río Negro, mediante el estudio de diferentes técnicas de riego por surco y frecuencias de riego.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el efecto de diferentes técnicas de riego por surco y frecuencias de riego en el cultivo de maíz a través de un conjunto de parámetros que describen su desempeño: eficiencia de uso del agua, eficiencia de aplicación real y potencial, eficiencia de almacenaje, uniformidad de distribución, percolación profunda y cociente de adecuación.
2. Estudiar la dinámica del agua en el suelo a través de métodos de estimación de humedad directos e indirectos: gravimetría, sonda Diviner, Watermark y EM38-mk2.
3. Analizar los eventos de riego con el software WinSRFR y concluir sobre escenarios de mejora en donde las variables de cambio son el tiempo de riego y el caudal.

MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Sitio Experimental

El valle Inferior del río Negro se localiza al noreste de la provincia homónima, pertenece a la región natural Patagonia extra andina oriental, el relieve se compone de llanuras aluviales y los suelos más frecuentes pertenecen a los órdenes Aridisoles y Entisoles (Godagnone & Bran, 2009), los cuales se caracterizan por su baja meteorización, texturas medias a finas, escasos en materia orgánica y sin gran desarrollo edáfico (Panigatti, 2010). La calidad del agua de riego presenta valores adecuados para desarrollar la producción agropecuaria sin limitaciones (CE 0,17-0,30 dSm⁻¹) (Quichán *et al.*, 2016).

El presente estudio se realizó en la Estación Experimental Agropecuaria del Valle Inferior del río Negro (EEAVI) sobre suelos de la serie Chacra (Guerra *et al.*, 1966): 40° 47' Sur y 63° 03' Oeste.

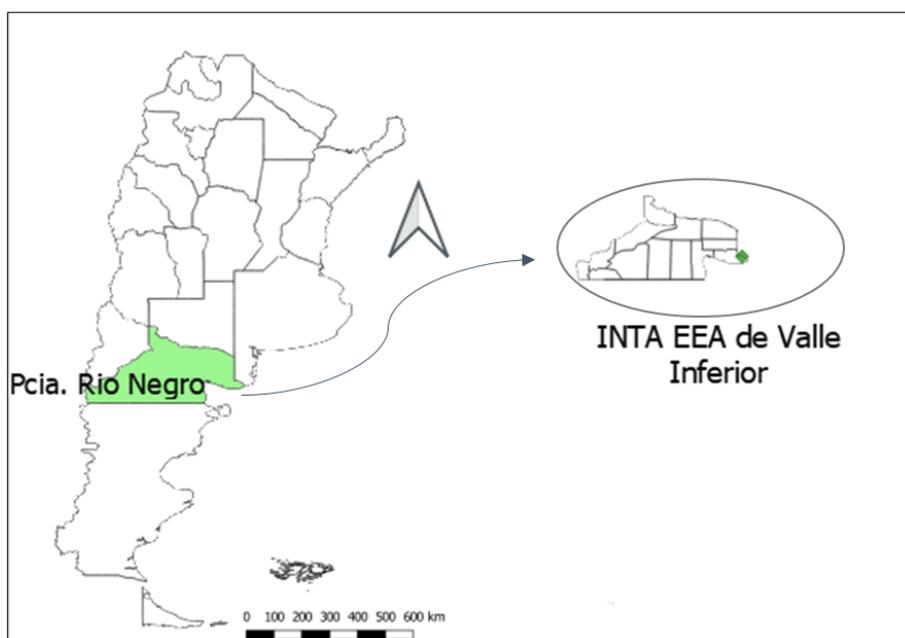


Figura 1: Ubicación geográfica de la provincia de Río Negro en Argentina y la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Valle Inferior.

El clima del valle según la clasificación de Thornthwaite es semiárido mesotermal, con nulo exceso de agua y baja concentración térmica estival (DB₂ da') (Godagnone & Bran, 2009).

Las variables climáticas más importantes se presentan en la Tabla 1, en base a la recopilación de datos climáticos de la serie histórica de 1965-2008 (Martin, 2009), actualizado con los registros de la estación agro meteorológica de la EEAVI hasta 2018.

Tabla 1: Variables climáticas del Valle Inferior del río Negro.

Variable	Valor
Temperatura media anual	14,2 °C
Temperatura máxima anual	21 °C
Temperatura mínima anual	7,9 °C
Período libre de heladas	199 días
Fecha promedio primera helada	8- abril
Fecha promedio última helada	3- noviembre
Precipitación media anual	395 mm

El periodo de estudio de 2016-2017 presentó una mayor temperatura mensual media y máxima en el período estival (Figura 2), con los valores mensuales promedio de temperatura media y máxima mayores con respecto a la serie histórica.

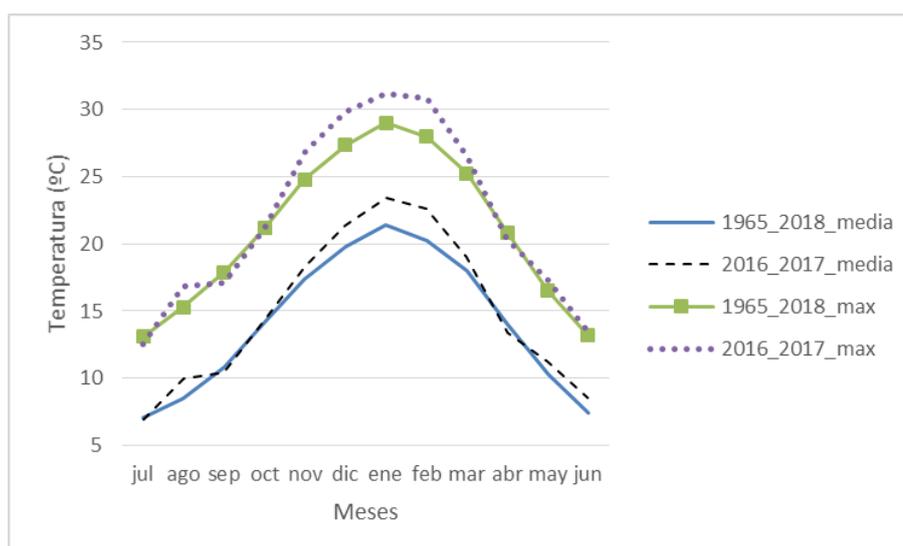


Figura 2: Distribución mensual promedio de la temperatura media y máxima para la serie histórica de 1965-2018 y el periodo en estudio 2016-2017.

Como se observa en la Figura 3 el régimen del valle es Isohigro o de uniformidad en las precipitaciones mensuales. La evapotranspiración (ETo) anual promedio calculada para el periodo de 1965-1987 (Martin, 2009) según Blaney-Criddle, Thornthwaite y Turc, fue de 1037 mm, 1058 mm y 1009 mm respectivamente, concentrándose el requerimiento en el período estival. La ETo anual promedio calculada por CROPWAT 8.0 a través de Penman Monteith para el período de 2006-2015 fue de 1210 mm, la diferencia entre ETo promedio y las precipitaciones promedio del valle nos

muestra que durante todo el año prevalece el déficit hídrico (Figura 3), y el riego resulta imprescindible para el desarrollo de un cultivo.

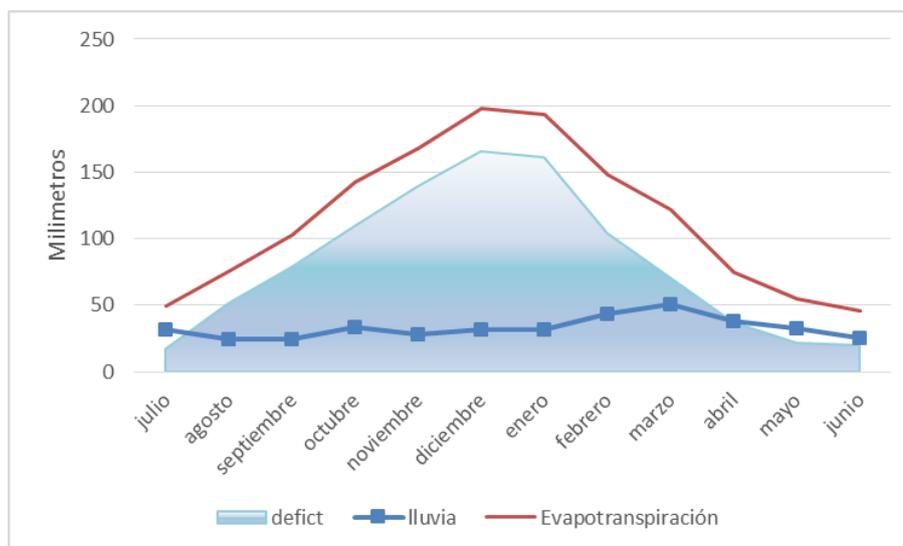


Figura 3: Distribución anual promedio de la precipitación y la evapotranspiración en milímetros para la serie de 2006-2015.

4.2. Diseño experimental

El ensayo se realizó sobre una superficie aproximada de 10.000 m², dividido en 24 parcelas iguales. Sobre esta superficie se instalaron ocho tratamientos de riego con tres réplicas (Figura 4). Los tratamientos se definieron en base a dos factores: frecuencia de riego y técnica de riego por surco.

Se evaluó el factor frecuencia de riego en dos niveles: alta frecuencia (AF), con periodo medio entre riegos de 10 días y baja frecuencia (BF) con un período entre riegos de 16 días. Los intervalos de riego se justifican en el punto 4.2.1, donde la programación de los riegos se realizó con conocimientos de tolerancia del maíz al déficit hídrico y a través del software Cropwat 8.0 con datos climáticos históricos del lugar de estudio.

Todos los tratamientos se regaron por surcos y se establecieron 4 técnicas según:

- Caudal asignado por surco: el mismo se modifica con el número de boquillas que se asignan a los surcos de riego.
- Surcos regados de forma alterna: técnica que permite regar un surco y el siguiente no, la planta recibe el agua de solo uno de dos surcos vecinos que la rodea. Los surcos regados están fijos en el tiempo.
- Discontinuidad o intermitencia en el riego: es una metodología que consiste en realizar un riego bajo ciclos de humedecimiento, en donde el riego se interrumpe y retoma en cada ciclo o pulso, de ahí su nombre riego por pulsos.

Los niveles del factor técnica de riego fueron según las diferentes combinaciones:

RST (riego por surco tradicional o convencional): Riego continuo, todos los surcos regados, una boquilla por surco.

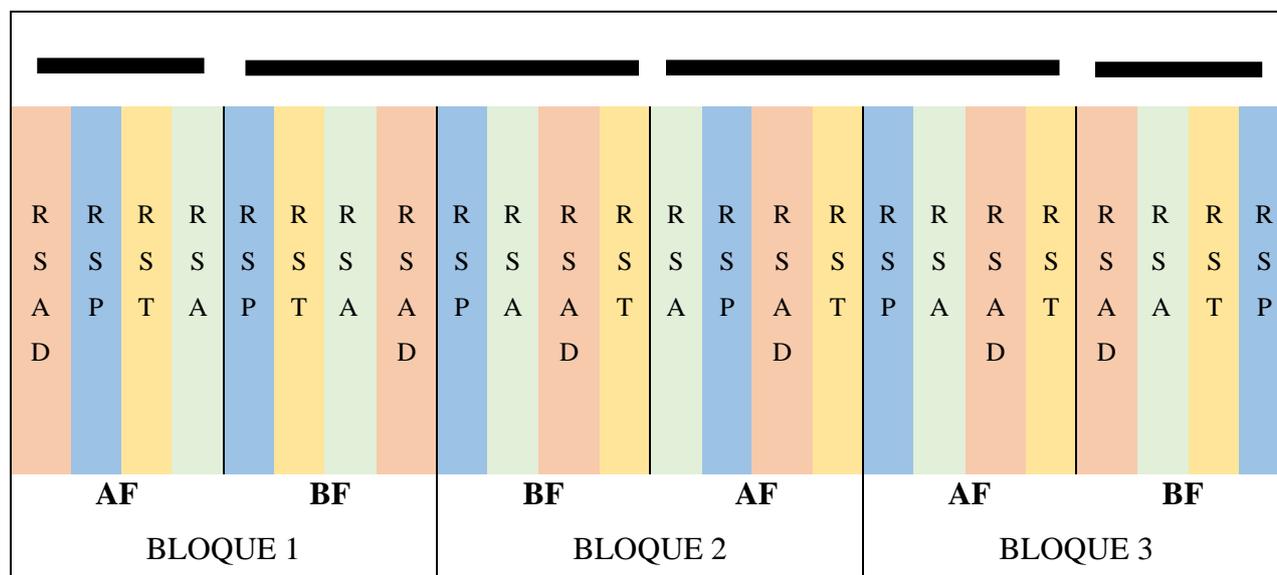
RSA (riego por surco alterno): Riego continuo, mitad de los surcos regados, una boquilla por surco.

RSAD (riego por surco alterno doble): Riego continuo, mitad de los surcos regados, dos boquillas por surco, duplicando el caudal por surco.

RSP (riego por surcos en pulso o discontinuo): Riego discontinuo, todos los surcos regados, una boquilla por surco.

Tabla 2: Tratamientos evaluados en el ensayo de riego en maíz.

Factor 1: Frecuencia	Factor 2: Técnica			
	Tradicional (RST)	Alterno (RSA)	Alterno doble (RSAD)	Pulso (RSP)
Alta (AF)	RST_AF	RSA_AF	RSAD_AF	RSP_AF
Baja (BF)	RST_BF	RSA_BF	RSAD_BF	RSP_BF



Factor frecuencia: AF: Alta frecuencia con un período entre riegos de 10 días BF: Baja frecuencia con un período entre riegos de 16 días. Factor técnica: RST: Tradicional, RSA: Alterno, RSAD: Alterno Doble, RSP: Pulso o discontinuo. Rectángulos negros: mangas de riego.

Figura 4: Disposición de los tratamientos y sus repeticiones.



Figura 5: Disposición en el mapa a escala de los bloques y las mangas de riego.

La unidad experimental fue la parcela, contó con 420 m^2 (4,2 m de ancho y 100 m de largo), abarcó 6 surcos y una separación entre líneas de 0,7 m. Las unidades experimentales estuvieron estratificadas en parcelas divididas, organizadas en bloques con aleatorización restringida, ya que el factor frecuencia no estuvo dispuesto al azar.

El sentido o dirección de riego antes del ensayo era perpendicular al mismo, para abarcar correctamente las posibles variaciones del terreno (efecto cabecera de surco, lavado de nutrientes por percolación) se decidió trabajar en bloques.

El primer riego en ambas frecuencias (AF, BF) tuvo por objetivo asegurar una correcta densidad de siembra y no se separó por técnicas de riego.

Para determinar el tiempo de corte o de aplicación del agua de riego se estableció como criterio general de interrupción cuando en la mitad de los surcos regados el agua llegara al pie o final de surco. Este criterio se fundamenta desde la lógica mayoritaria de las chacras del valle, en donde se riega hasta que el agua llega al pie. Los surcos no presentaron desagüe al pie, se bloquearon con un montículo de tierra para evitar pérdidas de agua por escorrentía.

El riego por surcos se efectuó con mangas de polietileno flexible con compuertas de plástico regulables de 50 mm de diámetro, que erogan entre $1\text{-}3 \text{ L s}^{-1}$, dependiendo del caudal de ingreso y la carga hidráulica. El caudal por boquilla se mantuvo cercano a los 2 L s^{-1} , de tal forma de respetar un caudal máximo no erosivo (QMNE) de $6,2 \text{ L s}^{-1}$, incluso en RSAD (Figura 6).

El caudal máximo no erosivo se estimó mediante el modelo de Hammad y Stringham (1978) (Ecuación 1).

$$QMNE = a * s^b \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

QMNE: en $L \cdot s^{-1}$

S: pendiente longitudinal, en porcentaje.

a: factor en función de la textura del suelo, en Ls^{-1}

b: exponente en función de la textura del suelo.

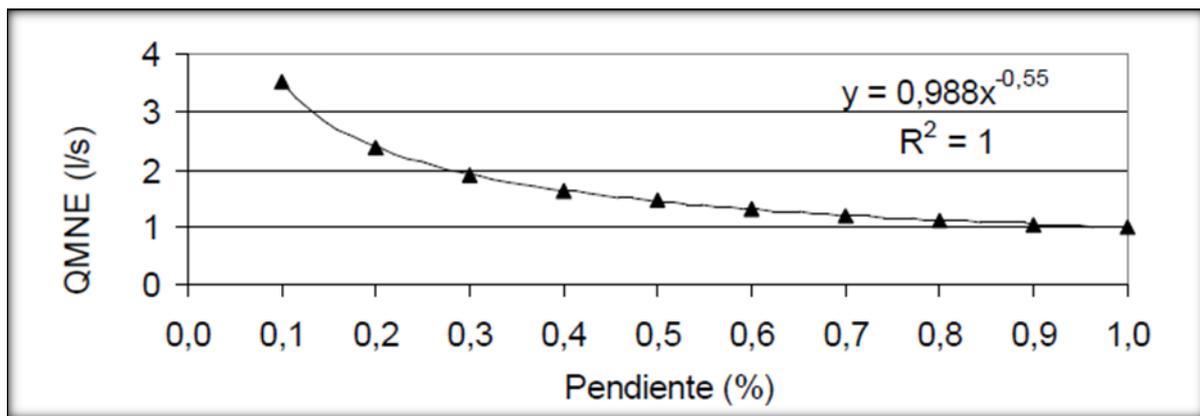


Figura 6: Caudal máximo no erosivo (QMNE) en función de la textura arcillo-limosa del suelo y pendiente, según Hammad y Stringham (1978).

La manga utilizada presentó 400 mm de diámetro y 0,3 mm de espesor. Sobre la misma se insertaron las compuertas/boquillas cada 0,7 metros, en coincidencia con la separación de las líneas de siembra. El bajo requerimiento de presión, permitió instalar las mangas directamente con toma de agua desde la acequia. Para equiparar presiones y liberar burbujas de aire y suciedad, se instalaron tambores de 200 litros de chapa a los que se le adoso la manga de polietileno en cada trato de mangas, este caso se instalaron 4 tambores (Figura 7).

En el diseño del RSP se subdividió el frente de riego en dos unidades de riego, a cada unidad le corresponden entre 4-5 ciclos, ya que contaban con una longitud de surcos de 100 metros (USDA, 1984). Mientras a una unidad se le suministra agua, en la otra unidad se interrumpe la dotación, generando los pulsos del riego discontinuo.

En el RSP los cambios se realizaron de forma manual en cada unidad de riego, a través de un criterio simplificado de elaboración propia para la sucesión de ciclos, basado en sugerencias de Yonts y colaboradores (1996). El tiempo de riego en cada ciclo se estimó en función de una prueba

a campo (sitio específico), en donde al inicio de cada riego se establece que el tiempo requerido para el primer ciclo de avance es el mismo respecto al tiempo necesario para que el agua avance hasta el primer cuarto de distancia. Por lo tanto, en surcos de 100 metros de longitud, el primer ciclo de cada evento de riego es igual a los minutos que transcurren para que el agua recorra los 25 metros iniciales, el segundo ciclo es igual al doble de ese tiempo, el tercero igual al triple y así sucesivamente. No se realizaron remojos durante el RSP y caudal fue el mismo que para el resto de los tratamientos.



Figura 7: Imágenes del proceso del armado, instalación y funcionamiento de la manga de riego.

4.2.1. Programación del riego

La distribución aproximada de los riegos se realizó antes de comenzar el estudio con datos meteorológicos históricos del valle Inferior, se fundamentó en un balance de agua simplificado según la metodología de FAO (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó con el software Cropwat 8.0 (FAO, 2009), que utiliza la fórmula de Penman-Monteith para su cálculo. Los datos meteorológicos utilizados provienen de valores promedio de la serie histórica del valle desde 1965 a 2008 (Martin, 2009) y fueron actualizados hasta el año 2015 con la estación meteorológica. Para el cálculo de lluvia efectiva (P_e) se eligió la ecuación empírica de USDA. Los valores de coeficiente de cultivo (K_c) se obtuvieron dividiendo el ciclo agronómico en cuatro etapas y asignando un valor de k_c inicial (k_c: 0,6), medio (k_c: 1,2) y final (k_c: 0,4), estos valores se referenciaron según FAO para maíz (FAO, 2006, Snyder *et al.*, 1989; Pereira & Allen, 1999; Doorenbos & Pruitt, 1977). Se asumió completar riegos a capacidad de campo con una eficiencia de riego de 70% y un sistema radicular máximo de 0,8 m. Se establecieron las frecuencias de riego a través del factor de agotamiento (p) utilizado también en otros trabajos de programación de riego gravitacional en maíz (Taghvaeian *et al.*, 2014) y sugeridos por FAO (Allen *et al.*, 1999), 0,4 en AF y 0,6 en BF. Se obtuvo un periodo promedio entre riegos para AF (p=0,4) de 10 días y para BF (p=0,6) de 16 días. Las estimaciones obtenidas arrojaron una lámina requerida total (LRT) de 624 mm, mientras que lámina requerida promedio por riego (LRR) para AF fue de 55 mm y para BF fue de 85 mm (Tabla 3).

Tabla 3: Láminas de reposición simuladas en base a la suma de evapotranspiración diaria promedio para dos frecuencias de riego.

N° riegos AF	Fechas	Días	ETc	ETc acum
siembra	16/11	-	-	-
1	21/11	5	21	21
2	29/11	8	27	49
3	08/12	9	34	83
4	16/12	8	39	122
5	24/12	8	45	167
6	01/01	8	52	219
7	11/01	10	75	295
8	22/01	11	81	376
9	01/02	10	74	466
10	12/02	11	80	546
11	24/02	12	65	611
12	05/03	9	30	642
	Promedio \pm DE	9 \pm 2	55 \pm 22	
	TOTAL \sum_{11}^0		625	
N° riegos BF	Fechas	Días	ETc	ETc acum
siembra	16/11	-	-	-
1	24/11	8	31	31
2	07/12	13	48	79
3	20/12	13	57	136
4	31/12	11	76	206
5	15/01	15	113	319
6	30/01	15	117	436
7	13/02	14	94	536
8	04/03	19	87	629
	Promedio \pm DE	15 \pm 3	85 \pm 31	
	TOTAL \sum_{8}^0		623	

*Programación con el software Cropwat (FAO, 2009) a partir de datos históricos climáticos del Valle Inferior del río Negro y la estación meteorológica local para establecer las frecuencias de riego como un factor dentro de los tratamientos. En donde: ETc: Evapotranspiración del cultivo (mm), ETc acum: Evapotranspiración del cultivo acumulada (mm), Días: días entre riegos, N°: secuencia de riegos para alta frecuencia (AF) y baja frecuencia (BF).

Se complementó la programación del riego con un diseño generado con el software WinSRFR versión 4.1 módulo Simulation (Bautista *et al.*, 2012), en donde la lámina a aplicar debía asegurar la lámina objetivo en toda la parcela, representada por el número de surcos establecidos y una erogación promedio de 2 Ls⁻¹. Dicha corrida se realizó a modo expeditivo para prever el comportamiento del agua en el ensayo de dimensiones específicas.

El módulo Simulation representa el flujo no permanente superficial y subsuperficial para surcos y melgas en forma individual. La simulación consiste en soluciones numéricas de expresiones

matemáticas de los principios físicos de la conservación de masa y momento. Los resultados dependen de la información que se ingresa en cuanto a: propiedades hidráulicas del suelo y cultivo, el diseño físico del sistema (longitud, pendiente, etc.) y el manejo del riego: caudal, duración, etc. Los resultados del modelo incluyeron: trayectorias de avance y receso, hidrogramas de caudal y láminas a distancias específicas de la parcela, perfiles superficiales a tiempos determinados, patrón de infiltración e indicadores de desempeño (eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución, adecuación del riego, etc.) que se calcularon en función de la lámina objetivo especificada.

Los datos cargados para el riego simulado fueron: lámina objetivo de 55 mm, caudal de manejo por surco de 2 L s^{-1} , tiempo de riego de 0,58 horas (35 minutos). Con respecto a la geometría del sistema, la longitud del surco fue de 100 m, la pendiente promedio de $0,0003 \text{ m.m}^{-1}$ sin drenaje al pie y la distancia entre surcos de 0,7 m, 6 surcos de riego en simultáneo con un ancho de fondo 0,16 m y un máximo tirante de 0,15 m. Se cargó una rugosidad de Manning de 0,04, correspondiente a un suelo desnudo con labranza.

Los resultados de la simulación mostraron un riego teórico con buen desempeño, una eficiencia de aplicación mayor al 90% y una excelente uniformidad (98%), completando un avance que asegura la lámina requerida en toda la longitud. (Figura 8)

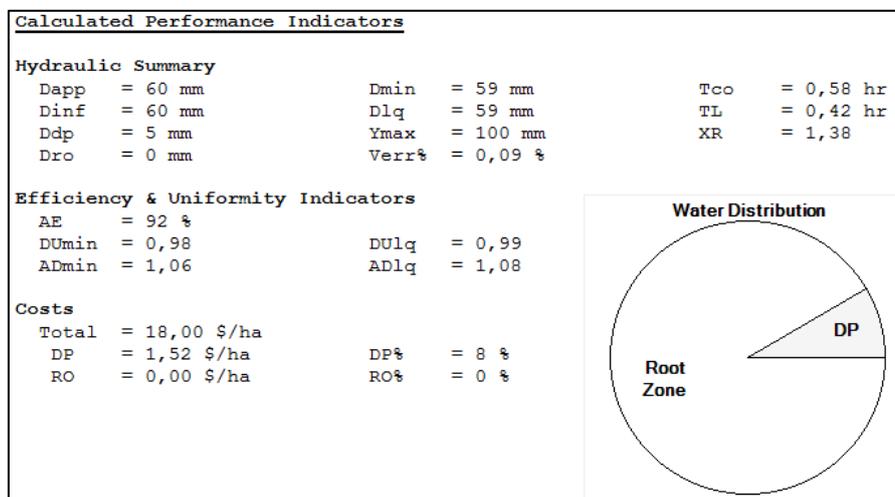


Figura 8: Simulación con WinSRFR del desempeño de los riegos en la programación.

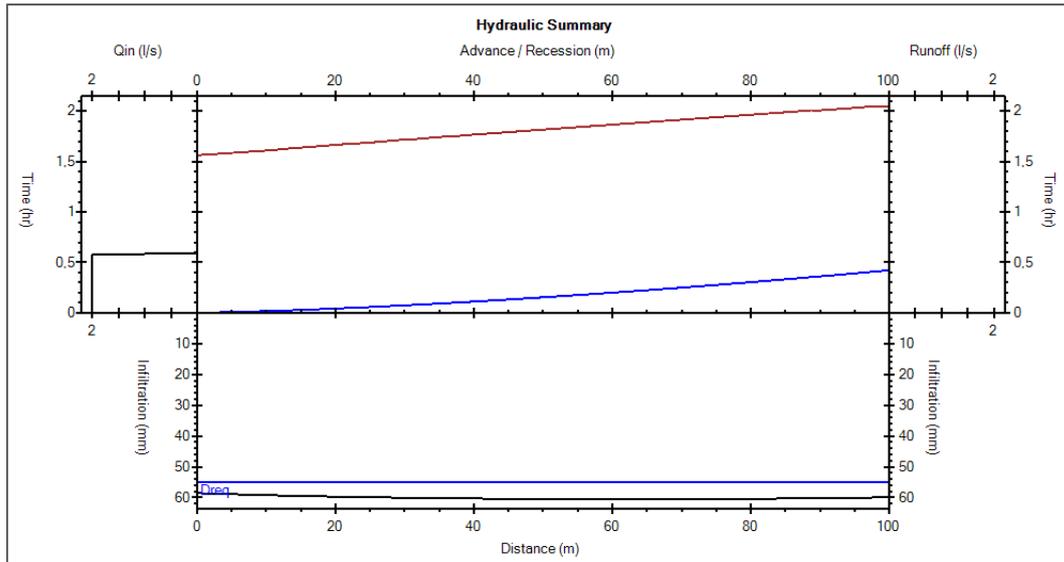


Figura 9: Simulación con WinSRFR de los tiempos de avance y receso.

4.3. Análisis estadístico

El modelo estadístico propuesto consideró como variable respuesta a cada una de las eficiencias que caracterizan un riego, al rendimiento del cultivo y a la eficiencia de uso del agua, como criterios de clasificación a las técnicas de riego (RST, RSA, RSAD, RSP), las frecuencias de riego (AF, BF) y los bloques en donde se realizaron los ensayos.

$$y_{ijk} = \mu + t_i + f_j + (tf)_{ij} + b_{k(j)} + e_{ijk}$$

Donde y_{ijk} es la respuesta observada (eficiencias y rendimiento), μ media, t_i efecto del i -ésima técnica, f_j efecto de la j -ésima frecuencia, $(mf)_{ij}$ corresponde a la interacción de técnica con frecuencia, $b_{k(j)}$ k -ésimo bloque y e_{ijk} corresponde a los errores.

Según la naturaleza de las variables y los objetivos del estudio, se abordaron los siguientes análisis estadísticos con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2018):

Los resultados de rendimiento en grano, lámina objetivo por riego, eficiencia en el uso del agua, productividad del agua obtenidos fueron sometidos a análisis de la varianza (ANOVA). Para determinar diferencias entre medias se utilizó DGC con nivel de riesgo α del 5 %.

Se realizó un análisis multivariado de componentes principales (ACP) para identificar las variables de interés (eficiencia de aplicación y almacenamiento, eficiencia en el uso del agua en kg.m^3 , porcentaje de percolación y de uniformidad de distribución, coeficiente de adecuación y rendimiento en kg.ha^{-1}). Los datos fueron estandarizados dado que las unidades de medida y las varianzas de las variables son diferentes. Se evaluó la relación entre las variables de interés a través de los coeficientes de correlación lineal de Pearson.

Se aplicaron técnicas de estadística descriptiva y de modelación para responder a las preguntas de investigación: efecto de las técnicas y frecuencias de riego, y de la interacción de ambos factores sobre las variables de desempeño de riego a lo largo de un ciclo de cultivo, mediante la aplicación de modelos generales y mixtos (MGM). Para la estimación de MGM a través de los procedimientos en R, se evaluó el efecto de los factores fijos: “Bloque”, “Frecuencia”, “Técnica” y sus interacciones, y se estableció como factor aleatorio la Unidad Experimental. Se evaluaron los modelos con la secuencia de riegos como ordenamiento temporal y se consideró al método de máxima verosimilitud restringida (REML) para la estimación de componentes de varianza. En la selección de modelos se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información Bayesiano (BIC) solo se usó para casos con el mismo valor de AIC, siendo el mejor modelo aquel que presente el menor valor. Para determinar diferencias entre medias se utilizó DGC con nivel de riesgo α del 5 %.

4.4. Seguimiento de la humedad en el suelo

Se trabajó con mediciones directas del contenido de agua en el suelo por gravimetría y otros métodos indirectos como: sonda “Diviner 2000R” (Frequency Domain Reflectometry), sensores de matriz granular Watermark y sonda electromagnética EM38- mk2 que mide conductividad eléctrica aparente.

Las mediciones in situ del contenido de humedad del suelo implican un importante esfuerzo técnico y económico. Estas mediciones pueden ser a campo o en laboratorio. En el primer caso, se extraen muestras del terreno, a la profundidad de interés, y en laboratorio se mide la cantidad de agua contenida por unidad de volumen de suelo. Tienen la ventaja de ser precisas, pueden realizarse en ensayos controlados, pero son inviables para realizar un seguimiento de la humedad a tiempo real y en áreas extensas. Las mediciones a campo a través de sensores tienen como principales ventajas que se puede medir el contenido de humedad en forma continua en algunos casos o a intervalos adecuados para un monitoreo constante. (Basualdo *et al.* 2016)

4.4.1. Método directo gravimétrico

Antes y 48 a 72 horas después de cada evento de riego se tomaron muestras mediante barreno y pesafiltros en tres sitios por replica: cabecera, medio y pie o final de surco, y a tres profundidades (0-30, 30-60, 60-90 cm). Luego se secaron en estufa a 105 °C hasta alcanzar un peso constante. El contenido de humedad se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\%W = \frac{PH-PS}{PS} = \left[\frac{PH}{PS} - 1 * 100 \right] \text{ (Ecuación 2)}$$

%PH: Peso del suelo húmedo.

%PS: Peso del suelo seco.

W%: porcentaje de humedad con base en el peso seco del suelo.

4.4.2. Método indirecto con bloques de resistencia

Los sensores Watermark AM400 se basan en la medida de la variación de las propiedades eléctricas de un medio poroso, por efecto del contenido de humedad. La resistencia al pasaje de flujo eléctrico se incrementa cuando decrece el contenido de humedad y viceversa. El agua del suelo y el agua del bloque se equilibran a la misma succión. (Enciso, *et al.*, 2007)

Para la instalación en el campo de los sensores, los mismos se saturaron con agua durante 24 horas a fin de controlar que su registro sea el adecuado, 0 cbar en saturación. Los sensores se instalaron en el RST, en ambas frecuencias (AF, BF), en dos posiciones en el surco (cabecera y pie) y a dos profundidades en el perfil de suelo (30 y 60 cm). Se registraron los valores de tensión antes y después de cada evento de riego.



Figura 10: Medición con los sensores Watermark

4.4.3. Método indirecto a través de la constante dieléctrica.

Se realizó el seguimiento de la humedad del suelo por medio de una sonda de capacitancia FDR (Frequency Domain Reflectometry. Sonda “Diviner 2000R” Sentek Pty. Ltd., Stepney, Australia). La sonda de capacitancia (FDR) se basa en la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio (ϵ), usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias a través de capacitores y osciladores de frecuencia variable (Ferré & Topp, 2002)

Los sitios elegidos fueron los mismos que con el sensor Watermark, en el RST, en ambas frecuencias (AF, BF) y en dos posiciones en el surco (cabecera y pie). Se enterraron tubos de PVC para el acceso de la sonda y para lograr un óptimo contacto se preparó una pasta de barro con la que se llenó el pozo previo a la introducción de los tubos.



Figura 11: Descripción del proceso de instalación a través de imágenes representativas, y medición con sonda Diviner.

Antes y después de cada evento de riego se recolectaron las lecturas de humedad volumétrica en intervalos de 10 cm hasta la profundidad máxima definida de 80 cm.

Se utilizó la curva de calibración que por defecto viene de fábrica, siendo válida para un amplio intervalo de valores en distintos tipos de suelo y condiciones, siendo aplicable al presente estudio, ya que no se encontraron limitaciones por arenas gruesas, arcillas expansibles, altos contenidos en materia orgánica o suelos salinos (Starr & Paltineanu, 2002).

4.4.4. Método indirecto con sonda electromagnética

Se utilizó el sensor EM38-mk2 de la empresa Geonics Limited que a partir de la inducción electromagnética mide la conductividad aparente (CEa) en una columna de suelo hasta una profundidad de observación específica; proporciona datos de profundidad efectivos de 1,5 m y 0,75 m cuando se coloca en la orientación del dipolo vertical, y de 0,75 m y 0,375 m cuando la orientación del dipolo es horizontal.

La CEa está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo, tales como: textura, contenido de materia orgánica, humedad, capacidad de intercambio catiónico, densidad aparente, salinidad, pH, contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} , porcentaje sodio intercambiable, tipos de suelo, entre otras (Corwin y Lesch, 2005). La CEa se utiliza como método indirecto para estimar variaciones en el contenido de agua, ya que el agua es el principal factor de variación según Sudduth y colaboradores, 2001.

Con el fin de identificar variaciones en el contenido de agua durante el ciclo de cultivo de maíz 2016-2017, se midió la conductividad eléctrica aparente (CEa) con el dipolo vertical y un espaciamiento entre bobinas de 0,5 m, permitiendo un alcance de lectura de hasta 0,75 m de profundidad en el suelo. (Figura 12) El instrumento se calibró según las instrucciones del manual, se recorrió cada unidad experimental antes y después de cada evento de riego en dirección paralela a los surcos de siembra en transectas distanciadas a 4 m. (Figura 12)



Figura 12: Medición con la sonda EM38-mk2.

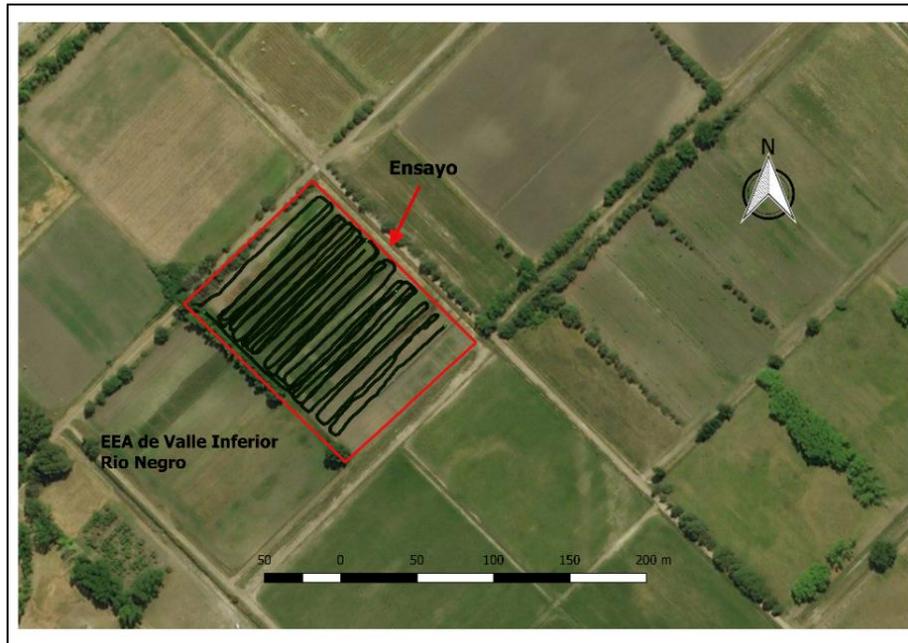


Figura 13: Transectas paralelas a los surcos de riego realizadas con la sonda EM38-mk2.

El valor promedio de CEa se determinó dentro de un diámetro de 10 metros con la herramienta «Buffer» de QGIS 3.4 alrededor de los puntos de muestreo de gravimetría, que corresponden a cabecera/inicio, medio y pie/fin de surco. Con el objetivo de observar de manera exploratoria variaciones en la CEa en situaciones previas y posteriores a un evento de riego, se evaluó la relación entre el contenido de agua (%) medido por gravimetría con los valores de CEa medidos con la sonda.

4.5. Evaluaciones de riego

Como variables del sistema de riego se determinó: lámina de reposición por riego (LRR), velocidad de avance, pendiente del terreno (S), infiltración y geometría de surcos. Las variables de manejo fueron: caudal unitario (qu), tiempo de aplicación o corte (Tap), y longitud de la unidad de riego (L).

Todas las láminas de riego se determinaron a través del software WinSRFR y con hojas de cálculo en Microsoft Excel siguiendo la metodología que se detalla en el punto 4.5.2.

4.5.1. Caracterización de los riegos

- Medición de la pendiente longitudinal parcial y total de cada unidad experimental del riego con un nivel óptico. Se realizó una lectura cada 10 metros posicionándonos en el surco central de cada unidad experimental.

- Densidad aparente (dap) en 3 sitios: cabecera, medio y pie, y en tres profundidades (0-30, 30-60, 60-90). Se realizó por única vez previo a realizarse el primer riego a través del método del cilindro, consistió en introducir un cilindro biselado de volumen conocido en el suelo, enrasando el suelo con los bordes, secar la muestra en estufa a 105° C hasta peso constante.
- Aforo, medida del caudal erogado por las boquillas de riego. Se efectuó tres veces durante cada evento de riego, se tomó la compuerta del surco central de cada unidad experimental. Se utilizó recipiente graduado y cronómetro para el procedimiento.
- Tiempo de avance y receso del frente de agua: Se dividió la longitud total de cada repetición en diez partes de igual longitud y en cada una de ellas se colocó una estaca de madera, indicando cada estación de avance y receso. En RPS se hicieron mediciones dobles, se registró en cada unidad de riego o paño de avance.
- Número de surcos regados simultáneamente en cada evento de riego.
- Tiempo de aplicación: el tiempo de corte se estableció cuando la mitad de los surcos regados llegaron al pie del surco.
- Dimensiones de la parcela, se midieron con cinta métrica, largo y espaciamiento entre surcos.
- Perfil transversal de surcos de riego: para conocer la geometría de los surcos se utilizó el método del perfilómetro, Walker y Skogerboe (1987). Se registraron tres perfiles transversales en surcos en cabecera, medio y pie.
- Velocidad de infiltración: Con el método del infiltrómetro de doble anillo o anillo de Muntz (Grassi, 1998). Se midió la velocidad de infiltración en cabecera, medio y pie de surco. La ecuación de infiltración de Kostiakov fue ajustada como muestra la Ecuación 3.

(1) Perímetro mojado (PM) y el espaciamiento entre surcos (ES).

(2) Cociente entre lámina infiltrada, que al tener surcos bloqueados al final es igual a la aplicada (L bruta) y la infiltración acumulada (Icum).

$$Icum = \int_0^t A * t^B$$

$$Icum aj = \int_0^t A * \frac{PM}{ES} * \frac{L bruta}{Icum} t^B \quad (\text{Ecuación 3})$$

En donde I, es la velocidad de infiltración expresada en (mm. m⁻¹ o mm. h⁻¹), t es el tiempo de oportunidad (minuto u hora), mientras que A es un coeficiente que representa la velocidad de infiltración y B es un exponente sin dimensiones.



Figura 14: Medición de la infiltración con el método del infiltrómetro tipo doble anillo.

4.5.2. Determinación de láminas de interés

1) *Lámina objetivo o requerida (LRR)*: Con las frecuencias determinadas en la programación del riego (punto 4.2.1), se determinó la LRR para el ciclo 2016-2017 bajo dos metodologías:

Método gravimétrico con modificaciones: Siguiendo la metodología de Grassi (1998) se agregó al cálculo gravimétrico, los milímetros evapotranspirados y la precipitación efectiva entre el evento de riego y el muestreo para registrar capacidad de campo. Los milímetros de evapotranspiración y de precipitación se asignaron según el siguiente criterio de exploración radicular: 46% para la profundidad radicular de 0-30 cm, 34% para 30-60 cm y 20% para 60-90 cm. (Villalobos González *et al.*, 2018; Maturano, 2002; Grassi, 1998)

$$LRR = \sum_{90}^0 \frac{(\%Hcc - \%Ha)}{100} * P * \frac{DAp}{DA} + \sum_a^0 Etc - P ef \text{ (Ecuación 4)}$$

LRR: Lámina requerida u objetivo.

Hcc: Humedad posterior al riego. (%)

Ha: Humedad previo al riego. (%)

P: profundidad de enraizamiento. (mm)

Dap: densidad aparente. (g.cm⁻³)
DA: densidad del agua. (g.cm⁻³)
ETc: Evapotranspiración del cultivo diaria. (mm)
d: Días transcurridos
Pef: precipitación efectiva. (mm)

La precipitación efectiva se calculó con la siguiente ecuación, según la configuración de FAO para precipitaciones mensuales menores a 70 mm, P es la precipitación real:

$$P_{ef} = 0.6 * P - 10 \text{ (Ecuación 5)}$$

Método Suma de ETc: Se abordó como la suma de la evapotranspiración del cultivo entre eventos de riego a través del software Cropwat, ingresando los valores de temperatura media, máxima y mínima (°C), insolación (horas), porcentaje de humedad (%), viento a 2 metros (mseg⁻¹) y precipitación efectiva, para el ciclo 2016-2017 en estudio.

2) *Lámina bruta (LBR)*: Lámina bruta por riego, expresada como el cociente entre el volumen de agua que ingresa y las dimensiones de la parcela. Siendo (Qu) caudal unitario en litros por segundo, (t) tiempo de riego en segundos (nº) número de surcos intervinientes, (L) longitud de surcos en metros y (Es) espaciamiento entre surcos en metros.

$$db = \frac{Qu * t * n^{\circ}}{L * Es * n^{\circ}} \text{ (Ecuación 6)}$$

Se determinó la lámina bruta total promedio (LBT) que incluye la suma de todos los riegos.

3) *Lámina infiltrada*: Se entiende como igual a la lámina bruta que ingresa, ya que la pendiente de los surcos es baja y están sin desagüe.

4) *Lámina almacenada en el perfil del suelo explorado por las raíces del cultivo (dal)*: Diferencia entre la lámina infiltrada en el perfil del suelo y la lámina de reposición o requerida.

5) *Lámina percolada por debajo de la rizósfera (dper)*: Diferencia entre la lámina infiltrada y la lámina almacenada en la profundidad radical del cultivo.

4.5.3. Cálculo de eficiencias de riego

Las evaluaciones del desempeño de riego juegan un papel fundamental para la optimización del mismo, brindan conocimiento para la mejora del diseño, como así también proveen de información básica a las instituciones responsables en la administración del recurso hídrico, para la gestión integrada del recurso. (Morábito, 2003)

Con los datos obtenidos y las láminas calculadas, se evaluó el desempeño actual a través de planillas de Excel con la metodología de Chambouleyron y Morábito (1982) y con el programa

WinSRFR versión 4.1 (Bautista *et al.*, 2012) en el módulo “Event análisis”. Para el análisis de las eficiencias actuales en función de cada factor se eliminaron aquellos casos donde se registró que almacenaron en su perfil menos del 80% del volumen almacenable, con el fin de evitar sobreestimaciones en la EA.

Eficiencia de aplicación (EA) definida como el cociente entre el volumen de agua almacenado en el perfil de suelo y el volumen de agua, aplicado en la parcela. Evalúa las pérdidas de agua (Grassi 1998).

$$EA = \frac{\text{Volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen de agua aplicada}} * 100 \text{ (Ecuación 7)}$$

Eficiencia de almacenaje (EAL), relación entre la lámina almacenada en el perfil después del riego, respecto de la lámina necesaria que se esperaba almacenar. Expresa el grado de suficiencia del riego, evaluado en la capa de suelo que exploran las raíces.

$$EAL = \frac{\text{Volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen de agua requerida}} * 100 \text{ (Ecuación 8)}$$

Uniformidad de Distribución (UD) Merriam y Keller (1978) definida como la lámina media infiltrada en el cuarto más perjudicado respecto de la lámina media infiltrada en todo el perfil.

$$UD = \frac{\text{Lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado}}{\text{Lámina infiltrada promedio}} * 100 \text{ (Ecuación 9)}$$

La UD del agua en riego por surcos se ve afectada por componentes individuales como caudal y duración del riego, pendiente, aspereza del surco, sección transversal del surco, longitud del surco, diferentes grados de compactación debido a labranza y pisada de neumáticos, además de posibles diferencias fisicoquímicas del suelo. Por estos motivos en evaluaciones a campo es necesario realizar una descripción general y múltiples repeticiones. (Burt *et al.*, 1997).

Las variables eficiencia de aplicación (EA), eficiencia de almacenamiento (EAL) y uniformidad de distribución (UD) se clasificaron según Roscher, (1985) (Tabla 4)

Tabla 4: Clasificación de eficiencias de aplicación, uniformidad y almacenamiento.

Parámetro	Malo	Satisfactorio	Bueno
EA	< 60	60 - 75	> 75
EAL	< 80	80 - 90	> 90
UD	< 80	80 - 90	> 90

Percolación profunda (Pp), relación entre el volumen percolado por debajo del sistema radicular y el volumen total ingresado (Walker & Skogerboe, 1987).

Cociente de Adecuación (ADlq)/ Adecuación del cuarto más perjudicado: califica un evento de riego y asume que la lámina requerida (objetivo) es uniforme en toda la parcela a regar. (Bautista *et al.*, 2009) Estima si el riego ha sido insuficiente, adecuado o excesivo:

$$ADlq = \frac{\text{Lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado}}{\text{Lámina requerida u objetivo}} * 100 \text{ (Ecuación 10)}$$

Eficiencia de aplicación potencial (EA p), ocurre cuando la lámina media infiltrada y almacenada es coincidente con la lámina de reposición óptima.

Indica el grado de eficiencia de aplicación que puede alcanzar el método si el manejo es correcto, minimizando las pérdidas por percolación profunda. La estimación de eficiencias de riego potenciales se obtuvo con WinSRFR versión 4.1 (Bautista *et al.*, 2012) en el módulo “Operation analysis”. Este módulo permite determinar la mejor combinación entre caudal de manejo y tiempo de corte. La EAp se presenta como un abanico de posibilidades según la combinación de caudal y tiempo de riego, en donde se toma la mejor performance, la EAp mayor, pero sin superar el caudal unitario máximo no erosivo y con una UD mayor al 90%.

4.6. Mediciones en el cultivo

4.6.1. Manejo agronómico

El estudio se desarrolló durante el ciclo agrícola 2016/2017. El cultivo antecesor del lote en las últimas dos campañas fue el maíz. La parcela del ensayo se niveló con láser con pendiente de 0,05%.

Se utilizó el híbrido de Maíz (*Zea mays L.*) 3800 de KWS de ciclo intermedio con un requerimiento de 882 grados día para floración. Se aplicaron valores óptimos de fósforo y nitrógeno según el criterio de extracción de nutrientes del Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) (Ciampitti & Garcia, 2007), específicamente 75 kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico (11-52-0) en la línea de siembra y 350 ha⁻¹ de Urea (46-0-0), dividiendo la dosis en los estadios V4 (cuarta hoja desarrollada) y V8 (octava hoja desarrollada), según escala fenológica de Ritchie y Hanway (1982). La siembra se realizó mecánicamente el 16 de noviembre de 2016, con una densidad de 85.000 plantas ha⁻¹ (Figuras 15 y 16). El control de malezas se realizó el 19/12/2016 en postemergencia con Glifosato (sal potásica de Roundup Full II a 66,2 g) con una dosis de 3 L.ha⁻¹.



Figura 15: Siembra mecánica de maíz con formación de surco.



Figura 16: Siembra mecánica de maíz con incorporación de fósforo.

4.6.2. Registro fenológico

Las distintas fases y etapas del ciclo de desarrollo se determinaron siguiendo la escala de Ritchie y Hanway (1982). El criterio que se consideró para fijar un estadio fue cuando el 50 % de las plantas estaba en esa fase. Las fechas en que se fijaron las distintas fases se han referido al número de días transcurridos desde siembra y el tiempo térmico (TT) acumulado (Andrade *et al.*, 1996). Se utilizó una temperatura base de crecimiento de 8° C. El cálculo de TT se basó en la siguiente ecuación:

$$TT: \sum n (T_{med} - T_b) \text{ (Ecuación 11)}$$

Dónde; TT= tiempo térmico expresado en ° C; Tmed, temperatura media del aire expresada en

°C; T_b temperatura base de desarrollo, expresada en °C; y n : número de días considerados en la sumatoria (Σ). Las fases observadas fueron: emergencia (E); seis hojas (V6); floración (R1); madurez fisiológica del grano (R6).

La altura de planta se registró mediante una regla durante en dos momentos, en V10 el 20/01/2017, y R1 el 21/02/2017, las mediciones se hicieron cada 10 metros a lo largo del surco,

4.6.3. Componentes del rendimiento

El muestreo se realizó el 28/04/2017 cuando la humedad de grano promedio fue del 30 %, se cosecharon en R6 todas las espigas en forma manual sobre los dos surcos centrales de cada unidad experimental de 4,2 m² (3 m de largo x 1,4 m de ancho) en tres posiciones dentro del surco: inicio, intermedio y fin.

Se contó por muestra el número de plantas y espigas, las plantas fueron cortadas al ras del suelo y separadas en: hojas + tallo (incluidas las vainas foliares), brácteas, pedúnculo de la espiga y grano.

El 03/08/2017 se realizó un segundo muestreo, solo se cosecharon las espigas en forma manual sobre los dos surcos centrales de cada repetición en una superficie de 10 m². Se contó el número de plantas y de espigas en cada muestra, utilizándose una trilladora estacionaria para desgranar las mazorcas. Los granos se colocaron en estufa a 65° C hasta peso constante. La determinación del peso individual de los granos se basó en una muestra de 1000 granos. Se estimó el número de granos por m² en base al peso unitario del grano y el rendimiento ajustándose a un contenido de un 14 % de humedad.

4.6.4. Eficiencia de uso del agua

La eficiencia del uso del agua (EUA), es la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como el rendimiento en granos, y el consumo hídrico expresado como el agua aplicada al sistema (Caviglia *et al.*, 2004). Mientras que Productividad del agua (PA), es un parámetro de eficacia del proceso de producción del cultivo por unidad de agua consumida, donde el agua (así como otros insumos) está sujeta a un proceso de transformación, en contraste con EUA en donde se relaciona directamente con los parámetros de eficiencia del riego. La productividad de agua y la eficiencia de uso del agua se calcularon a través de los cocientes (Van Halsema & Vincent, 2012):

$$PA = \text{rendimiento} / (\text{agua consumida} = \text{evapotranspirada}) \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$$

$$EUA = \text{rendimiento} / \text{agua aplicada (kg.m}^{-3}\text{)}$$

Los indicadores se calcularon para los 8 tratamientos conformados por ambos factores, las diferentes frecuencias de riego (AF, alta frecuencia o riegos cada 10 días y BF, baja frecuencia o riegos cada 16 días) y técnicas de manejo propuestas: RSA, RSAD, RSP y RST.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados que se presentan a continuación se analizaron a partir de 216 riegos, finalmente sólo se consideraron 144 eventos que pertenecen a los bloques 1 y 2, descartando el bloque 3 por fallas en el control de la vegetación espontánea en comparación al resto de los bloques.

5.1. *Lámina de reposición*

La lámina de reposición u objetivo para el periodo bajo estudio 2016-2017, se calculó por la suma de evapotranspiración diaria y diferencias gravimétricas en el suelo, entre eventos de riego. El requerimiento hídrico para un cultivo de maíz de 125 días en el valle Inferior del río Negro fue de 648 mm, sin hallarse diferencias significativas entre métodos de estimación (suma de evapotranspiración diaria y gravimetría) ($p= 0,1314$). Otros estudios en la latitud 40° estimaron requerimientos entre 600 y 680 mm (Reinoso, 2014), en el Valle Bonaerense del río Colorado destacan requerimientos similares de 670 mm (Sánchez, 2013), entre la latitud 20° y 30° se hayan valores de 700 mm (Morábito *et al.*, 2015). Doorenbos y Pruitt (1984) mencionan que el maíz evapotranspira entre 400 y 700 mm en su ciclo, según condiciones ambientales y genéticas.

Los riegos de AF se completaron en 105 días con 11 riegos desde el 24/11/2016 al 9/03/2017; para BF se completaron en 100 días con 7 riegos desde el 25/11/2016 al 4/03/2017.

Se encontraron diferencias significativas en Lámina Requerida promedio por riego (LRR) para el factor frecuencia de riego ($p<0,0001$), sin encontrarse diferencias en la Lámina Requerida total (LRT) ($p= 0,1614$). El factor técnica de riego no presentó diferencias estadísticas en LRT ($p=0,7399$) y en LRR ($p=0,3755$).

Tabla 4: Medidas de resumen para láminas de reposición promedio bajo ambos métodos de cálculo: suma de evapotranspiración diaria y diferencias gravimétricas.

Método	n	Media LRT	Media LRR
Σ ETc	2	669 a	74 \pm 28 a
Gravimetría	144	619 \pm 80 a	70 \pm 24 a
Ambos	146	648 \pm 30	72 \pm 26

Variables analizadas: Lámina de reposición total (LRT) en mm. (LRR) y Lámina de reposición promedio por riego en mm. (LRR)

*Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p\leq 0,05$).

Tabla 5: Medidas de resumen para láminas de reposición promedio bajo dos frecuencias de riego y diferentes métodos de cálculo.

Método	LRR	n	Media	Min	Max	Q1	Q3
Σ ETc	AF	11	60 ±15 a	34	85	50	75
Σ ETc	BF	7	95 ±33 b	36	128	66	120
Σ ETc	General	18	74 ±29	34	128	56	96
Gravimetría	AF	396	62 ±19 a	38	130	49	64
Gravimetría	BF	252	84 ±27 b	49	129	60	111
Gravimetría	General	648	70 ±24	38	130	52	81

Variable analizada: Lámina de reposición promedio por riego en mm. (LRR)

*Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$. Q1 y Q3: cuartil primero y tercero, valores por debajo de los cuales quedan el 25 y 75% de los datos respectivamente.

5.1.1. Método balance de agua simplificado (suma de evapotranspiración diaria)

La ETo varía en función de múltiples variables combinadas (localización, temperatura, insolación, humedad y viento), para el período de estudio, 2016-2017, la ETc promedio fue de $5,3 \pm 2,2 \text{ mm.día}^{-1}$, con un máximo de $8,5 \text{ mm.día}^{-1}$ y un mínimo de $1,5 \text{ mm.día}^{-1}$ (Figura 17).

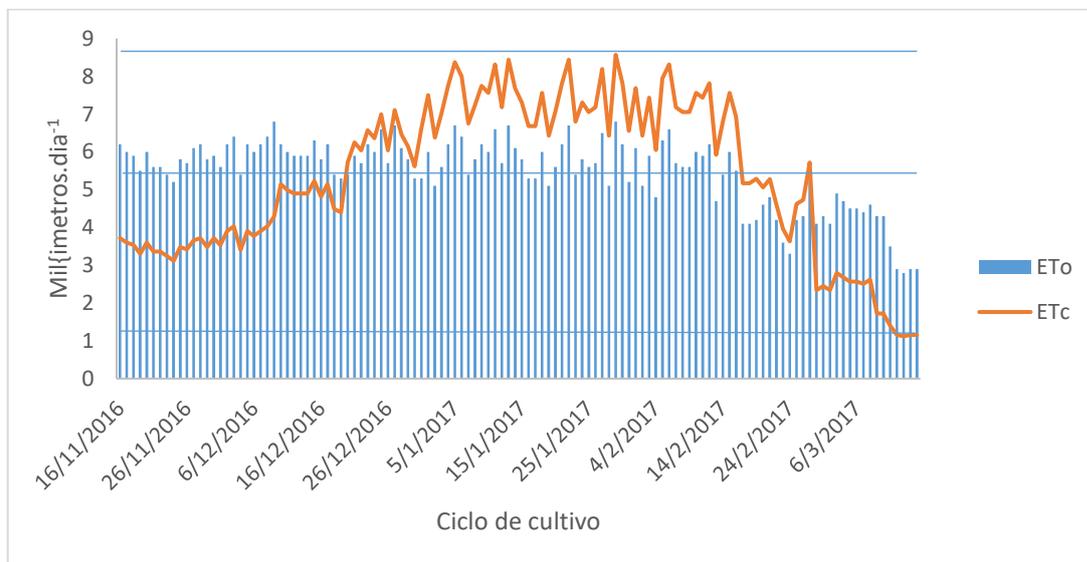


Figura 17: Estimación de ETo y ETc diaria calculada con Cropwat a través de los valores diarios obtenidos de la estación meteorológica del valle Inferior de Rio Negro en 2016 y 2017.

La lámina de reposición por riego (LRR) promedio se presenta en la Tabla 6, mostrando una lámina de 60 mm para AF y de 95 mm para BF.

Tabla 6: Comparación de láminas requeridas según suma de evapotranspiración durante la temporada 2016-2017 para las dos frecuencias de riego, AF y BF.

Nº AF	fechas	Días	PP	Pef	LRR	LRR acum
siembra	16/11/2016	0				
1	24/11/2016	8			34	34
	26/11/2016		25	8		
	04/12/2016		30	5		
2	14/12/2016	20			75	109
3	27/12/2016	13			85	194
4	05/01/2017	9			73	267
5	13/01/2017	8			62	329
6	20/01/2017	7			61	389
7	27/01/2017	7			57	446
	04/02/2017		16	0		
	08/02/2017		13	0		
8	08/02/2017	12			78	525
9	16/02/2017	8			56	581
10	24/02/2017	8			50	631
11	09/03/2017	13			38	669
	20/03/2017	Madurez fisiológica			13	682
	Promedio ± DE	10 ± 4			60	
	TOTAL Σ_{11}^0			13	669	
Nº BF	Fechas	Días	PP	Pef	LRR	LRR acum
siembra	16/11/2016	0				
1	25/11/2016	9			36	36
	26/11/2016		25	8		
	04/12/2016		30	5		
2	13/12/2016	18			67	103
3	28/12/2016	15			99	202
4	12/01/2017	15			119	322
5	26/01/2017	14			117	438
	04/02/2017		16	0		
	08/02/2017		13	0		
6	14/02/2017	19			128	567
7	04/03/2017	18			92	659
	20/03/2017	Madurez fisiológica			23	682
	Promedio ± DE	16 ± 3			95	
	TOTAL Σ_7^0			13	669	

*ETc calculada con el software Cropwat (FAO, 2009) a partir de los datos la estación meteorológica de Valle Inferior durante 2016-2017. En donde: LRR acum: Lámina requerida por riego acumulada (mm), Días: días transcurridos entre riegos, PP: Precipitación en mm, Pef: Precipitación efectiva en mm, Nº: secuencia de riegos.

5.1.2. Método gravimétrico

La lámina de reposición por riego (LRR) calculada por gravimetría y ajustada según la evapotranspiración y precipitación si hubiere, entre el evento de riego y el momento de muestreo para registrar capacidad de campo, se presenta en la tabla 5 e individualmente por riego en la tabla 7, mostrando una lámina promedio de 62 mm para AF y de 84 mm para BF.

Tabla 7: Comparación de láminas requeridas según gravimetría durante la temporada 2016-2017 para las dos frecuencias de riego, AF y BF.

AF								
Distribución de los milímetros de ETc en la profundidad de suelo								
N° Riegos	ETc aj	d	0-30	30-60	60-90	D	Pef	LRR
1	11,2	4	5,1	3,8	2,2	8		60
2	5,1	1	2,3	1,7	1,0	20	13	47
3	15,9	2	7,3	5,4	3,2	13		112
4	26,4	3	12,1	9,0	5,3	9		64
5	26,5	3	12,2	9,0	5,3	8		57
6	14,6	2	6,7	5,0	2,9	7		47
7	14,5	2	6,7	4,9	2,9	7		52
8	21,2	3	9,7	7,2	4,2	12		57
9	21,5	3	9,9	7,3	4,3	8		58
10	21,0	4	9,7	7,1	4,2	8		53
11	9,1	4	4,2	3,1	1,8	13		70
Hasta Madurez fisiológica								13
TOTAL \sum_{11}^0								665
BF								
Distribución de los milímetros de ETc en la profundidad de suelo								
N° Riegos	ETc aj	d	0-30	30-60	60-90	D	Pef	LRR
1	7,4	3	3,4	2,5	1,5	9		60
2	5,1	1	2,3	1,7	1,0	18	13	53
3	15,7	2	7,2	5,3	3,1	15		107
4	34,0	4	15,6	11,6	6,8	15		86
5	24,7	3	11,4	8,4	4,9	14		75
6	15,0	2	6,9	5,1	3,0	19		80
7	10,8	5	5,0	3,7	2,2	18		111
Hasta Madurez fisiológica								23
TOTAL \sum_{7}^0								608

*Siendo: ETc aj: evapotranspiración acumulada entre el evento de riego y el muestreo para registrar capacidad de campo (mm), d: días entre evento de riego y muestreo, D: días entre eventos de riego, Pef: Precipitación efectiva en mm, AF: alta frecuencia y BF baja frecuencia.

5.2. Lámina de riego

5.2.1. Lámina bruta

La lámina bruta total promedio (LBT) fue de 1116 ± 368 mm, existieron diferencias estadísticas en función de la frecuencia de riego ($p=0,0138$) y de la técnica de riego ($p<0,0001$). En AF se aplicó un promedio de 1202 mm y en BF 1030 mm. La diferencia en milímetros de LBT entre frecuencias está en el orden de 170 mm y representa una diferencia de 15% (Figura 18 y 19).

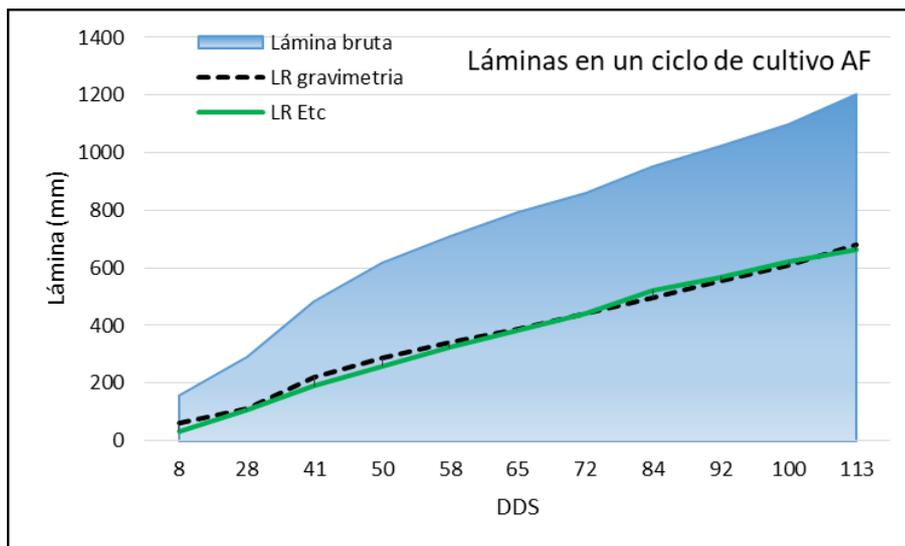


Figura 18: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en AF, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).

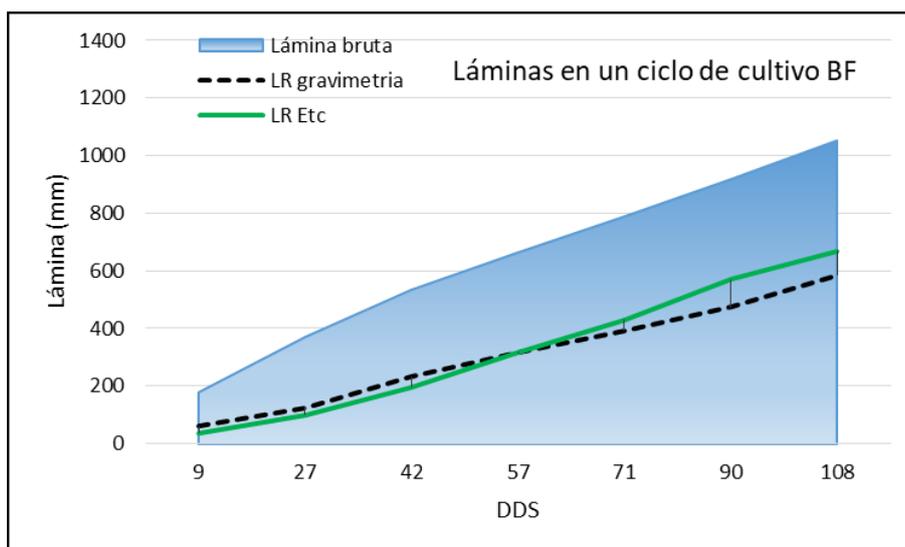


Figura 19: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en BF, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).

En función de las técnicas de riego bajo las condiciones del estudio, el RSP aplicó la mayor LBT: 1656 mm y el RSA la menor: 819 mm, los RSAD y RST presentaron valores intermedios: 1017 y 1070 mm, respectivamente. Para el RSA (Figura 20 y 21) la diferencia entre lámina aplicada (819 mm) y requerida (648 mm) estuvo en el orden de 171 mm, en promedio percoló un 20 % e implicó una reducción en los milímetros aplicados con respecto al resto de 29 %. Específicamente el RSA disminuyó el porcentaje de agua aplicada en un 16% con respecto al RSAD, 19% con el RST y 42% en comparación al RST.

Tabla 8: Láminas totales aplicadas durante el ciclo de cultivo según las técnicas de riego evaluadas.

Técnicas	Media (mm)	DE	Min	Max
RSP	1656 a	203	1421	1915
RST	1070 b	140	935	1261
RSAD	1017 b	87	934	1140
RSA	819 c	81	716	907

*Siendo la variable: Lámina bruta total aplicada durante el ciclo (mm) (LBT)

*DE: desvío estándar, letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $\leq 0,05$).

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

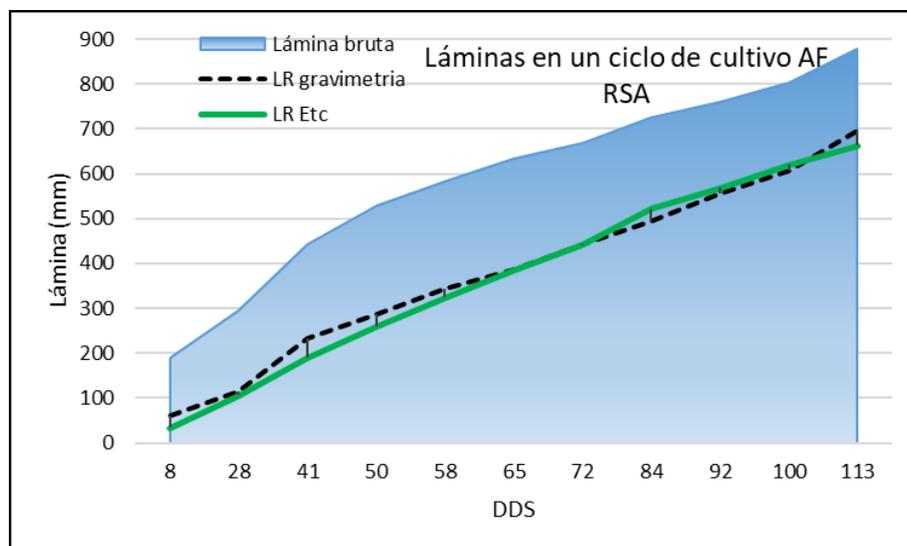


Figura 20: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en AF y RSA, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).

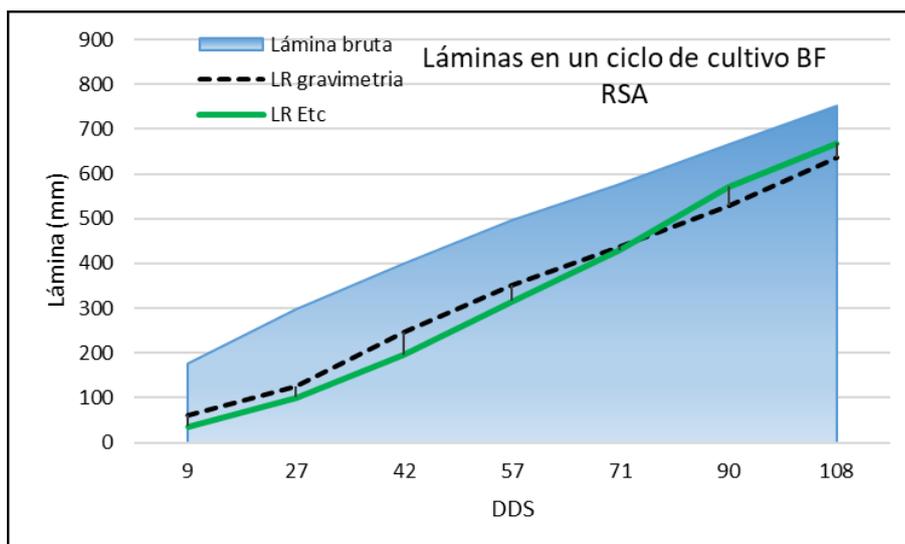


Figura 21: Estimación de lámina aplicada acumulada (Área) en BF y RSA, lámina requerida acumulada según suma de evapotranspiración (línea continua) y gravimetría (línea punteada), para una progresiva de días después de la siembra (DDS).

Respecto a la lámina aplicada por riego (LBR), el promedio de las evaluaciones resultó en 135 ± 60 mm, existió un efecto significativo para las técnicas de riego ($p < 0,0027$) y frecuencias de riego ($p < 0,0234$). La distribución y separación estadística de los tratamientos para LBR (Tabla 7), coincidió con la disposición de medias para LBT para AF y BF (Tabla 8 y 9). Presentó mayor preponderancia en ambas láminas, por riego y ciclo, el factor técnica de riego por sobre el factor frecuencia.

Tabla 9: Comparación de la lámina bruta aplicada por riego según técnicas y frecuencias de riego.

Técnicas	Media (mm)		DE	Min	Max
RSP	187	a	50	86	326
RST	126	b	44	45	211
RSAD	122	b	48	40	211
RSA	83	c	34	32	179
Frecuencia					
BF	147	a	54	32	267
AF	109	b	56	60	326

*Variable analizada: Lámina bruta promedio aplicada por riego (mm) (LBR).

*DE: Desvío estándar. R: Sucesión de riegos realizados.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

El RSA fue la alternativa que más se ajustó a la lámina requerida, aplicó un promedio de 70 mm para AF y 95 mm para BF. Otros estudios en el valle Bonaerense registraron láminas de riego de 84 mm (Sánchez, 2013) y mayores a 120 mm para riego por surco sin desagüe al pie en Mendoza (Morábito *et al.*, 2007; Schilardi, 2011).

Tabla 10: Secuencia de lámina bruta promedio aplicada en cada riego en AF según cuatro técnicas bajo estudio (RSA, RSAD, RST y RSP).

R	RSA	DE	RSAD	DE	RST	DE	RSP	DE
1	190	4	176	12	176	13	176	13
2	104	14	115	11	115	11	208	29
3	148	14	188	32	189	32	242	36
4	87	4	125	11	126	11	200	29
5	53	11	85	26	85	26	146	20
6	50	4	67	21	81	23	142	12
7	35	4	52	10	80	49	100	20
8	56	0	66	11	91	8	162	13
9	37	5	46	9	64	6	123	30
10	42	0	64	20	74	11	127	6
11	75	35	81	10	92	5	168	45
LBR	71		97		106		163	
LBT	878		1065		1168		1793	

*Variables analizadas: Lámina bruta total aplicada durante el ciclo (mm) (LBT), Lámina bruta promedio aplicada por riego (mm) (LBR).

*DE: Desvío estándar. R: Sucesión de riegos realizados.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

*Frecuencia: AF: periodo entre riegos de 10 días.

Tabla 11: Secuencia de lámina bruta promedio aplicada en cada riego en BF según cuatro técnicas bajo estudio (RSA, RSAD, RST y RSP).

R	RSA	DE	RSAD	DE	RST	DE	RSP	DE
1	184	2	177	6	173	6	176	6
2	120	84	187	30	187	30	275	73
3	103	6	149	7	167	1	232	6
4	97	3	109	33	103	41	224	46
5	81	2	110	32	110	1	204	34
6	89	13	110	8	110	8	210	4
7	86	4	128	5	120	8	197	2
LBR	95		138		139		217	
LBT	760		968		971		1518	

*Variables analizadas: Lámina bruta total aplicada durante el ciclo (mm) (LBT), Lámina bruta promedio aplicada por riego (mm) (LBR).

*DE: Desvío estándar. R: Sucesión de riegos realizados.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

*Frecuencia: BF: periodo entre riegos de 16 días.

5.2.2. Lámina infiltrada, almacenada y percolada

La siguiente ecuación representó la velocidad de infiltración básica para el estudio realizado en la parcela de ensayo. La misma se ajustó con los pares de datos provenientes de los ensayos a campo de infiltración.

$$I_{cum} = \int_0^t 1,79 * t^{-0,7194}$$

$$Ib = a * 60 * (-600 * b)^b = 1,29 * 60 * (-600 * -0,28)^{-0,28} \text{ (Ecuación 8)}$$

$$Ib = 18 \text{ mm/h}$$

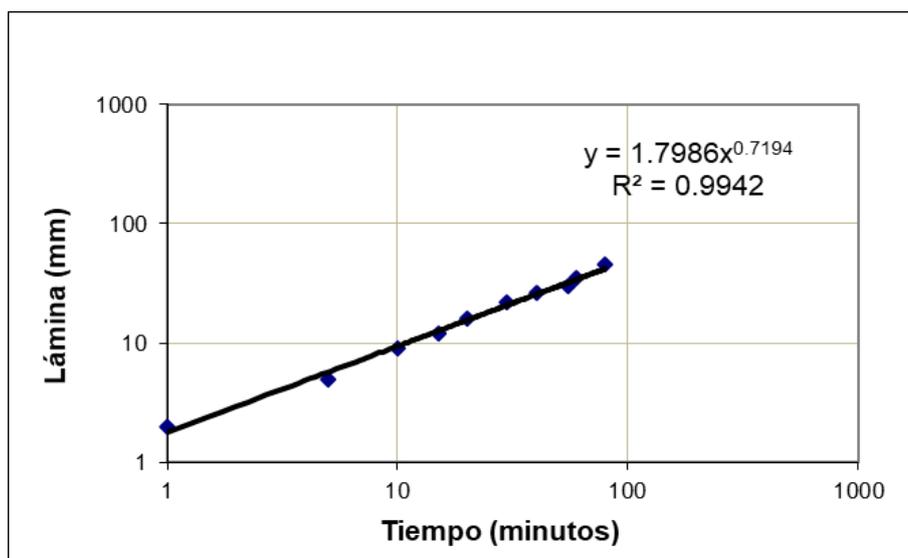


Figura 22: Curva de infiltración para el suelo en estudio suelo en el Valle Inferior del río Negro.

La ecuación de infiltración sigue la curva del índice 0,50 en la familia de infiltración de Kostiakov, correspondiente a una infiltración moderadamente lenta de un suelo franco limoso y el índice 0,45 de un suelo de textura limosa en la familia de curvas del SCS – USDA.

Otros estudios de variación de la infiltración en riego por surco demuestran que la infiltración puede verse muy influenciada por la compactación (Malmatile *et al.*, 2018; Bacigaluppo, *et al.*, 2017) y por la variabilidad a través de una temporada de riego (Childs *et al.*, 1993)

Se encontraron diferencias significativas en función de los factores: técnica ($p < 0,0043$) y frecuencia ($p < 0,0268$) de riego. La lámina infiltrada que presentó mayor variabilidad para AF, siendo el CV de 47%, mientras que BF presentó un CV de 24% (Figura 23). La lámina infiltrada promedio por tratamiento fue muy similar a la lámina aplicada, ya que no presentó desagüe al pie. Para el RSA el promedio de lámina infiltrada por evento fue de 80 mm, para RSAD fue de 113 mm, para RST fue de 118 mm y para RSP de 182 mm.

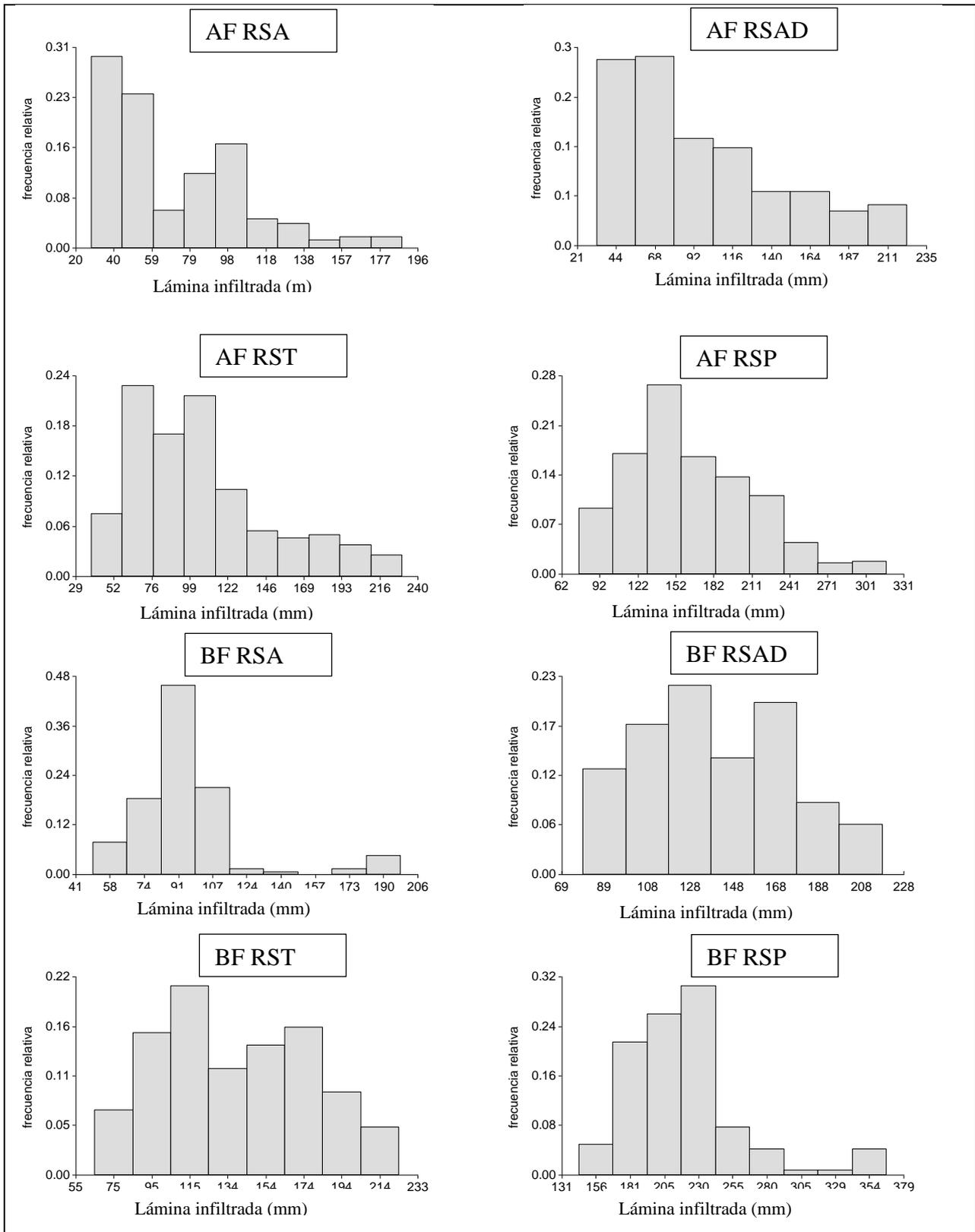


Figura 23: Histogramas con la frecuencia relativa para lámina infiltrada en riegos de baja frecuencia (promedio entre riegos 16 días) (BF) y alta frecuencia promedio entre riegos 10 días) (AF); para cuatro técnicas: RSA riego por surco Alterno, RSAD: riego por surco Alterno doble, RST: riego por surco tradicional y RSP: riego por surco por pulsos o discontinuo.

Respecto a la lámina almacenada, existieron diferencias significativas para el factor frecuencia ($p < 0,0074$), presentó un promedio de 54 mm para AF y para BF una mayor lámina almacenada, 80 mm. Para el factor técnica de riego no se observaron diferencias significativas ($p = 0,7821$). (Tabla 12)

Tabla 12: Comparación de la lámina media almacenada según las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

Técnicas	Media (mm)	DE	Min	Max
RSA	62	a	33	100
RST	64	a	33	120
RSAD	68	a	33	124
RSP	70	a	33	141

*Variable: Lámina almacenada promedio por riego. (mm) (L alm)

*DE: desvío estándar, letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$), entre láminas de reposición según frecuencia para cada método de cálculo.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

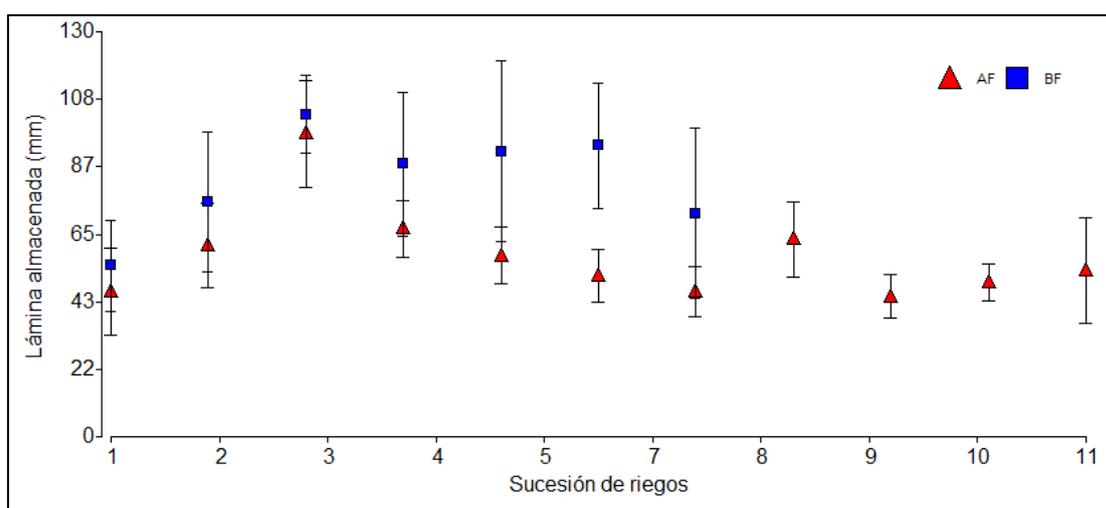


Figura 24: Estimación de lámina promedio almacenada con sus respectivos desvíos para AF y BF por evento de riego.

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días. BF: periodo entre riegos de 16 días.

La lámina percolada promedio por riego fue de 55 ± 43 mm, existieron diferencias significativas en función del factor técnica de riego ($p < 0,0208$), el RSP presentó el mayor valor de lámina percolada entre las técnicas evaluadas (Tabla 13). Para el factor frecuencia no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,4563$), el promedio de percolación para AF fue de 62 mm y de 75 mm para BF.

Tabla 13: Comparación de la lámina media percolada por riego según técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

Técnicas	Media (mm)		DE	Min	Max
RSP	123	a	45	30	262
RST	71	b	50	0	152
RSAD	58	b	51	0	150
RSA	23	c	30	0	115

*Variable: Lámina percolada promedio por riego. (mm) (L per)

*DE: desvío estándar, letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$), entre láminas de reposición según frecuencia para cada método de cálculo.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

5.3. Parámetros físicos y de manejo

5.3.1. Pendiente, geometría de surco y densidad aparente.

La pendiente longitudinal promedio del terreno fue de 0,036 % con un CV de 40%, el sentido de la pendiente fue descendente de norte a sur o de cabecera a pie de surco (Figura 25). No existieron diferencias significativas entre las pendientes promedio de las técnicas de riego ($p=0,8220$). Estas mediciones son coherentes con las condiciones pretendidas para el ensayo, en donde se niveló con láser a pendiente mínima para no influir en los tratamientos. A nivel de surco, entre las distancias de medición por estaca, se hallaron las siguientes pendientes en promedio (Tabla 14).

Tabla 14: Pendientes longitudinales promedio para el área de estudio.

Estaca	Distancia	S (m/m)
1	10	0,00016
2	20	0,00021
3	30	0,00025
4	40	0,00032
5	50	0,00034
6	60	0,00037
7	70	0,00043
8	80	0,00049
9	90	0,00051
10	100	0,00053

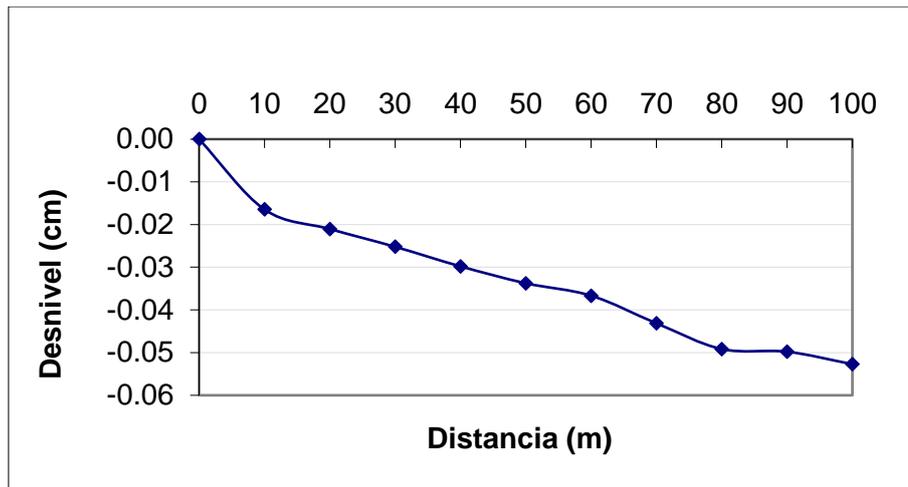


Figura 25: Pendiente promedio longitudinal del ensayo de riego en el valle Inferior de Rio Negro periodo 2016-2017 previamente nivelado con láser.

La geometría del surco obtuvo la siguiente sección transversal de surco promedio:

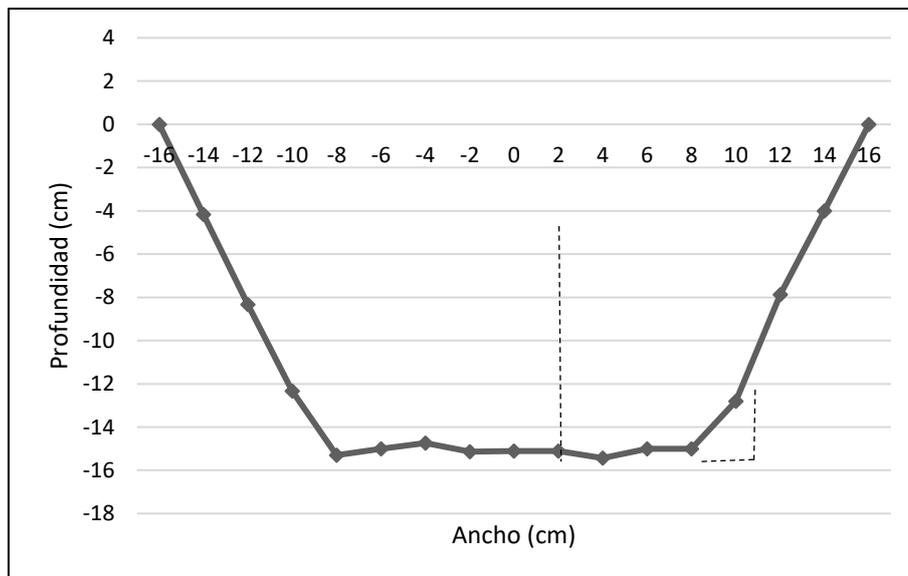


Figura 26: Sección transversal promedio del surco que caracteriza el estudio de técnicas y frecuencias de riego.

Mediante los datos relevados se caracterizó el surco con: ancho superior de 32 cm, ancho de fondo o inferior de 16 cm, tirante máximo de 15,5 cm, perímetro mojado de 46 cm y talud de 0,5. Según la caracterización realizada por parámetros físicos (Schilardi, 2011), los surcos estudiados fueron pequeños con un ancho superior < 40 cm, propios de cereales y/o algunos cultivos hortícolas.

Se registró una densidad aparente de $1,2 \pm 2 \text{ gcm}^{-3}$ en el inicio de la temporada de riego.

5.3.2. Caracterización: tiempos de riego, caudal unitario, tiempos de avance, receso y oportunidad.

El conjunto de riegos se caracterizó por tener un tiempo de aplicación (Tap) promedio de 77 ± 32 minutos en un rango de 22-182 minutos, el Tap mínimo correspondió al noveno riego realizado para AF en la técnica RSAD y el Tap máximo ocurrió en el segundo riego para BF en la técnica RSA.

El análisis estadístico de los datos de Tap mostró que existen diferencias significativas en el factor técnica ($p < 0,0405$), en donde se agruparon RSP y RSA, asociados a valores altos (> 86 minutos) y RSAD junto a RST a menores valores (< 64 minutos) (Tabla 15).

También existieron diferencias para el factor frecuencia, aunque con un p-valor mayor que para las técnicas de riego ($p < 0,0497$). Presentó un promedio de 70 ± 25 minutos para AF en un rango de 22-172 minutos, mientras que para BF el Tap promedio fue de 88 ± 25 minutos, entre 50-182 minutos.

Tabla 15: Tiempos de aplicación de riego promedio para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

Técnica	n	Media (minutos)		DE	Min	Max
RSP	36	98	a	28	48	166
RSA	36	86	a	39	36	182
RST	36	64	b	25	35	130
RSAD	36	60	b	27	22	130

*Variable: Tiempo de aplicación promedio por riego (minutos) (Tap).

*DE: desvío estándar, letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$).

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

Durante los eventos de riego se registró un valor promedio por boquilla en la manga de $2,07 \pm 0,35$ Ls^{-1} , no se encontraron diferencias significativas para los factores: técnica ($p = 0,9992$) y frecuencia de riego ($p = 0,3416$). La homogeneidad del caudal fue controlada para no influir con esta variable en los tratamientos. La estimación del caudal máximo no erosivo por Hamad & Stringham (1978) de $6,2$ Ls^{-1} en ningún riego fue superado, incluso en RSAD: $5,2$ $Ls^{-1} < QMNE$.

El caudal unitario utilizado estuvo dentro de los valores normales citados en bibliografía nacional e internacional (Salatino *et al.*, 1992; Morábito, 2003; Génova, 2014; Cuesta *et al.*, 2005; Playán *et al.*, 2005).

5.3.3. Avance, receso y tiempo oportunidad

El valor de avance promedio para el primer minuto de riego fue de 14 metros, producto de las 144 evaluaciones de riego durante el ciclo de cultivo. La ecuación de avance que representó al conjunto de evaluaciones de riego por surco surge de la curva de avance promedio de la Figura 27.

$$x = p * t^r = 14 x^{0,45} \text{ (Ecuación 12)}$$

x: distancia alcanzada por el frente de agua a tiempo t, (metros)

t: tiempo de avance (minutos)

p: coeficiente que representa el avance del agua en el primer minuto.

r: exponente empírico que toma valores menores a 1.

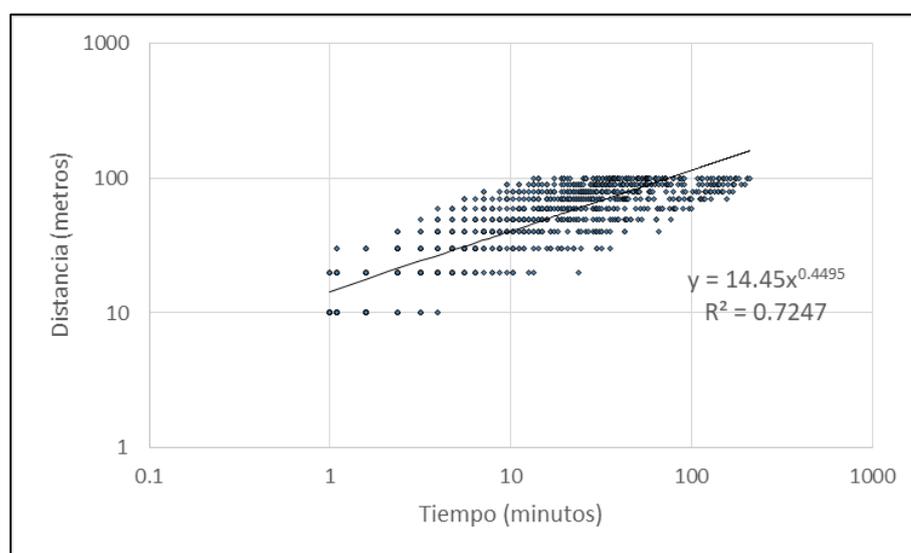


Figura 27: Distancias de avances promedio del frente de agua de riego por surco en el tiempo.

Los riegos AF se caracterizaron por tener una velocidad de avance promedio de 13 metros por minuto (Figura 28), mientras que BF presentó una menor velocidad 9 metros por minuto. (Figura 29). El RSAD se destacó con la mayor velocidad de avance, $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Esta característica es valiosa cuando se necesita aumentar la longitud de surco o realizar riegos con mayor velocidad, es decir con menos tiempos de aplicación.

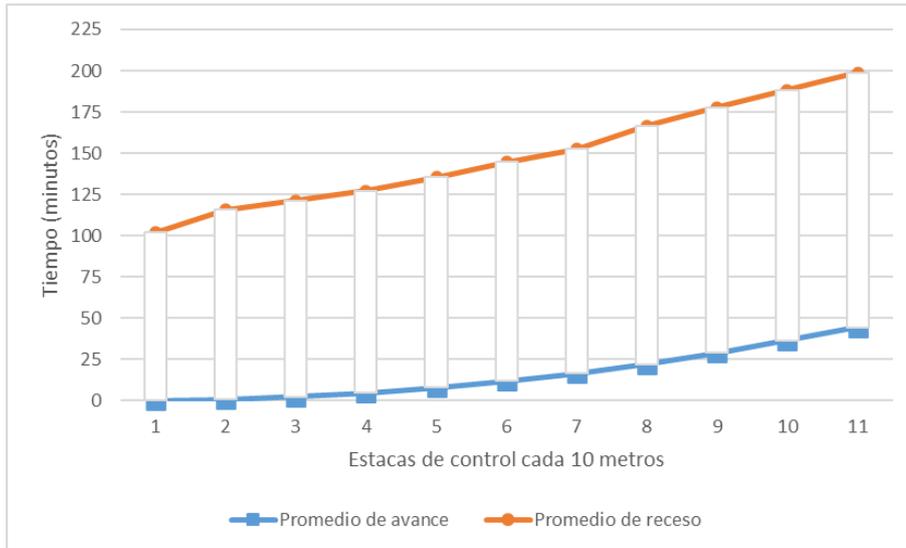


Figura 28: Curvas de avance y receso promedio para riego por surco en AF

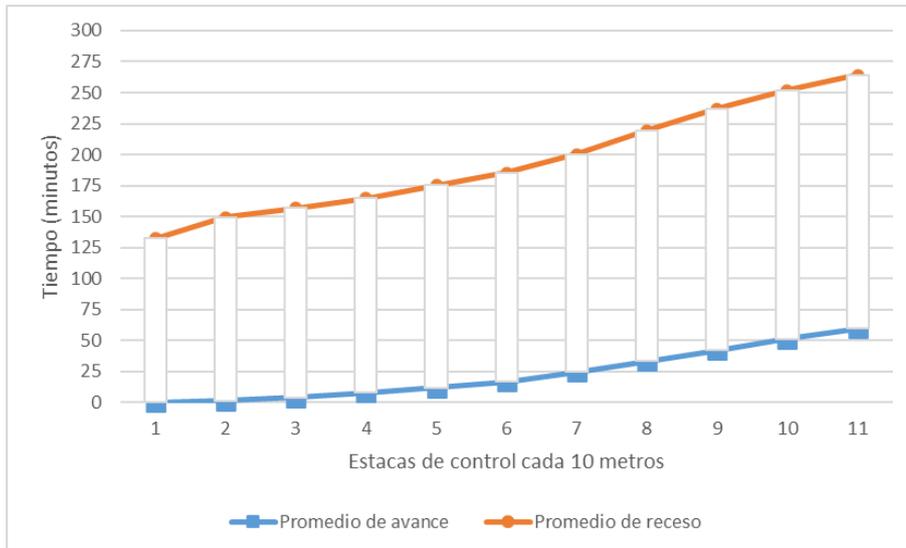


Figura 29: Curvas de avance y receso promedio para riego por surco en BF.

El coeficiente empírico que representa la distancia de avance del frente de agua en el primer minuto de riego (p) presentó diferencias estadísticas para el factor frecuencia ($p < 0,0004$) y para el factor técnica de riego ($p < 0,0033$), en donde el RSAD se separó del resto y mostró la mayor pendiente (Tabla 16 y Figura 30).

Tabla 16: Comparación de los componentes de la ecuación de avance del agua de riego para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

Técnica	n	p	r	R ²
RSP	72	10,89	a	0,52
RST	36	11,70	a	0,56
RSA	36	11,89	a	0,54
RSAD	36	14,47	b	0,57

*Siendo p: coeficiente empírico que representa la distancia que avanza el frente del agua en el primer minuto, r: exponente empírico que toma valores menores a 1. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$).

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

Los valores obtenidos del coeficiente “p” y del exponente “r”, muestran valores normales con aquellos mencionados en literatura nacional e internacional (Salatino *et al.*, 1992; Morábito, 2003; Cuesta *et al.*, 2005; Walker *et al.*, 2006).

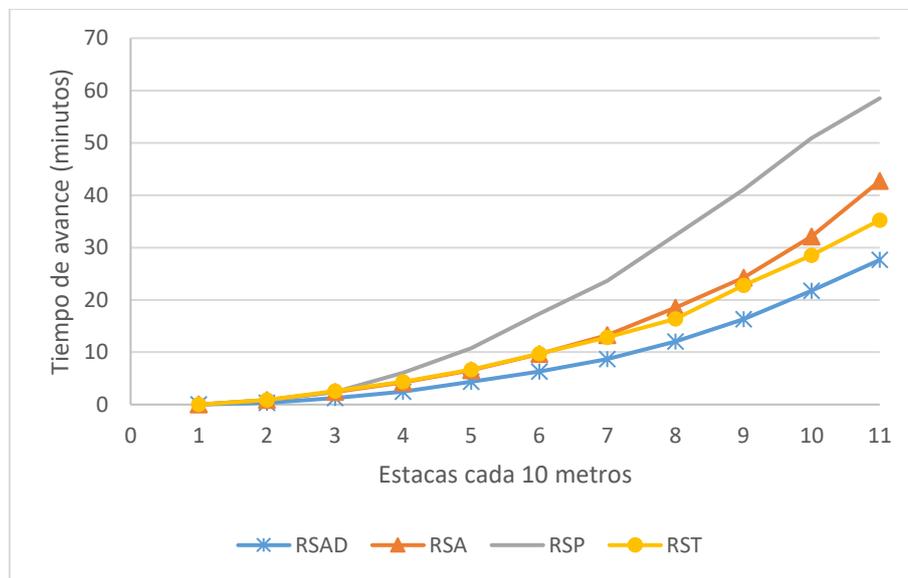


Figura 30: Curvas de avance promedio para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

En el tratamiento RSP, el diseño desarrollado para los ciclos, de acuerdo a la metodología prevista detallado en el punto 4.2. de materiales y métodos, no permitió que el agua se infiltrara por completo inmediatamente antes de ingresar un nuevo pulso con agua, se produjeron solapamientos en los sucesivos pulsos y el receso se registró cuando finalizó el último pulso (Figura 31).

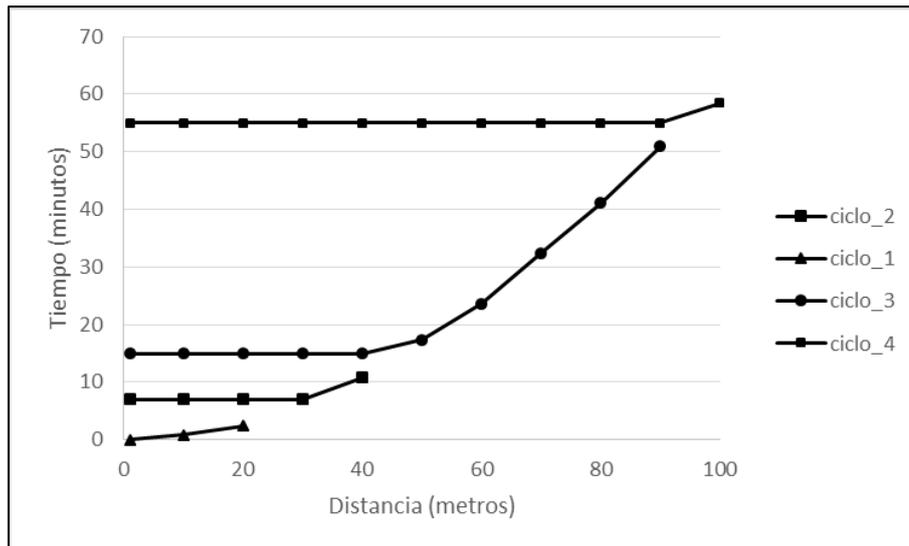


Figura 31: Curvas de avance promedio para los ciclos que caracterizaron la técnica de riego por Pulso (RSP).

Se comprende al tiempo de oportunidad (T_o) como la diferencia entre tiempos de avance y receso, es el tiempo en el que infiltra el agua mientras transcurre el riego, prolongándose luego de que finaliza el tiempo de aplicación en algunos casos, dependiendo de las variables que afectan la infiltración (textura, pendiente, rugosidad del terreno). Estadísticamente para el T_o promedio se encontraron diferencias significativas en el factor frecuencia ($p < 0,0405$) (Tabla 17), sin hallarse diferencias para el factor técnica de riego ($p = 0,9529$).

Tabla 17: Comparación de los tiempos de oportunidad promedio según frecuencia de riego.

Frecuencia	n	T_o	DE
Todos	144	121	37
AF	88	114	a 38
BF	56	143	b 30

Variable: Tiempo de oportunidad (t_o)

*DE: desvío estándar, letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$).

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

Si comparamos la distribución de los tiempos de oportunidad en el surco, tomando a la variable ubicación en el surco como un factor con 3 niveles (cabecera, medio y pie), se encontraron diferencias significativas para la interacción técnica y ubicación en el surco ($p < 0,001$) y para la interacción entre frecuencia y técnica ($p < 0,0229$). La distribución de las medias de T_o según las combinaciones entre factores destacó a la posición final de surco (pie de surco) en RSAD como valor más alto, es decir donde se concentró por mayor tiempo el agua de riego y como valores mínimos a la posición de inicio de surco (cabecera de surco) en RST y RSAD, y final de surco en RSA. (Tablas 16 y 17 y Figura 32)

Tabla 18: Comparación de tiempos de oportunidad para la interacción técnica y posiciones dentro del surco.

Ubicación	Técnica	Media (min)	
Pie/final	RSAD	143	a
Medio	RSP	136	b
Pie/final	RST	133	b
Medio	RSAD	130	b
Medio	RST	129	b
Cabecera/inicio	RSP	129	b
Medio	RSA	129	b
Pie/final	RSP	128	b
Cabecera/inicio	RSA	122	b
Cabecera/inicio	RST	118	c
Cabecera/inicio	RSAD	118	c
Pie/final	RSA	117	c

*Variable: Tiempo de oportunidad (minutos) (To) *Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$). *Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

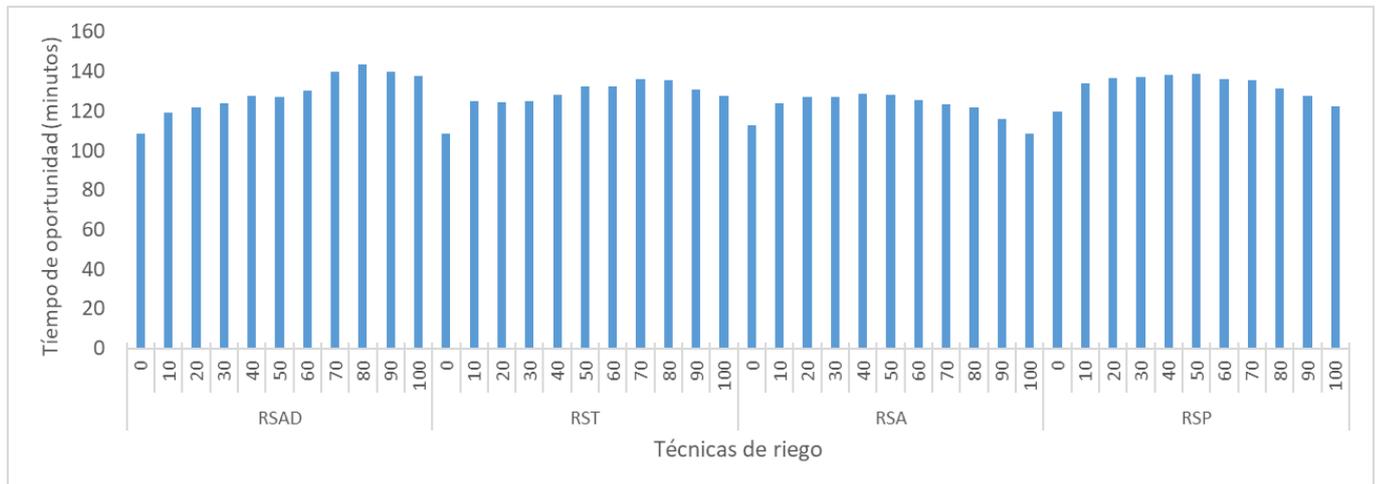


Figura 32: Comparación de tiempos de oportunidad para la interacción técnica y distancias desde el inicio al fin del surco.

Tabla 19: Comparación de tiempos de oportunidad de riego para la interacción según técnica y frecuencias de riego.

Frecuencia	Técnica	Media (min)	
BF	RSAD	152	a
BF	RSP	145	a
BF	RST	137	b
BF	RSA	136	b
AF	RSP	118	c
AF	RST	117	c
AF	RSA	110	c
AF	RSAD	109	c

*Variable: Tiempo de oportunidad (minutos) *Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$). *Técnicas: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos. *AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

A fines de ejemplificar el análisis estadístico en una figura dinámica, se compararon dos eventos de riego de diferentes frecuencias (AF y BF) y técnicas de riego (RSAD, RSA). Tomando el ejemplo de la Figura 33, el tiempo de avance al pie de surco se logró en 25 minutos, como los riegos fueron sin desagüe al pie se produjo una acumulación de agua que denota un riego desuniforme. Si comparamos en tramos la infiltración, se obtuvo en el presente riego una mayor lámina percolada al pie del surco. Lo contrario ocurrió en la Figura 34, en donde el tiempo de avance al pie de surco se logró en 108 minutos, la velocidad de avance fue menor y la lámina infiltrada mostró una concentración en la cabecera del surco. Para ambos casos la uniformidad de distribución (UD) fue en promedio de 80%, pero la distribución del agua ocurrió de maneras distintas sin reflejarlo la UD.

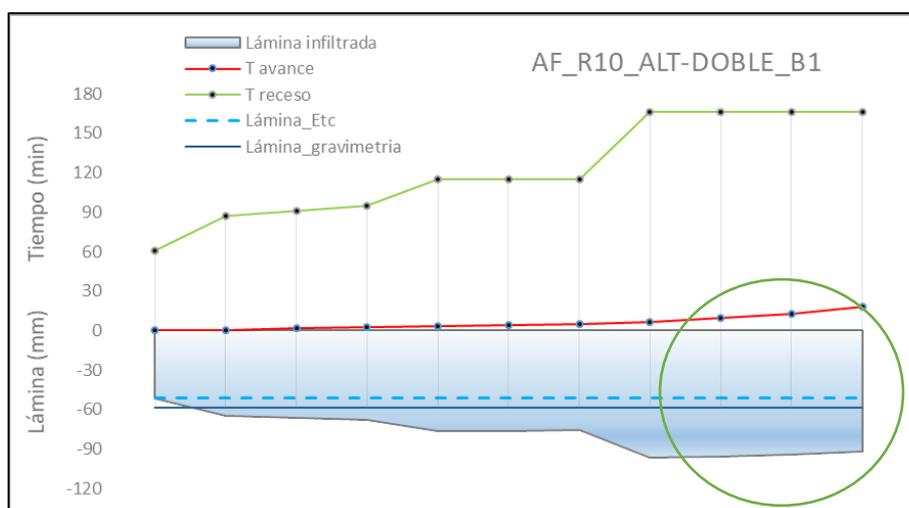


Figura 33: Esquema representativo del onceavo evento de riego en alta frecuencia (AF) y en el manejo RSAD en el bloque 1.

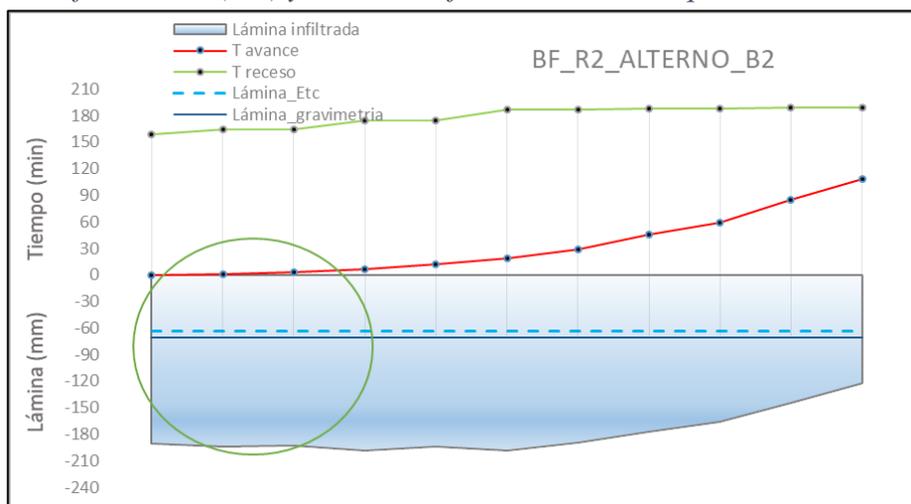


Figura 34: Esquema representativo del segundo evento de riego bajo en baja frecuencia (BF) y en el manejo RSA en el bloque 2.

5.4. Seguimiento de la humedad en el suelo

5.4.1. Niveles de humedad a través de la Gravimetría

A continuación, se presentan los valores promedio de humedades volumétricas antes y después de cada evento de riego, 11 riegos en AF (Tabla 20) y 7 en BF (Tabla 21). El periodo de análisis abarcó 4 meses, desde el 24/11/2016 al 10/03/2017, se presentan los promedios de los manejos de riego en estudio: RSA, RSAD, RSP, RST y las tres ubicaciones en el surco: Cabecera/inicio, medio y pie/final ya que no se encontraron diferencias significativas ($p=0,112$)

Tabla 20: Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría en diferentes profundidades de suelo para AF.

AF Riegos	Profundidad 0-30 cm		Profundidad 30-60 cm		Profundidad 60-90 cm	
	%W antes	%W después	%W antes	%W después	%W antes	%W después
	1	36,4	55,8	46,6	54,8	44,8
2	23,8	32,3	35,4	37,7	-	-
3	16,7	35,9	33,5	36,6	36,8	42,3
4	28,5	36,6	34,3	38,4	40,1	42,0
5	32,9	34,5	36,2	36,6	40,4	42,2
6	29,4	33,1	34,0	37,9	37,2	38,2
7	30,1	38,6	35,0	31,7	35,6	38,6
8	31,8	37,4	35,3	36,9	37,2	39,4
9	29,4	33,0	33,0	36,9	37,1	38,9
10	29,8	32,5	34,8	33,7	36,5	41,7
11	29,2	39,4	32,9	37,4	39,7	44,0
Promedio	28,3	35,6	34,6	36,7	38,7	39,4
DE	6,3	15,6	6,3	7,2	7,9	7,8
CV	22,4	43,8	18,0	19,4	20,4	19,7

* Variable: Contenido de agua promedio, expresado en volumen (%) durante cada evento de riego.

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días.

Tabla 21 Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría en diferentes profundidades de suelo para BF.

BF	Profundidad 0-30 cm		Profundidad 30-60 cm		Profundidad 60-90 cm	
	%W antes	%W después	%W antes	%W después	%W antes	%W después
1	40,2	54,9	53,4	58,3	55,8	68,7
2	22,1	32,9	33,2	37,9	-	-
3	15,3	32,8	28,4	37,5	34,8	41,2
4	25,1	31,9	32,6	35,9	37,5	39,9
5	23,0	33,2	29,0	33,8	35,3	37,5
6	26,0	38,7	30,6	38,6	37,0	40,9
7	21,5	36,3	27,3	36,9	29,4	39,5
Promedio	21,3	33,5	29,8	36,7	30,5	44,1
DE	6,2	8,8	6,7	7,1	15,2	16,6
CV	27,5	25,3	21,7	19,4	50,1	47,4

* Variable: Contenido de agua promedio, expresado en volumen (%) durante cada evento de riego.

*Frecuencias: BF: periodo entre riegos de 16 días.

A continuación, se presenta un análisis más detallado de la dinámica del agua por el método gravimétrico en BF por su característica de presentar riegos más espaciados y los cambios en la humedad del suelo son más evidentes.

Los valores promedio de humedad volumétrica por estrato de suelo (0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm) a partir del tercer riego se presentan en la figura 35, donde los mayores valores se ubicaron en el estrato de 60 a 90 cm.

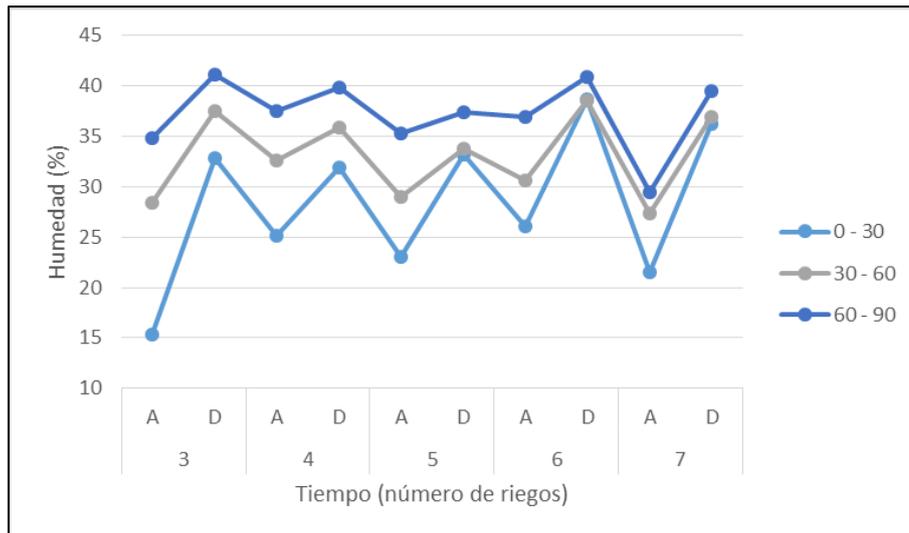


Figura 35: Evolución del contenido de humedad promedio expresado en porcentaje en tres estratos del perfil de suelo, con valores antes (A) y después (D) de cada riego, a partir del tercer evento en BF.

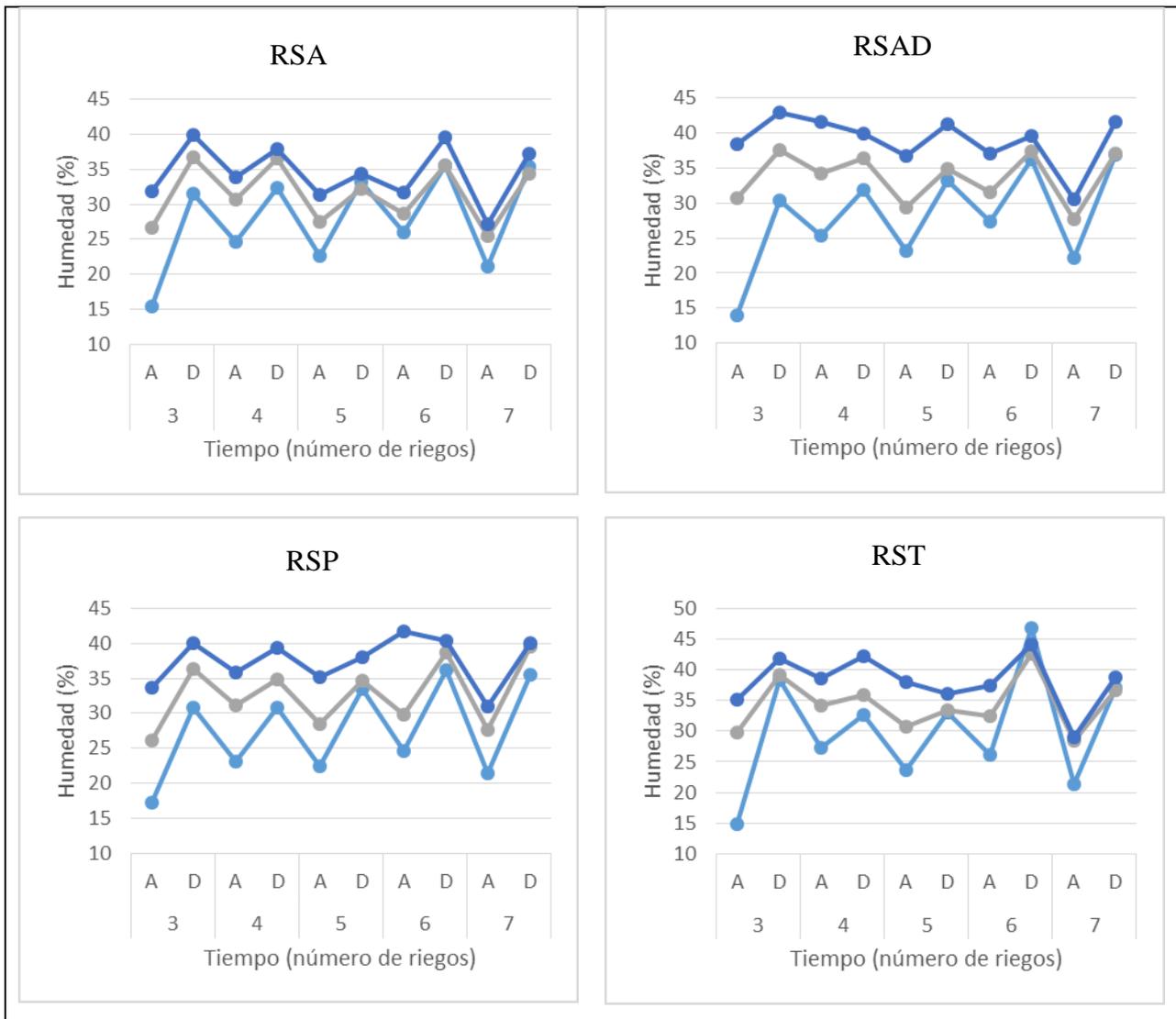
Del análisis de la evolución de la humedad volumétrica en el suelo durante el periodo del 20/01/2017 al 20/03/2017 en los riegos de BF, se observó que el estrato superficial de 0-30 cm presentó los menores valores de humedad, presentándose la mayor variabilidad en los estratos más profundos 60-90 cm y la menor en el estrato intermedio de 30-60 cm (Tabla 21). Si lo comparamos con los resultados de AF, la mayor variabilidad se concentró en el estrato superior de 0-30 cm (Tabla 20) y los mayores niveles de humedad se ubicaron en la profundidad de 60-90 cm.

Tabla 22: Promedio de las mediciones de contenido de agua por gravimetría para los cuatro manejos estudiados a tres profundidades de suelo.

	Profundidad 0-30 cm		Profundidad 30-60 cm		Profundidad 60-90 cm	
	%W antes	%W después	%W antes	%W después	%W antes	%W después
	RSAD	22,5	33,6	31,1	36,6	30,7
DE	5,6	3,5	4,3	2,5	14,7	17,0
RSA	22,0	33,6	28,6	35,3	26,0	34,5
DE	5,9	3,7	5,8	4,1	13,3	15,3
RST	22,8	37,4	31,7	37,4	29,7	33,9
DE	5,7	13,9	4,2	10,8	14,8	17,7
RSP	21,4	32,5	29,4	37,8	29,6	33,0
DE	4,5	5,9	5,8	6,2	17,6	15,6

* Variable: Contenido de agua promedio, expresado en volumen (%). *DE: desvío estándar.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.



*Línea superior azul de 60 a 90 cm, línea intermedia gris de 30 a 60 cm y línea inferior celeste de 0 a 30 cm, con valores antes (A) y después (D) de cada riego.

Figura 36: Evolución del contenido de humedad promedio expresado en porcentaje en tres profundidades de suelo para para las técnicas de riego bajo estudio: RSA, RSAD, RST y RSP.

5.4.2. Mediciones con bloques de resistencia, sensor Watermark

El medidor portátil del sensor “Watermark” registra valores de tensión en un rango de 0 a 199 cbar. Según estudios locales para el mismo sitio de estudio (Reinoso, 2014), se observaron valores de entre 5 y 15 cbar para capacidad de campo, entre 80 y 100 cbar para un nivel de agotamiento de 50% del agua disponible y entre 160 y 180 cbar cuando se agotó alrededor del 90% de agua disponible para las plantas. Las tensiones de humedad recomendadas para el cultivo de maíz son (50-80 cbar) (Hanson *et al.*, 2000). La tensión medida en el cuatrimestre presentó un valor promedio de 34 ± 27 cbar, el primer cuartil fue de 14 cbar y el tercer cuartil fue de 44 cbar. Durante el cuatrimestre el promedio mensual fue de 40 ± 31 cbar en enero, 30 ± 30 cbar en febrero, 28 ± 19 cbar en marzo y 23 ± 11 cbar en abril (Tabla 23).

Si comparamos el promedio de tensión obtenido por profundidad, presentó en ambos casos un valor promedio de 32 cbar, con una mayor variabilidad a los 30 cm: 32 ± 28 cbar, mientras que a 60 cm fue de: 32 ± 19 cbar. (Tabla 24)

Tabla 23: Tensiones registradas con el sensor Watermark a dos profundidades de medida durante un cuatrimestre de riego en RST.

Meses	Profundidad (cm)	Tensión (cbar)	DE
Enero	30	42	35
Febrero		30	38
Marzo		26	20
Abril		34	13
Enero	60	38	28
Febrero		31	27
Marzo		31	23
Abril		20	24

*DE: desvío estándar.

*Técnica de manejo del riego: RST: riego por surco tradicional.

Tabla 24: Tensiones registradas con el sensor Watermark a dos profundidades de medida bajo distintas posiciones en el surco y frecuencias de riego durante un cuatrimestre de riego en RST.

Frecuencia	Posición surco	Profundidad (cm)	Tensión (cbar)	DE
AF	Cabecera/inicio	60	16	2
AF	Pie/final	60	21	20
AF	Cabecera/inicio	30	26	9
AF	Pie/final	30	26	25
BF	Cabecera/inicio	60	36	29
BF	Pie/final	30	40	32
BF	Cabecera/inicio	30	44	19
BF	Pie/final	60	50	44

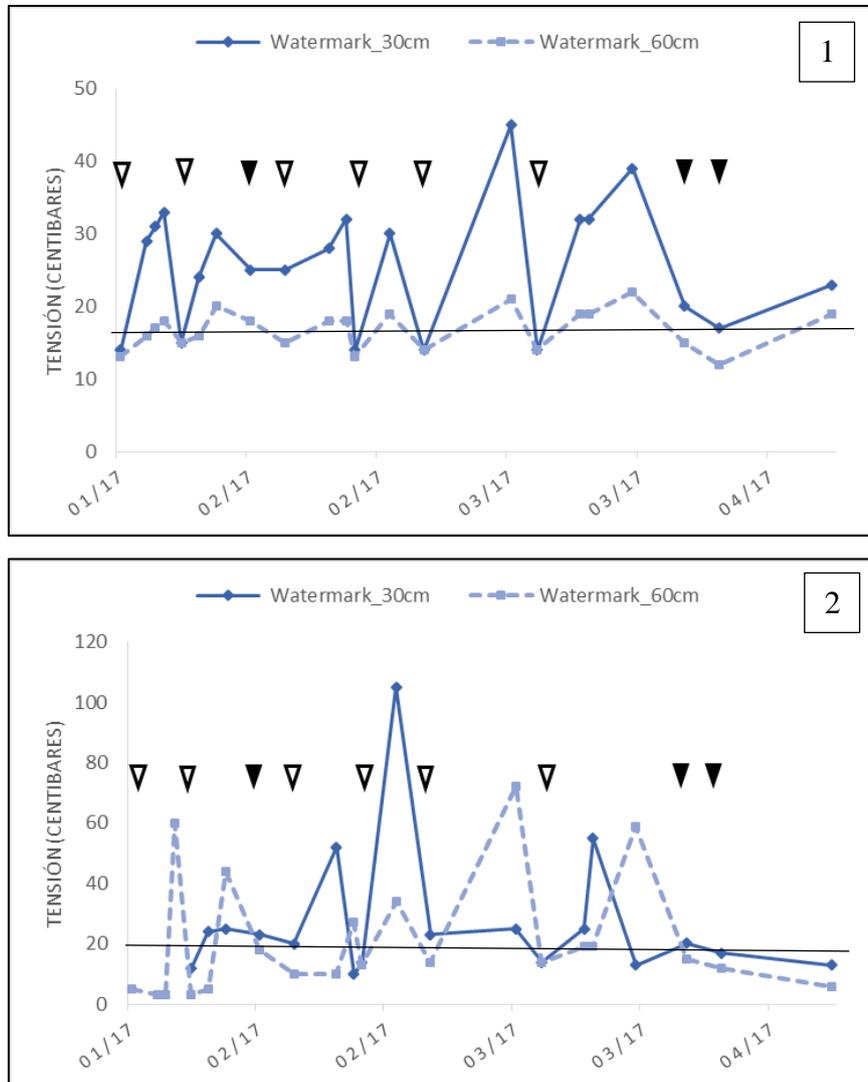
*DE: desvío estándar.

*Técnica de manejo del riego: RST: riego por surco tradicional.

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

Si se comparan las tensiones registradas por frecuencias de riego, en BF se registró una media superior y una mayor variabilidad (37 ± 30 cbar) que en AF (28 ± 16 cbar). Si se contrastan frecuencias junto a las posiciones en el surco (cabecera y pie), la cabecera en AF registró el menor valor (Tabla 24 y Figura 37).

En las Figuras 37 y 38 se detalla la evolución de las mediciones, uniendo los valores de los puntos de lectura para ambas frecuencias y posiciones, marcando las disminuciones de tensión por aumento de la humedad luego de eventos de riego o precipitaciones.



*Posiciones dentro del surco: Inicio/cabecera de surco (1), pie/final de surco (2). Las flechas vacías indican los riegos, y las flechas rellenas los eventos de precipitación. *Técnica de manejo del riego: RST: riego por surco tradicional.

Figura 37: Lecturas de tensión en el suelo con sensores Watermark en RST a dos profundidades (30 y 60 cm), en AF y en dos posiciones dentro de los surcos de riego.

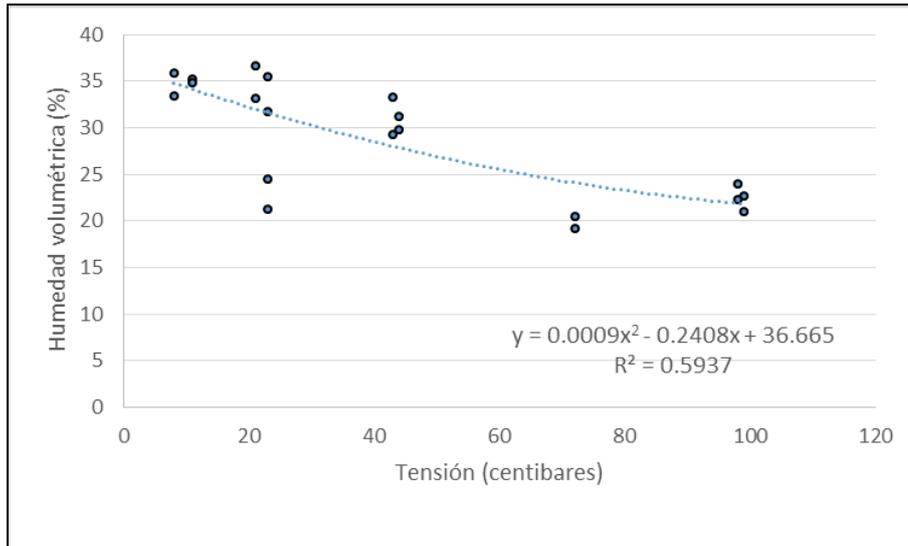


Figura 39: Correlación entre lecturas de tensión con sensores Watermark y humedad volumétrica por gravimetría en RST para el estrato de 0-30 cm de profundidad.

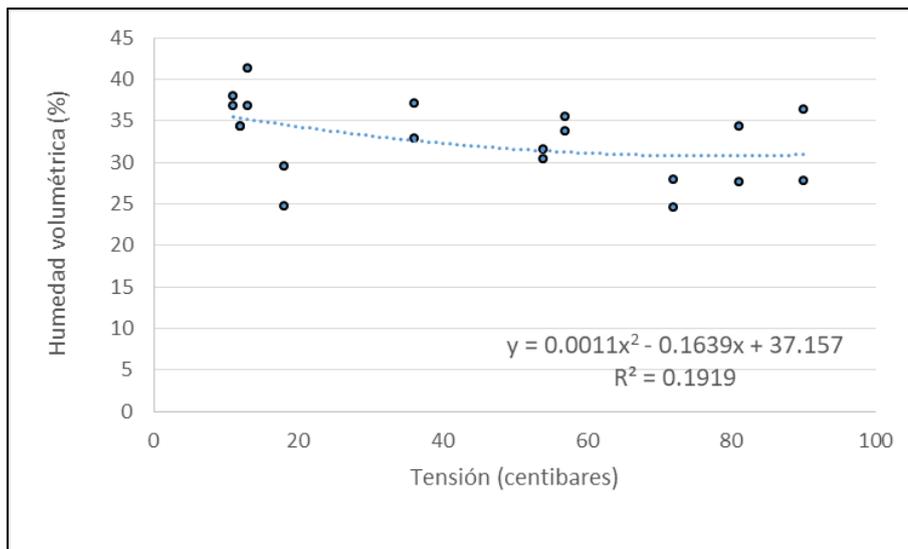


Figura 40: Correlación entre lecturas de tensión con sensores Watermark y humedad volumétrica por gravimetría en RST para el estrato de 30-60 cm de profundidad.

5.4.3. Mediciones con el método de la constante dieléctrica, sensor Diviner

Las mediciones con las sondas de capacitancia en RST mostraron mayores variaciones en el contenido agua total en los primeros 30 cm y en el pie o final de surco si comparamos los promedios obtenidos. (Tabla 25)

Tabla 25: Mediciones de humedad volumétrica con sonda Diviner.

Frecuencia	Posición surco	Profundidad (cm)	Volumen de agua (%)	DE
BF	Pie/final	30	35	12
BF	Cabecera/inicio	30	39	6
BF	Pie/final	60	43	5
BF	Cabecera/inicio	60	39	4

*DE: desvío estándar.

*Frecuencia: BF: periodo entre riegos de 16 días.

En las sucesivas Figuras desde la 41 a 48 se muestra la evolución del contenido de agua del suelo, correspondiente a los riegos: cuarto, quinto, sexto y séptimo en baja frecuencia en dos posiciones en el surco (cabecera y pie), a partir de datos obtenidos durante el trimestre de enero a marzo en 2017. Se observa una marcada presencia de raíces absorbentes entre los 40-50 cm de profundidad a través de la disminución del contenido volumétrico en ese estrato de suelo, sobre todo en la cabecera o inicio de surco, mientras que en el pie o final de surco por la acumulación del riego sin desagüe compensa la cantidad de agua absorbida.

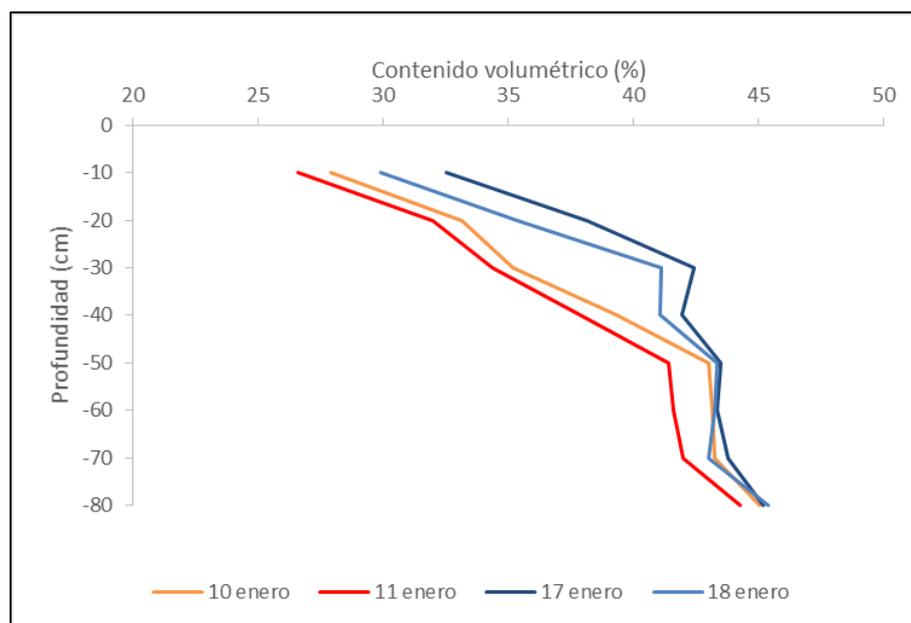


Figura 41: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 12 de enero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.

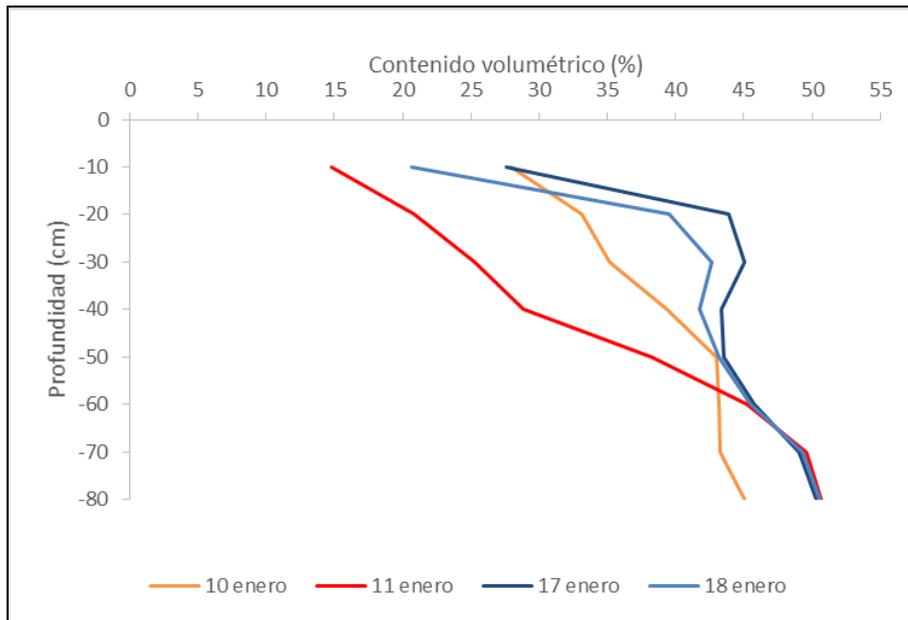


Figura 42: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 12 de enero de 2017 en la posición final o pie de surco.

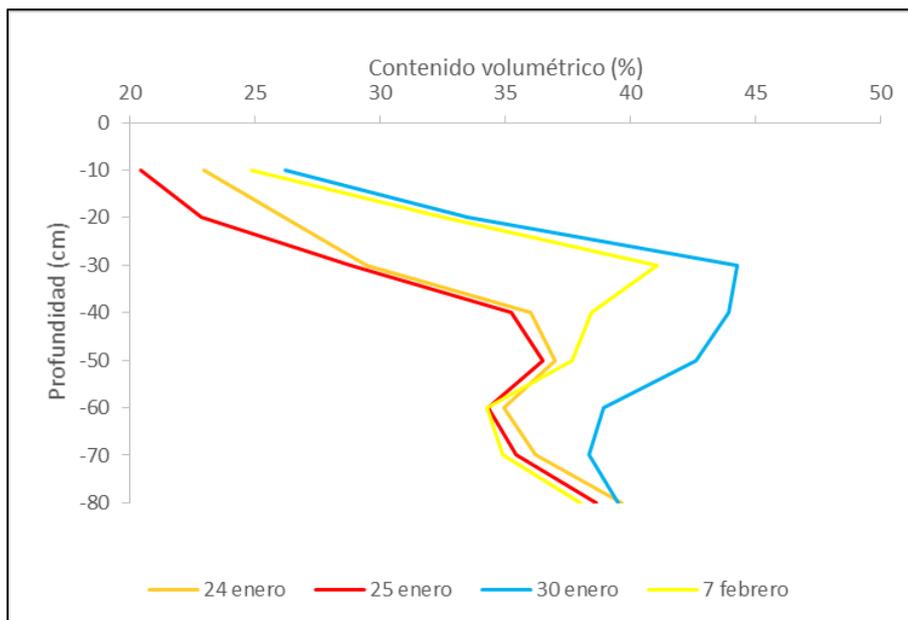


Figura 43: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 26 de enero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.

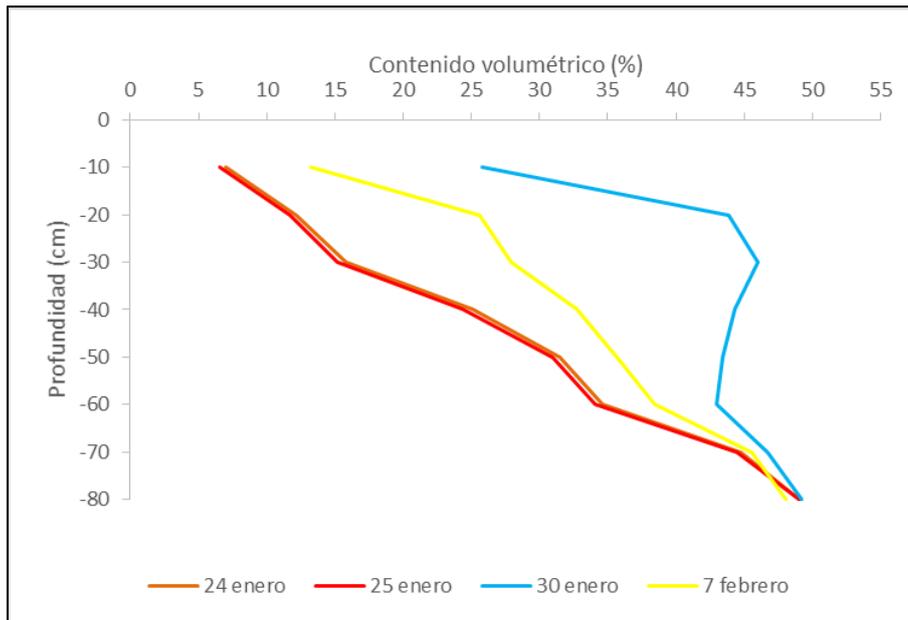


Figura 44: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 26 de enero de 2017 en la posición final o pie de surco.

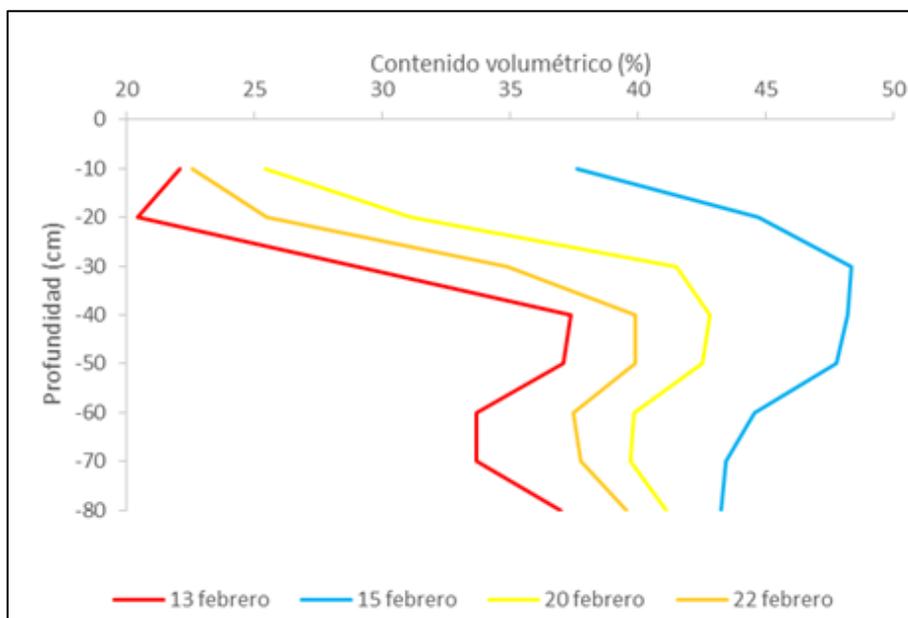


Figura 45: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 14 de febrero de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.

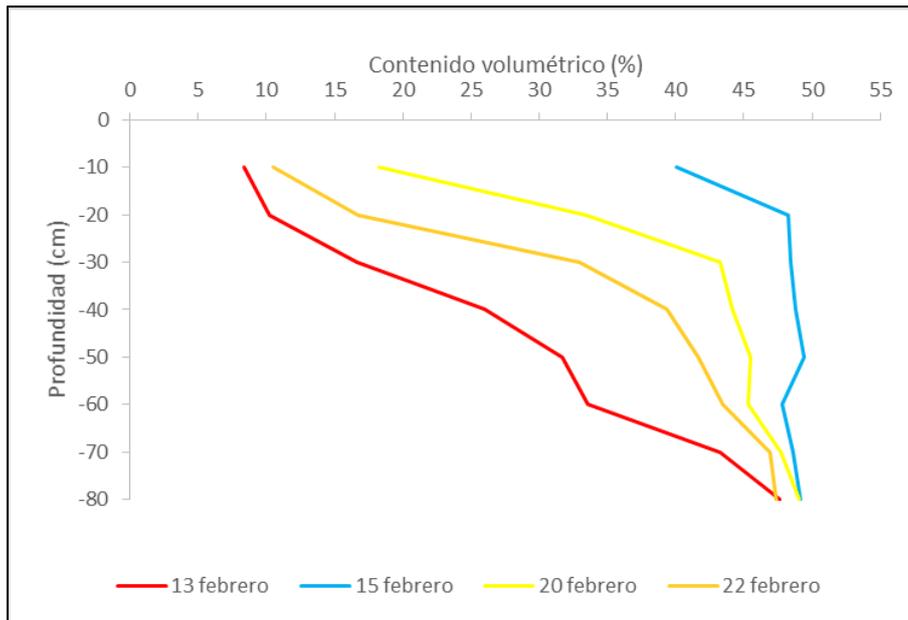


Figura 46: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 14 de febrero de 2017 en la posición final o pie de surco.

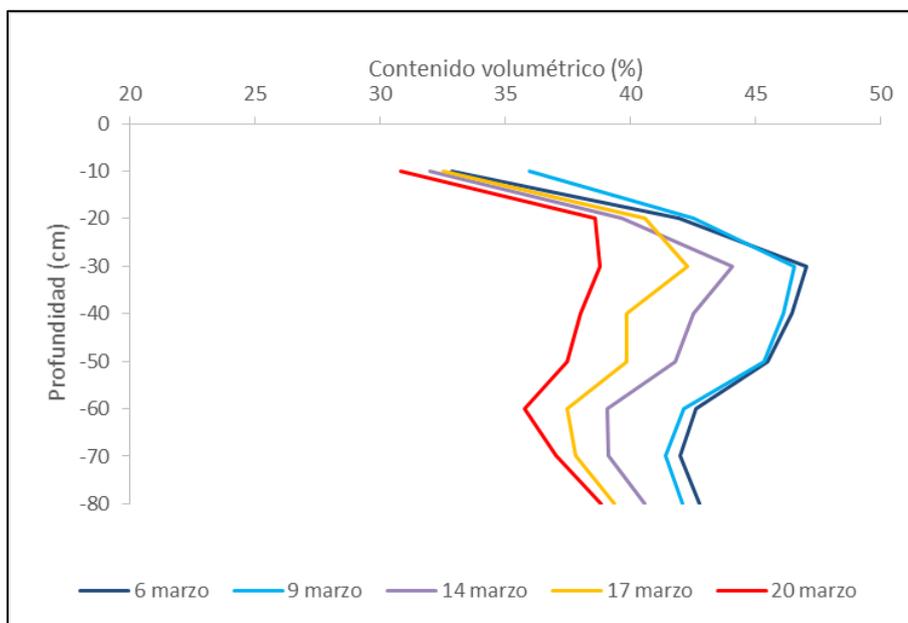


Figura 47: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 4 de marzo de 2017 en la posición inicio o cabecera de surco.

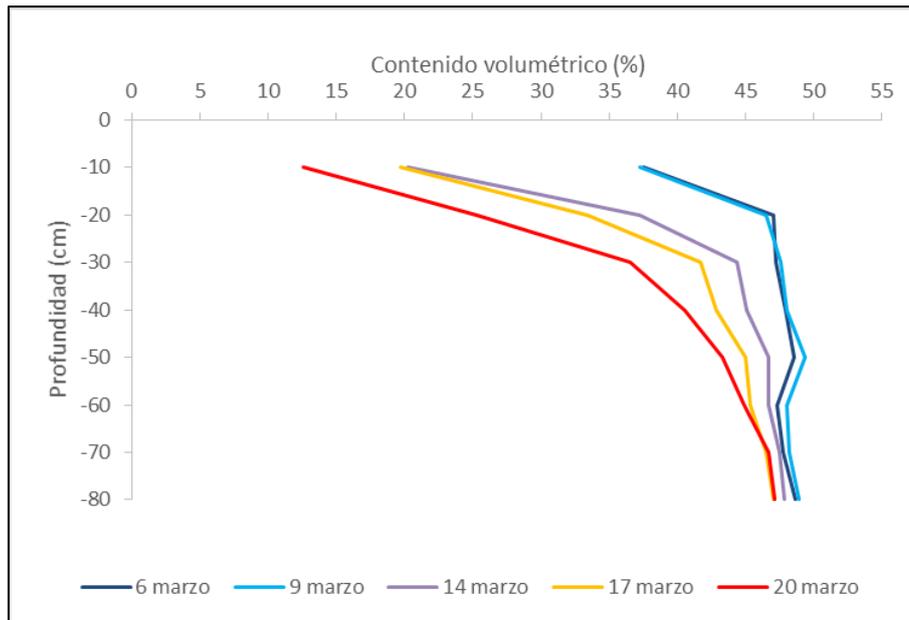


Figura 48: Lecturas de contenido volumétrico con la sonda Diviner en fechas anteriores y posteriores al riego del 4 de marzo de 2017 en la posición final o pie de surco.

Durante el periodo del 25/01/2017 al 6/03/2017 se contrastaron las mediciones realizadas con la sonda Diviner y con la técnica gravimétrica de manera observacional a través del gráfico de lecturas en los primeros 30 cm de profundidad (Figura 49) y en dos profundidades, 30 y 60 cm, se observó un mayor ajuste en el estrato superficial ($r = 0,76$) (Figura 50 y 51).

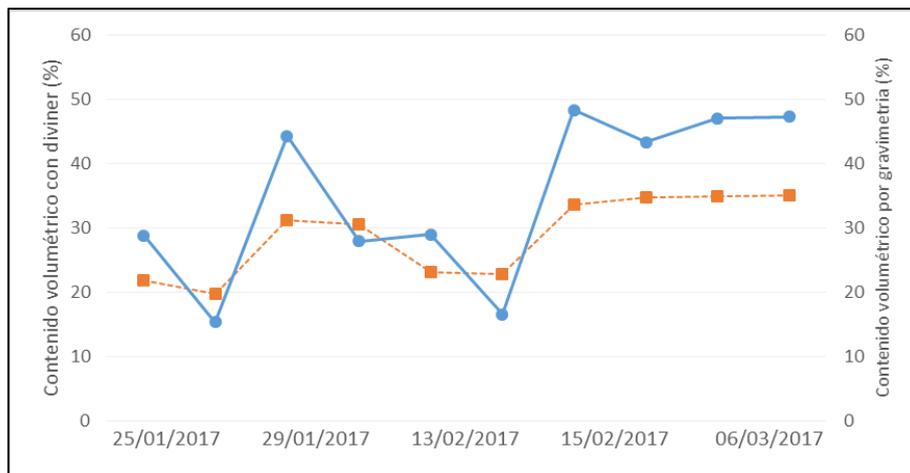


Figura 49: Lecturas realizadas con la sonda Diviner (línea de puntos) y a través del método gravimétrico (línea continua) expresadas en contenido volumétrico, para los primeros 30 cm de profundidad en RST.

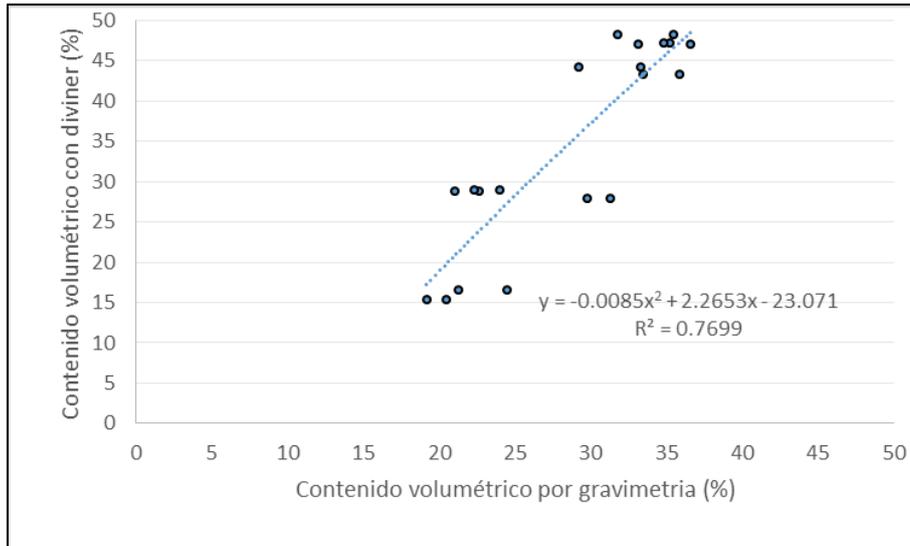


Figura 50: Correlación entre lecturas de humedad volumétrica a través de la sonda Diviner y de la técnica gravimétrica en RST, a los 30 cm de profundidad.

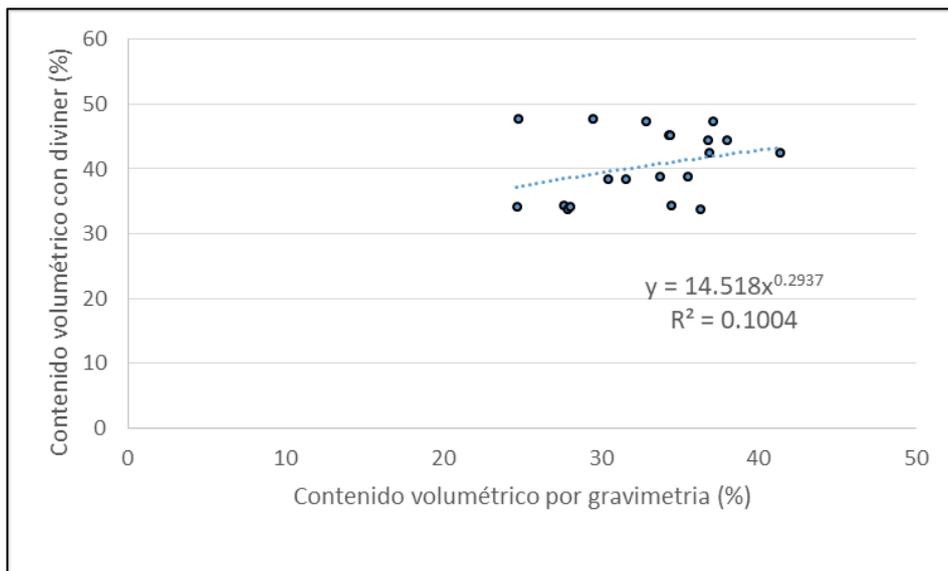


Figura 51: Correlación entre lecturas de humedad volumétrica a través de la sonda Diviner y de la técnica gravimétrica, a los 60 cm de profundidad en RST.

Si comparamos las mediciones entre sensores, sonda Diviner y Watermark, para el mismo período (25/01/2017 al 6/03/2017), el ajuste es mayor en los 30 cm de profundidad ($r=0,94$). (Figura 52 y 53).

La humedad en términos volumétricos estimada con la sonda Diviner se ajusta a la cantidad de agua que hay en el suelo, el seguimiento con los sensores Watermark, en términos de tensión, es un indicativo de la disponibilidad del agua, considerando la relación entre las mediciones entre ambos sensores se reafirma la posibilidad de utilizar a campo los sensores en el seguimiento de la

programación del riego en el valle Inferior del río Negro, como han manifestado trabajos anteriores (Reinoso, 2014).

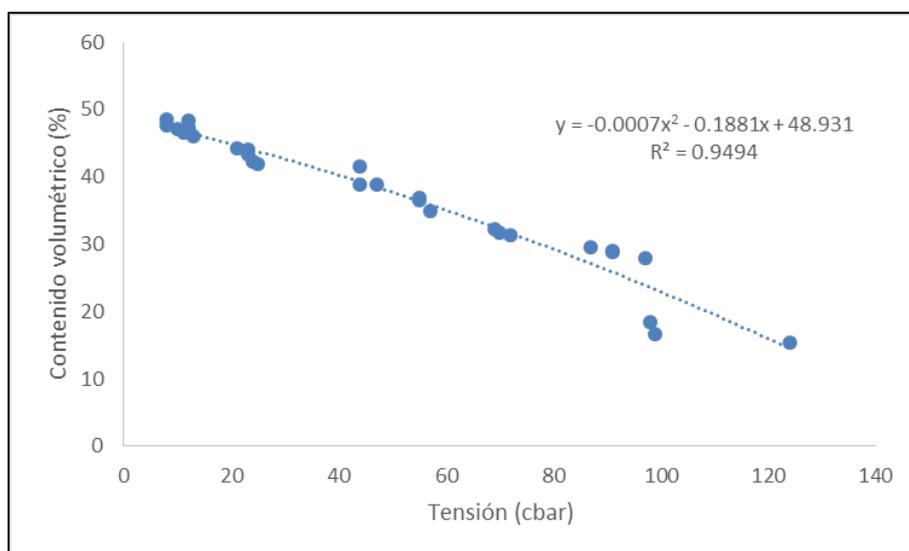


Figura 52: Correlación entre contenido volumétrico de agua con la sonda Diviner y las lecturas de tensión registradas con el sensor Watermark a los 30 cm de profundidad, en BF y RST.

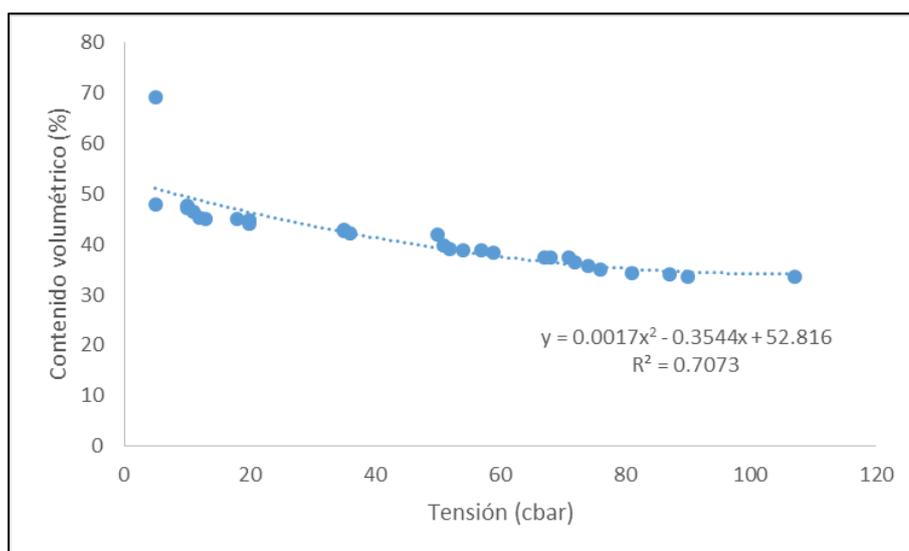


Figura 53: Correlación entre contenido volumétrico de agua con la sonda Diviner y las lecturas de tensión registradas con el sensor Watermark a los 60 cm de profundidad, en BF y RST.

5.4.4. Mediciones con sonda electromagnética, sensor EM38-mk2

Se evaluó la relación entre la conductividad eléctrica aparente CEa ($\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$) a los 75 cm de profundidad y el contenido de agua volumétrico medido por gravimetría (W%) a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm) y en 3 fechas que corresponden a condiciones previas y posteriores a un evento de riego, la primer fecha 27/12/2016, corresponde al momento previo a realizar el tercer riego (28/12/2016), la segunda fecha 30/12/2016, es la situación posterior a realizar el tercer riego y por último el 14/01/2017 corresponde a la situación posterior del cuarto riego (12/01/2017).

La correlación lineal entre la CEa y la humedad volumétrica gravimétrica mostró un mayor ajuste en el estrato de 30-60 cm ($r=0,81$), según Rhoades *et al.*, 1989 el contenido de agua es el principal factor que influye en los valores de Cea.

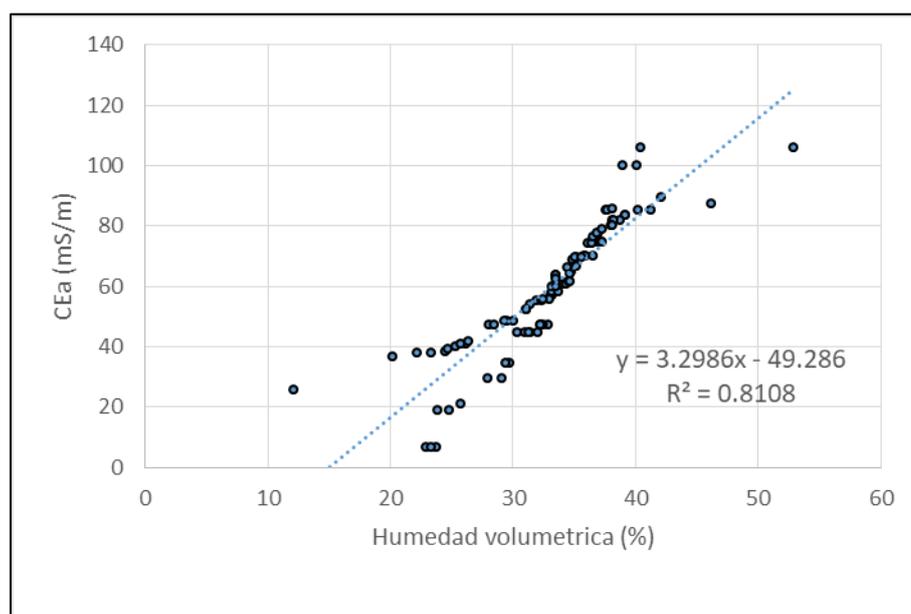


Figura 54: Regresión lineal entre la humedad volumétrica en la profundidad de 30-60 cm de suelo y la conductividad eléctrica aparente medidos a través del sensor EM38-mk2.

Los mapas de CEa fueron georeferenciados con la herramienta QGIS 3.4, la conductividad a la profundidad de 0,75 metros se presentó en forma gradual, categorizada en 5 rangos que corresponden a 3 fechas (27/12/2016, 30/12/2016, 14/01/2017). Se refleja de manera observacional como la fecha del 30/12 que corresponde a condiciones de post riego, presenta los mayores valores de CEa (puntos azules), entendiéndose como un mayor contenido hídrico.

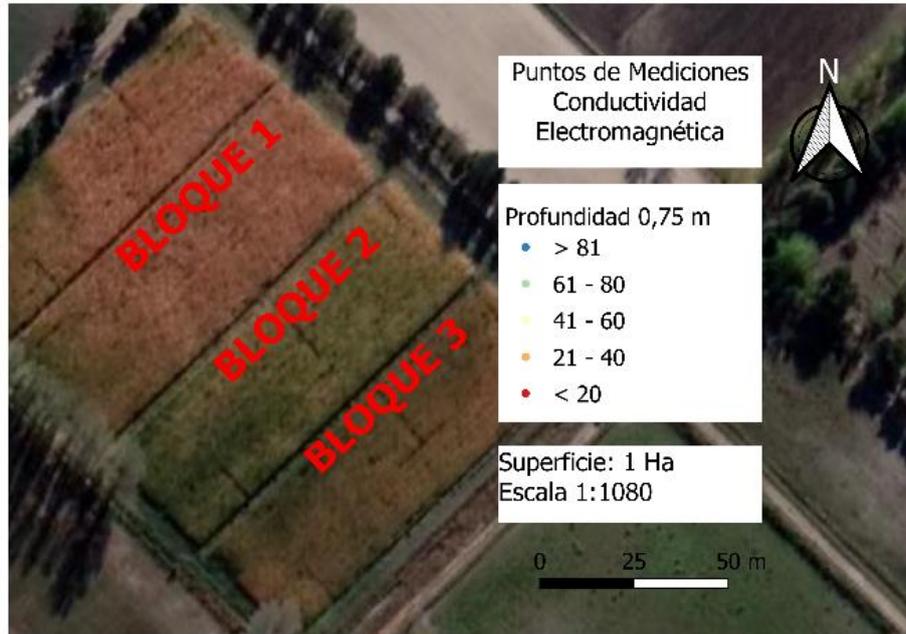


Figura 55: Mapa de Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a una profundidad de 0,75 metros y categorizada en 5 rangos.



Figura 56: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 27/12/2016.

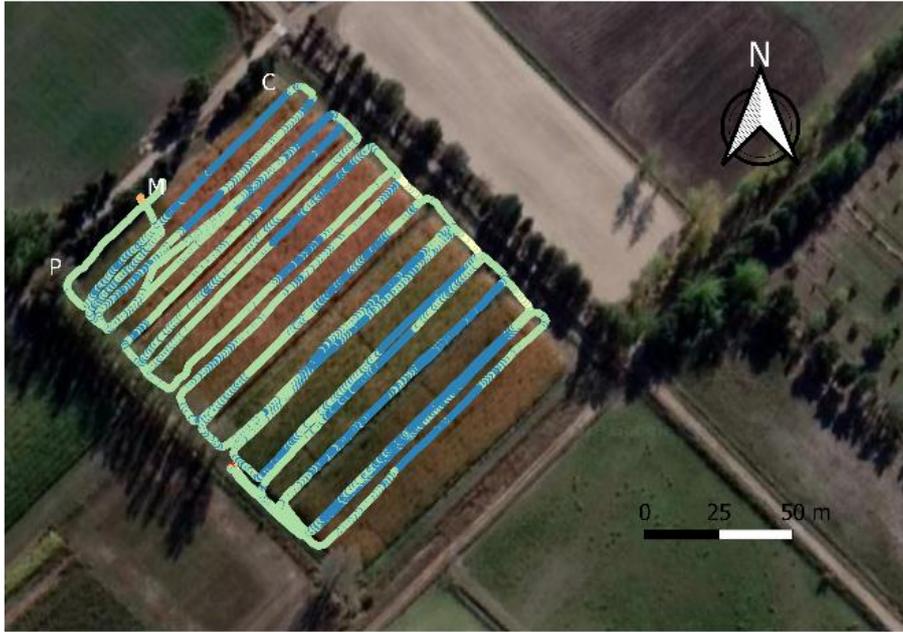


Figura 57: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 30/12/2016.



Figura 58: Conductividad eléctrica aparente georeferenciada correspondiente a BF el 14/01/2017.

5.5. Desempeño de riego

La investigación en Agricultura comúnmente presenta situaciones en las que es difícil utilizar los modelos lineales clásicos de análisis de varianza y regresión porque no se cumplen los supuestos de independencia, normalidad, igualdad de varianzas o incluso linealidad. La modelación de datos experimentales en el marco teórico de los modelos lineales y generalizados mixtos brinda la posibilidad de analizar datos con estructuras de dependencia, desbalances y falta de normalidad. (Balzarini *et al.*, 2005)

En el marco de los modelos generales y mixtos se presentan las principales variables que caracterizaron a los tratamientos EA, EAL, Pp, UD; las mismas fueron la variable respuesta en la estructura del modelo estadístico. Para la selección de modelos se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC), siendo el mejor modelo aquel que presente el menor valor. (Tabla 26)

Se eligió el modelo de estructura de varianza Auto regresivo de orden 1 y la secuencia de riegos como ordenamiento temporal.

Tabla 26: Modelos de estructura de varianza analizados.

	Autoregresivo de orden 1	Autoregresivo continuo	Simetría compuesta
	AIC	AIC	AIC
EA	1803,7	1803,72	1867,5
EAL	1502,0	1502,8	1511,6
Pp	1505,4	1505,5	1866,5
UD	1323,7	1323,9	1363,6

*Variables: EA: Eficiencia de aplicación, EAL: Eficiencia de almacenamiento, Pp: Porcentaje de percolación, UD: Porcentaje de uniformidad de distribución.

5.5.1. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación (EA) promedio para el total de los riegos evaluados en el presente estudio fue de $63 \pm 25\%$, el rango entre el primer y tercer cuartil fue 40 y 85%.

El análisis estadístico determinó existen diferencias entre medias de EA en función del factor técnica de riego ($p < 0,0001$), RSAD y RST presentaron valores intermedios, superan en un 20% al RSP bajo las condiciones del ensayo y fueron superados en un 20% por RSA (Tabla 27), no se hallaron diferencias entre frecuencias ($p = 0,0928$).

La técnica de RSA logró una EA de 84%, aplicó una LBT de 817 mm, cuando la LRT fue de 648 mm y percoló un 20%.

El RSAD no mantuvo la totalidad de los surcos conformados durante el ciclo, motivo por el cual aplicó la LBT similar a RST. Debe tenerse en cuenta para su correcto desempeño reconformar los surcos en alguna actividad de rutina como la fertilización con aporcadores incluidos.

La EA varió durante el ciclo de cultivo y fue en ascenso durante el mismo (Figura 59), en todas las técnicas de riego el primer riego presentó una baja EA, comenzaba el proceso de germinación con la menor LRR (Tabla 6 y 7)

Según la clasificación de Roscher (1985), el RST, es decir regando todos los surcos sin discontinuar su riego en el tiempo, presentó un valor “Satisfactorio” de EA de 62%, las técnicas de RSA y RSAD presentaron valores superiores, “Bueno” con una EA de 84% y “Satisfactorio” con una EA de 70%, respectivamente. Otros estudios comparativos de riego presentan valores similares de eficiencias de aplicación factibles bajo esta técnica (Arbat *et al.*, 2008; Webber *et al.*, 2006; Horst *et al.*, 2007).

El RSP en diversos estudios ha demostrado mejorar la hidráulica de la fase de avance en el surco, aumentar la velocidad de avance en los sucesivos ciclos (Schilardi, 2011; Morábito *et al.*, 2012 y Romay, 2012) y lograr EA superiores al 70% (Génova *et al.*, 2014).

Bajo las condiciones del presente estudio: criterio para la sucesión de ciclos detallado en el punto 4.2.1, suelos de textura franco limosa, surcos de 100 metros y pendiente de 0,036% y un tiempo de corte cuando en la mitad de los surcos regados el agua llega al final, la EA para RSP fue de 40%. Debido a la metodología empleada, detallada en el punto 4.2.1 (materiales y métodos) y las condiciones generales del estudio el agua no infiltró por completo antes de ingresar un nuevo pulso, se produjeron solapamientos en los sucesivos pulsos y el proceso de receso solo se registró cuando finalizó el último pulso. Es importante considerar el bajo desempeño de riego logrado en las condiciones del estudio, ya que nos demuestra que el riego en pulso en sí mismo no mejora la EA, si no está acompañado de una correcta planificación de los tiempos de avance en cada ciclo, ya sea

por automatismo o de forma manual como en el presente estudio.

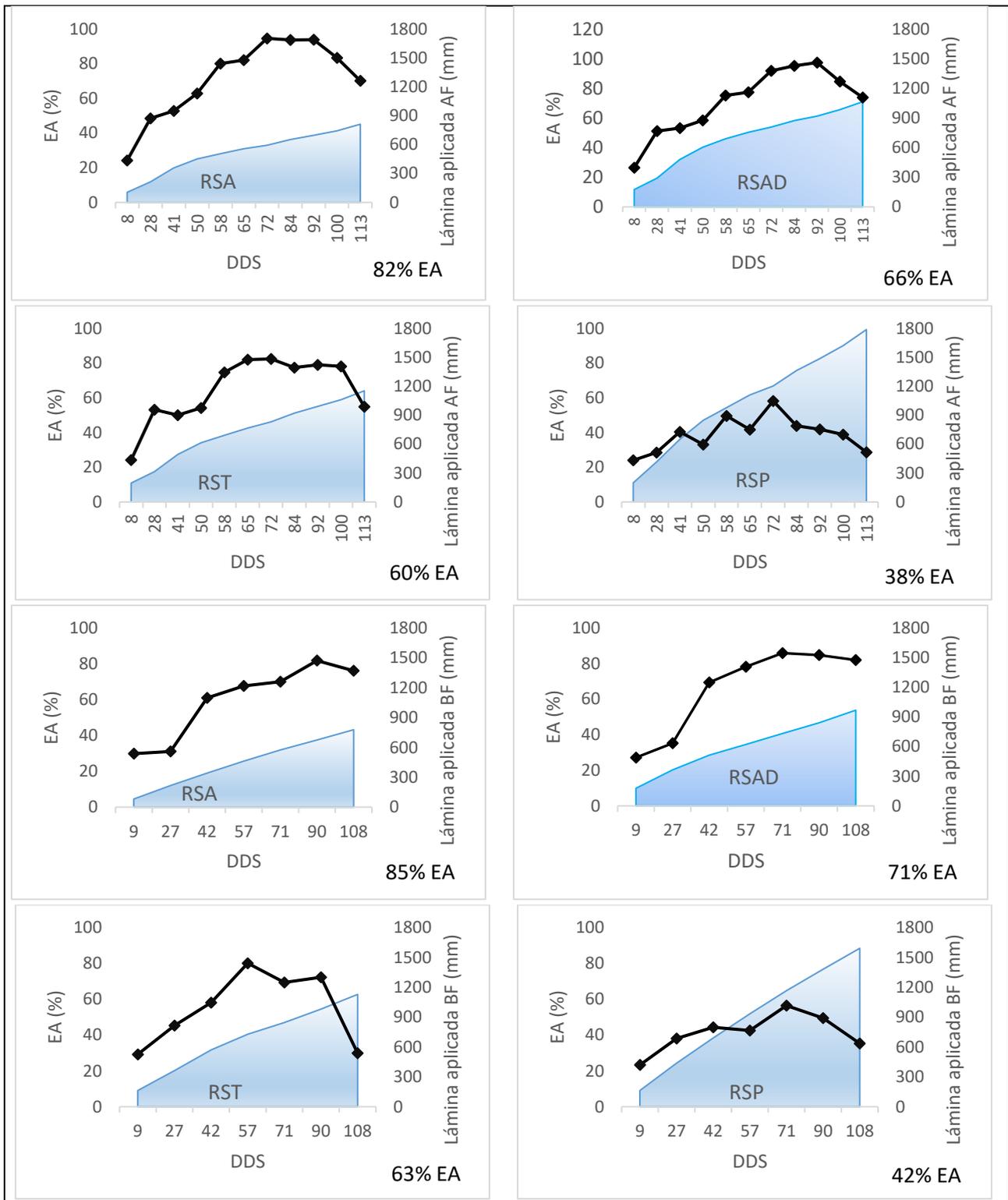
La EA global promedio fue de $61 \pm 16\%$, se obtuvo a través de la lámina requerida durante el ciclo de cultivo (LRT) y la lámina bruta total aplicada (LBT); presentó menores valores que la EA (media de todos los eventos de riego), específicamente la diferencia fue de 3% en riego por RSP, 5% en RSA, 7% en RSAD y 9% en RST.

Tabla 27: Eficiencias de aplicación según técnicas de riego propuestas.

Técnicas	n	EA		DE	LBT	LRT	EA global
RSA	36	84 %	a	20	819	648	79 %
RSAD	36	70 %	b	18	1017	648	63 %
RST	36	62 %	b	14	1070	648	53 %
RSP	36	40 %	c	5	1656	648	37 %

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$)

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.



*Variables analizadas: Eficiencia de aplicación (EA%) por riego en el eje Y (línea), lámina aplicada (mm) en eje X (área), en el margen derecho inferior para cada caso se presenta la EA% global por técnica y frecuencia. DDS: Días después de la siembra.
 *Letras diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) *Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos. *Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

Figura 59: Comparación entre las variables eficiencia de aplicación y lámina bruta, para los tratamientos que combinan técnicas de riego y frecuencias.

5.5.2. Eficiencia de almacenamiento

La eficiencia de almacenamiento (EAL) promedio para el total de los riegos evaluados fue de 96 ± 10 %, el rango entre el primer y tercer cuartil fue 99 y 100%. Se encontró diferencias significativas para el factor técnica ($p < 0,0026$), sin encontrarse entre frecuencias ($p = 0,2514$). El RSA se diferenci6 del resto de las t6cnicas y present6 un almacenamiento promedio de 90%.

Tabla 28: Eficiencias de almacenamiento seg6n las t6cnicas de riego propuestas.

T6cnicas	n	EAL		DE
RSP	36	100	a	1
RST	36	99	a	3
RSAD	36	98	a	8
RSA	36	91	b	16

*DE: Desv6o est6andar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$)

*T6cnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

Seg6n la clasificaci6n de Roscher (1985), el RST present6 valores ‘‘Buenos’’ de EAL, similares a los obtenidos en otros estudios nacionales (G6nova *et al.*, 2014; Schilardi, 2011; Mor6bito *et al.*, 2003 y 2012).

5.5.3. Porcentaje de percolaci6n

El porcentaje de percolaci6n (Pp) promedio para el total de los riegos evaluados en el valle fue de 37 ± 25 %, el rango entre el primer y tercer cuartil fue 15 y 58%. Existieron diferencias significativas en funci6n del factor t6cnica de riego ($p < 0,0001$) y no para el factor frecuencia ($p = 0,0838$). La mayor l6mina percolada acompa6n6 al RSP.

Tabla 29: Porcentajes de percolaci6n seg6n t6cnicas de riego propuestas.

T6cnicas	n	Pp		DE
RSP	36	63	a	13
RST	36	47	b	24
RSAD	36	37	b	26
RSA	36	20	c	23

*DE: Desv6o est6andar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$)

*T6cnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

5.5.4. Uniformidad de distribución

El porcentaje de uniformidad de distribución (UD) promedio para el total de los riegos fue de $89\pm 6\%$, el rango entre el primer y tercer cuartil fue 85 y 93%, no se encontraron diferencias significativas para frecuencia ($p=0,5955$) y técnica de riego ($p=0,9483$).

5.5.5. Cociente de adecuación

También llamado coeficiente de adecuación del cuarto más perjudicado (ADlq), expresa la relación entre la lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado y la lámina objetivo. El valor promedio para todos los eventos de riego fue de $1,83\pm 0,84$, el rango entre el primer y tercer cuartil fue 1,2 y 2,4. El análisis estadístico determina existen diferencias entre medias en función del factor técnica de riego ($p<0,0006$), sin encontrar diferencias entre frecuencias ($p=0,4080$).

Tabla 30: Relaciones entre lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado y lámina objetivo según técnicas de riego.

Técnicas	n	ADlq		DE
RSP	36	2,72	a	0,76
RST	36	1,89	b	0,60
RSAD	36	1,77	b	0,67
RSA	36	1,08	c	0,38

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p\leq 0,05$)

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

5.5.6. Déficit

El déficit en el promedio de riegos fue de 5 mm, se encontraron diferencias estadísticas para el factor técnica de riego ($p<0,0318$), separándose el RSA con el mayor déficit de 12 mm del resto de las técnicas, sin encontrarse diferencias entre frecuencias ($p=0,0578$).

Tabla 31: Valores de déficit en los riegos según técnicas en estudio.

Técnicas	n	DEF		CV
RSA	36	12	a	124
RSAD	36	4	b	150
RST	36	4	b	156
RSP	36	0	b	0

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p\leq 0,05$)

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

En el análisis de componentes principales ACP se incluyeron las siguientes variables EA: eficiencia de aplicación, EUA: eficiencia en el uso del agua (kg.m^{-3}), Pp: porcentaje de percolación, EAL: eficiencia de almacenamiento, UD: uniformidad de distribución, ADlq: Cociente de adecuación (relación lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado y lámina objetivo) y RTO: rendimiento (kg.ha^{-1}) (Figura 60). Las variables rendimiento expresada como kilos de grano por hectárea y eficiencia de uso de agua expresado como kilos de grano por metros cúbicos aplicados se detallan en el punto 5.7.

Los auto valores obtenidos de ambos componentes (CP1 + CP2) explicaron el 89% de la variabilidad entre tratamientos. El CP1 explicó el 74% de la variabilidad, las variables de mayor peso que en la separación de tratamientos fueron: EA, y Pp, presentaron el mismo valor de auto vector: 0,43.

Si analizamos la matriz de correlaciones de Pearson entre variables y su test de probabilidad se concluyó: las correlaciones positivas estadísticamente significativas más elevadas ocurrieron entre: EA y EUA, Adlq y Pp. Si analizamos las correlaciones negativas se destacaron Pp y EA, Pp y EUA y Pp y RTO. Las proyecciones de las variables en el Figura 60 se corresponden con la matriz de correlaciones (Tabla 32), las variables que presentaron ángulos agudos se correlacionaron positivamente, ángulos obtusos negativamente y no presentaron correlación las variables que describieron ángulos rectos.

Tabla 32: Análisis de componentes principales entre variables de interés.

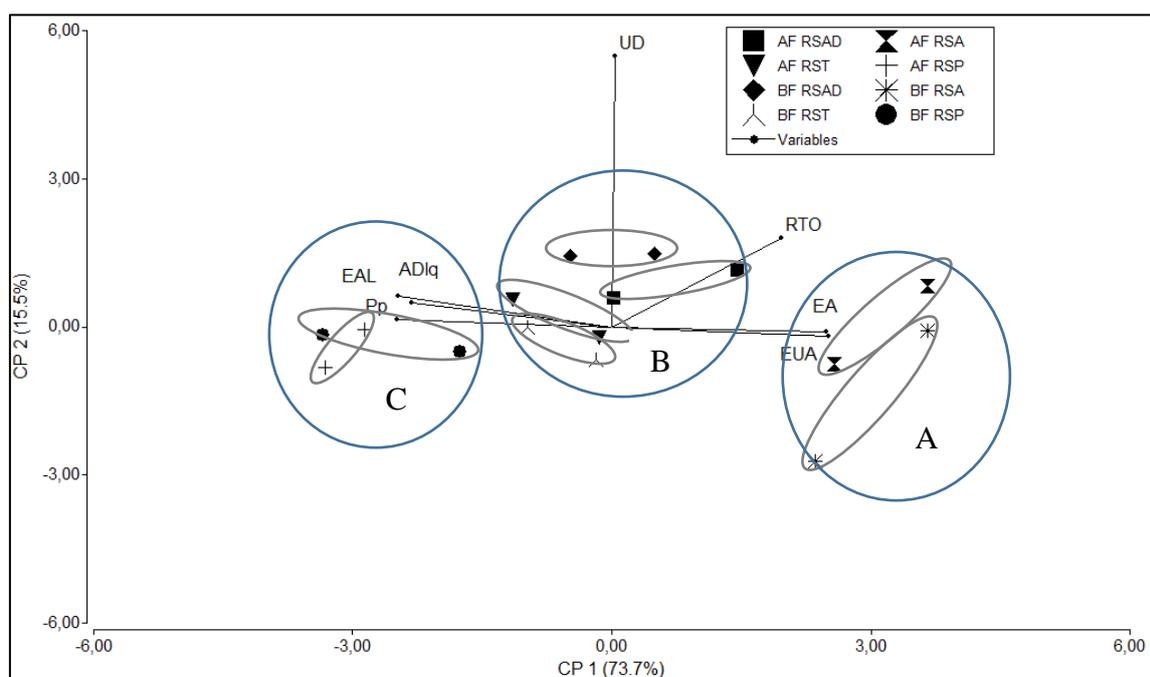
	EA	EAL	UD	Pp	ADlq	RTO	EUA
EA	1						
EAL	-0,72 ***	1					
UD	ns	ns	1				
Pp	-1,00 ***	0,73 **	ns	1			
ADlq	-0,98 ***	0,68 **	ns	0,98 ***	1		
RTO	0,70 **	-0,72 **	ns	-0,71 **	-0,71 **	1	
EUA	0,80 ***	-0,79 ***	ns	-0,91 ***	-0,87***	0,71**	1

Nivel de significancia: *, **, ***, $p < 0.05$; 0.01; 0.001, respectivamente. ns, diferencias no significativo. EA: eficiencia de aplicación, EUA: eficiencia en el uso del agua (kg.m^{-3}), Pp: porcentaje de percolación, EAL: eficiencia de almacenamiento, Adlq: Cociente de adecuación (relación lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado y lámina objetivo), UD: uniformidad de distribución y RTO: rendimiento (kg.ha^{-1}).

Según el análisis ACP la variable rendimiento aumentó principalmente para el tratamiento que combina AF y RSAD y las variables de EA y EUA aumentaron para RSA en ambas frecuencias y disminuyeron en ambas frecuencias para RSP.

Se evidenció el mayor peso de la técnica de riego por sobre las frecuencias de riego, de manera

general a través del ACP y de forma específica con los p-valores de significancia para las variables analizadas. La proyección de los tratamientos en el plano de los dos primeros ejes, permitió diferenciar tres grupos: el que se asoció con los mayores valores de EA y EUA (Grupo A), aquel que presentó valores medios para todas las variables analizadas (Grupo B) y el que presentó los mayores valores en las variables referentes a Pp y ADIq (Grupo C).



Variables EA: eficiencia de aplicación (%), EUA: eficiencia en el uso del agua ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), Pp: porcentaje de percolación, EAL: eficiencia de almacenamiento (%), ADIq: Cociente de adecuación, UD: uniformidad de distribución (%) RTO: rendimiento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Factor frecuencia: AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia. Factor técnica: RST: riego por surco tradicional o normal, RSA: riego por surco alterno, RSAD riego por surco alterno doble, RSP: Riego por surco en pulso o discontinuo.

Figura 60: Análisis de los componentes principales para las variables que caracterizan el desempeño de riego y el rendimiento del cultivo.

5.6. Indicadores actuales y potenciales a través de WinSRFR

Los indicadores que califican el desempeño de riego (EA, EAL, UD, Pp, ADIq), se calcularon a través de dos herramientas, planillas de Excel a través de los cocientes entre las distintas láminas propuestas en la metodología de Chambouleyron y Morábito (1982) para surcos sin desagüe al pie y software WinSRFR, los resultados fueron similares y las correlaciones mayores al 90%.

Las eficiencias potenciales estimadas con el WinSRFR, se obtuvieron respetando las sugerencias que realiza el módulo “Operation analysis” al modificar las variables de manejo: caudal de ingreso y tiempo de riego, controlando la premisa de no superar el QMNE en cada evento. En las Figuras 61, 62, 63 y 64 se muestra en detalle los gráficos obtenidos para el cuarto riego el 05/01/2017 en AF y el tercer riego el 12/01/2017 en BF, en donde el punto nos señala la EAp elegida para cada combinación de tiempo de aplicación y caudal, y el triángulo la EA promedio real.

La EAp se observa como un abanico de posibilidades según la combinación de caudal y tiempo de riego en cada evento, se tomó la mejor performance, es decir EAp mayor, pero sin superar el QMNE unitario de $6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, respetando una UD mayor al 90% y completando la LRR en toda la longitud del surco.

La eficiencia de aplicación potencial (EA p) promedio para el total de los eventos simulados fue de 78%, el rango entre el primer y tercer cuartil es 72 y 89%. Los escenarios planteados permitieron aumentar un promedio de $16 \pm 3\%$ la EA, acompañado de un aumento promedio en el caudal unitario de 57% ($2,07 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ a $3,24 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) y una disminución promedio en el tiempo de aplicación de 40% (77 minutos a 46 minutos). Si analizamos el conjunto de eventos, las mejoras ocurrieron en un escenario con un aumento en el caudal unitario y una reducción en el tiempo de riego (Figuras 65-72).

Si se analiza la EA por tratamiento, RSP en AF posibilitó el mayor aumento potencial, 30% en promedio ya que coincidió con el desempeño promedio más bajo (EA 38 %). El menor aumento de EA potencial se logró en RSA, ya que presentó una EA de 85% (Tabla 33). La tendencia general en los sucesivos riegos es el aumento hacia el final del ciclo de cultivo de la EA y UD, ocurrió en ambas frecuencias y en todas las técnicas de riego, observándose que en todos tratamientos los primeros eventos de riegos han sido menos eficientes, asociadas a una menor LRR. (Figuras 73-80)

Tabla 33: Eficiencias de aplicación reales y potenciales promedio según técnicas y frecuencias de riego en estudio.

Técnicas	Frecuencias	EA (%)	EAp (%)	Aumento (%)
RSP	AF	38	70	32
RSP	BF	42	65	23
RST	AF	60	78	18
RST	BF	63	79	16
RSAD	AF	66	84	18
RSAD	BF	71	78	7
RSA	AF	82	85	3
RSA	BF	85	84	0

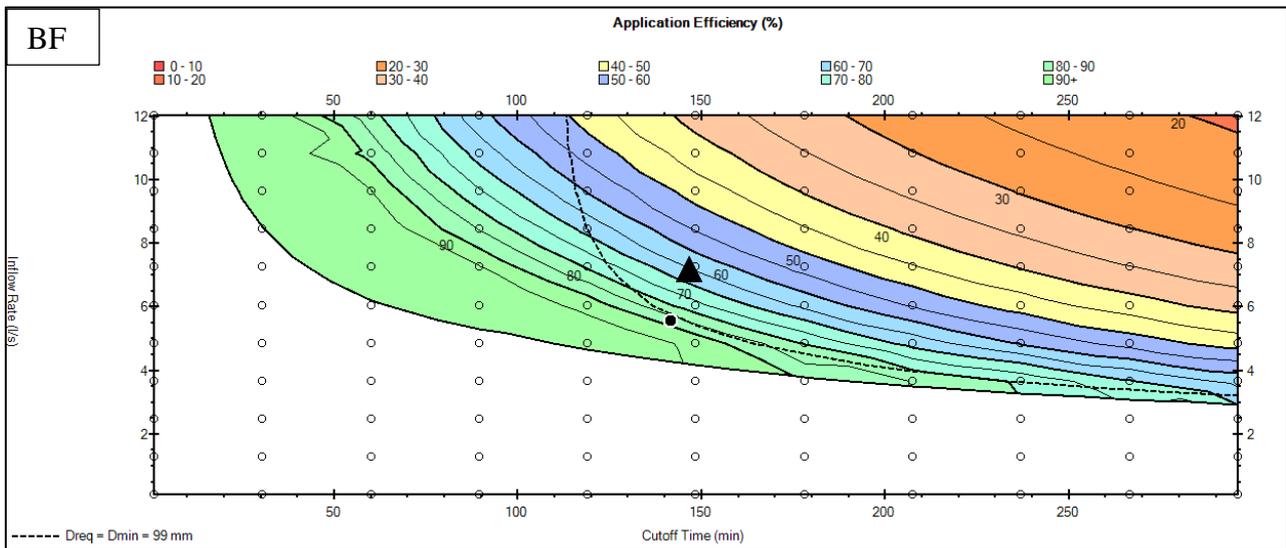
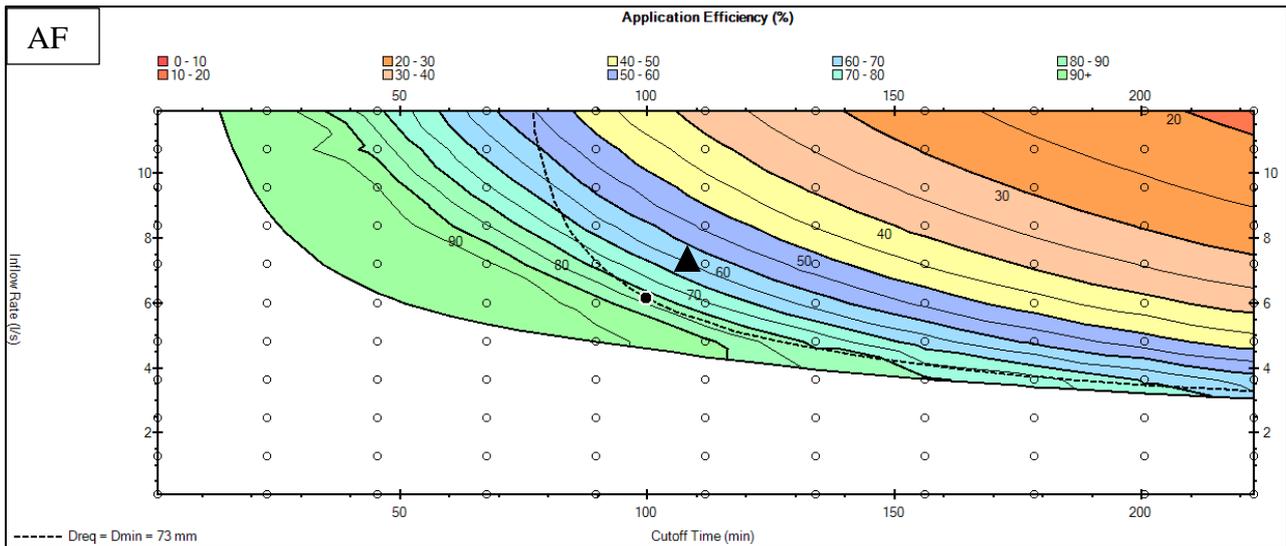
*Técnicas de manejo: RST: Tradicional, RSA: Alterno, RSAD: Alterno Doble, RSP: Pulso.

* AF: Alta frecuencia, 10 días entre riegos, BF: Baja frecuencia, 16 días entre riegos.

*Técnicas de manejo del riego: RSA: riego por surco alterno, RSAD: riego por surco alterno doble, RST: riego por surco tradicional RSP: riego por surco en pulsos.

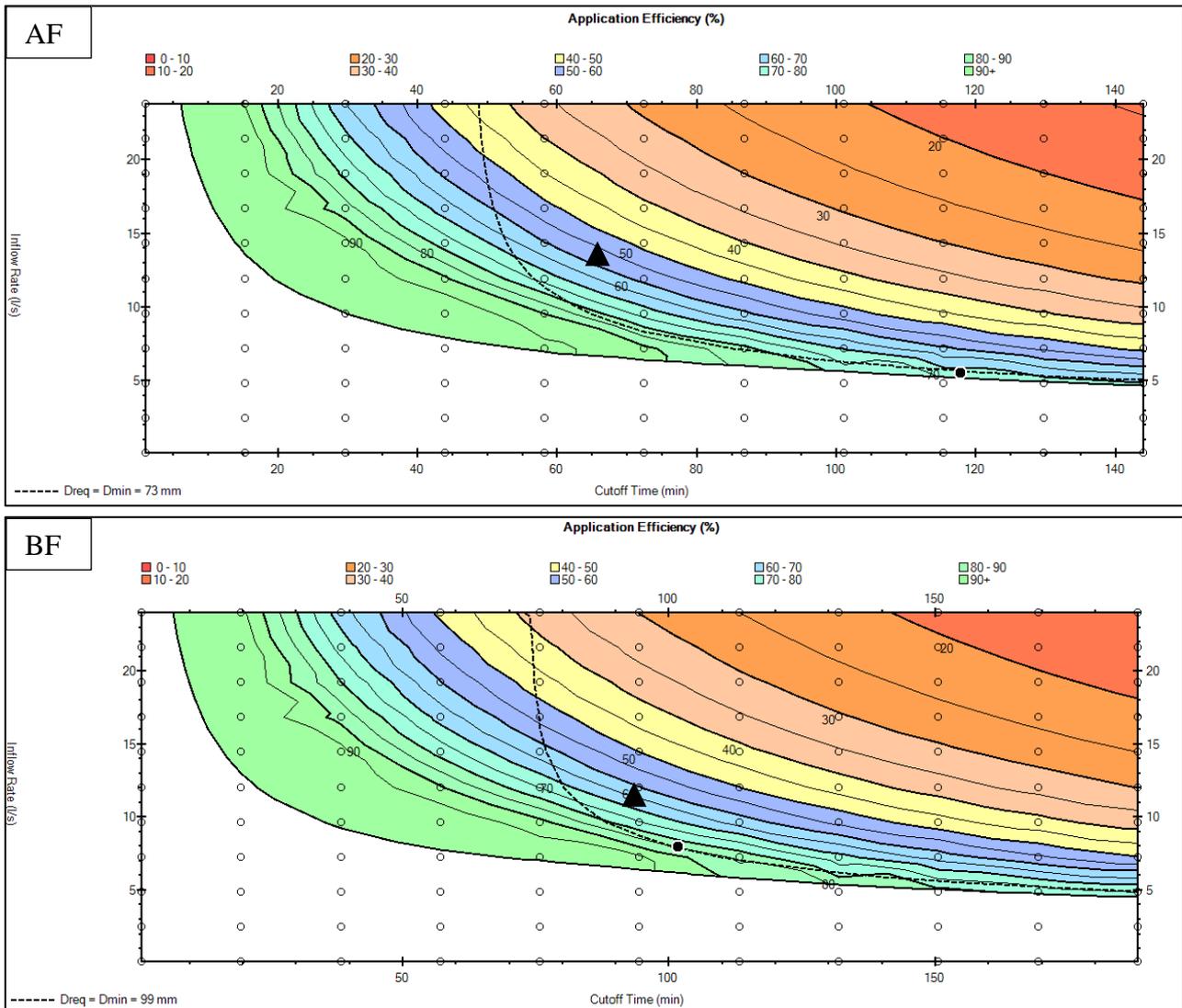
El porcentaje de uniformidad potencial promedio (Figuras 81-88) es la única variable que disminuye en los escenarios de optimización, de 89% a 85 %, la UD disminuyó para poder compensar principalmente los eventos con déficit en RSA, transándose en una EAp menor a la EA (Tabla 33). Existen estudios en donde sugieren mejoras en la UD del 82 al 96% con una metodología de optimización topográfica. González Cebollada y colaboradores (2016) sugieren a través de simulaciones con WinSRFR la mejor pendiente, conjunto de pendientes o forma curva a nivelar para obtener la mejor performance en UD y porcentaje de percolación en riego por superficie.

Con los cambios propuestos se logró una EAL potencial de 100 % (Figuras 81-88), el Pp potencial decrece a 22 %, el rango entre el primer y tercer cuartil fue de 11 y 27% (Figuras 73-80). Los cambios propuestos se reflejan en el cociente de adecuación potencial (ADlq), logró un valor de 1,2 y el rango entre el primer y tercer cuartil estuvo entre 1,1 y 1,2.



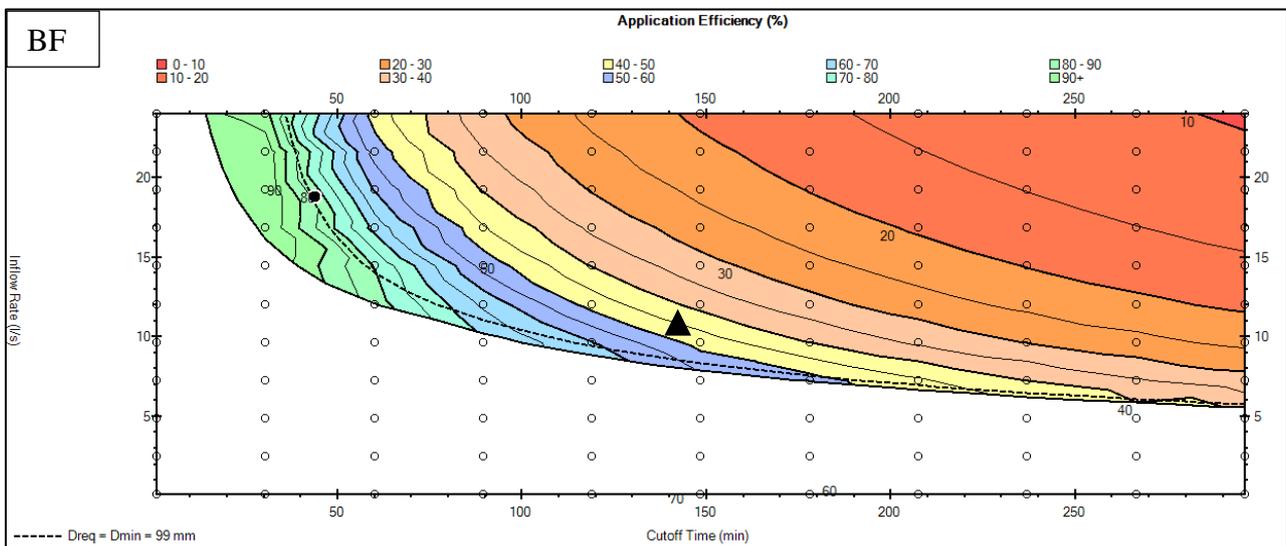
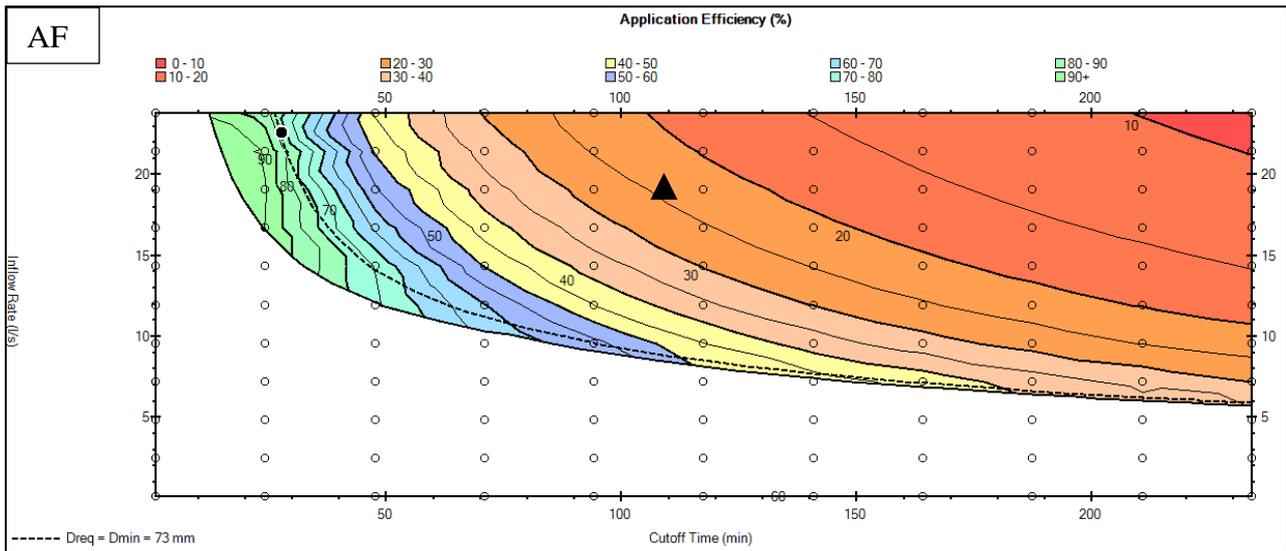
*El círculo negro nos indica el desempeño potencial que se eligió en un abanico de posibilidades de EAp, según la combinación de caudal total en el frente de riego expresado en $L \cdot s^{-1}$ (eje Y) y tiempo de riego en mm (eje X). El triángulo nos indica la EA.

Figura 61: Escenarios de desempeño potencial para RSA en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).



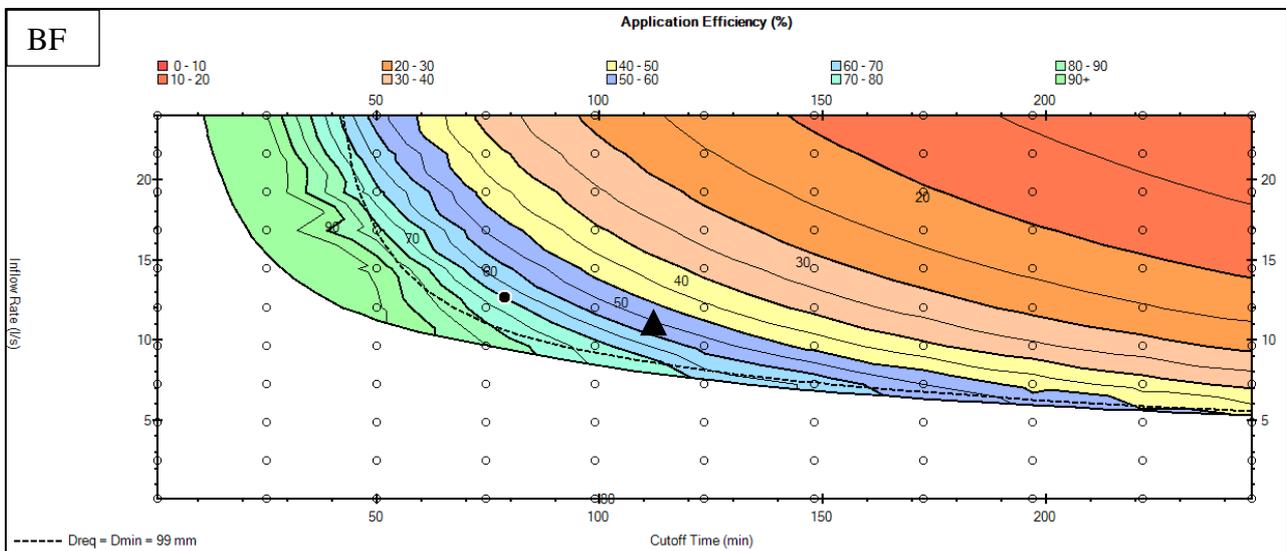
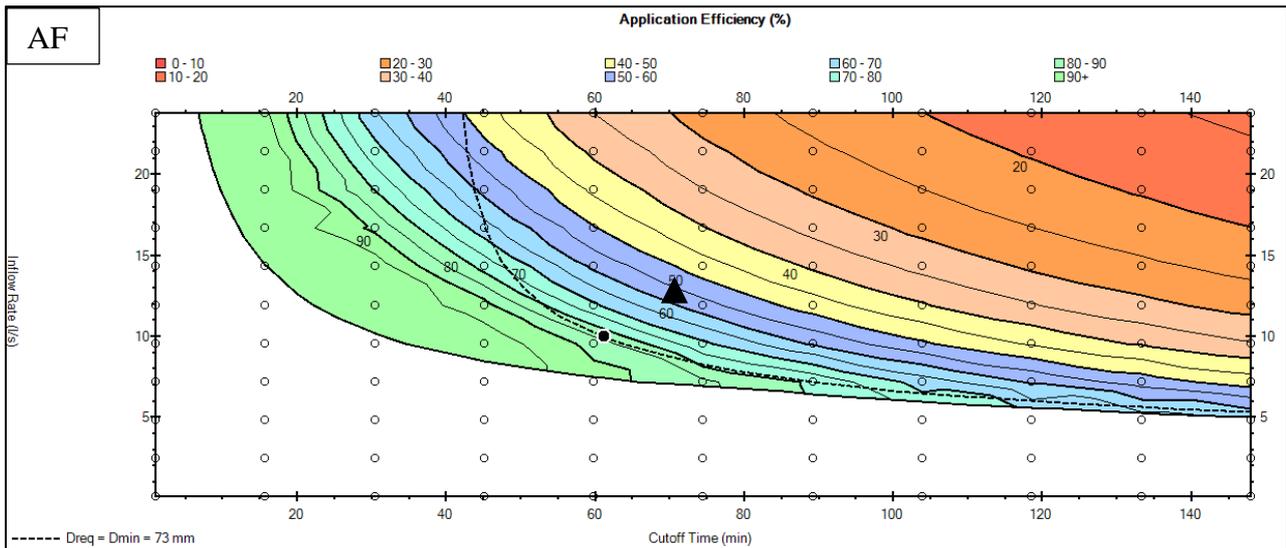
*El círculo negro nos indica el desempeño potencial que se eligió en un abanico de posibilidades de EAp, según la combinación de caudal total en el frente de riego expresado en $L \cdot s^{-1}$ (eje Y) y tiempo de riego en mm (eje X). El triángulo nos indica la EA.

Figura 62: Escenarios de desempeño potencial para RSAD en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).



*El círculo negro nos indica el desempeño potencial que se eligió en un abanico de posibilidades de EAp, según la combinación de caudal total en el frente de riego expresado en $L \cdot s^{-1}$ (eje Y) y tiempo de riego en mm (eje X). El triángulo nos indica la EA.

Figura 63: Escenarios de desempeño potencial para RSP en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).



*El círculo negro nos indica el desempeño potencial que se eligió en un abanico de posibilidades de EAp, según la combinación de caudal total en el frente de riego expresado en $L.s^{-1}$ (eje Y) y tiempo de riego en mm (eje X). El triángulo nos indica la EA.

Figura 64: Escenarios de desempeño potencial para RST en el cuarto riego en AF (05/01/2017) y en el tercer riego en BF (28/12/2016).

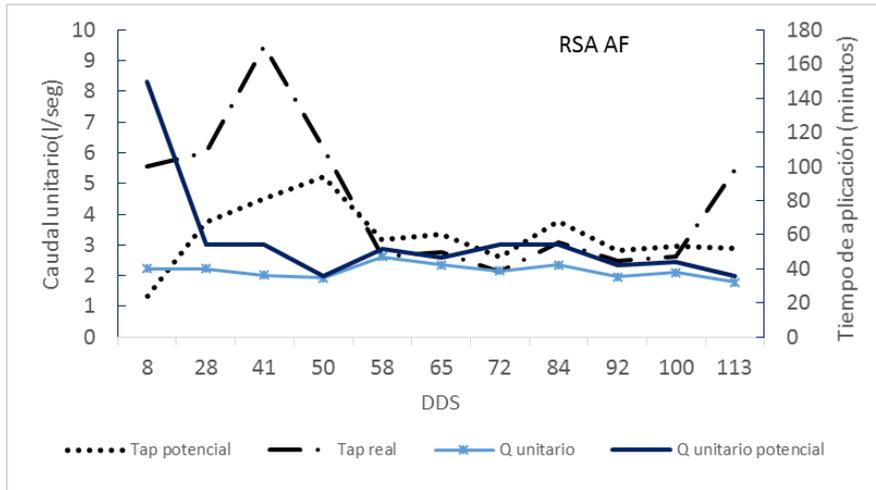


Figura 65: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSA en AF.

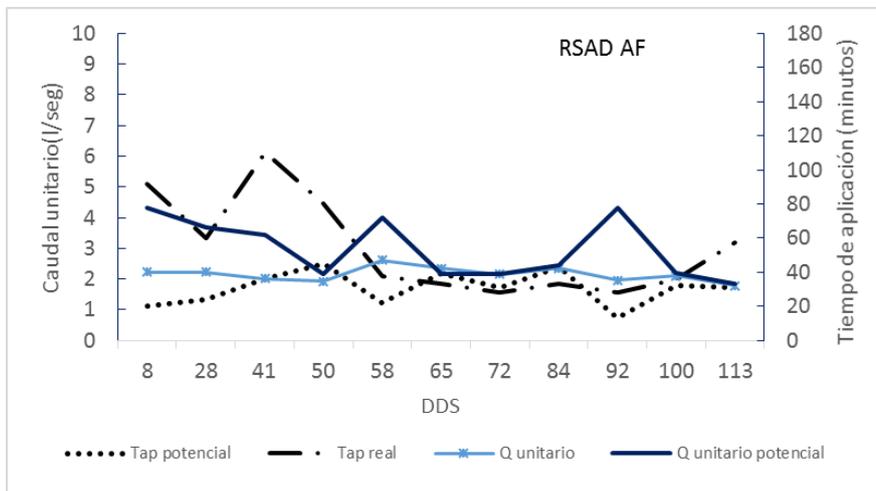


Figura 66: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSAD en AF.

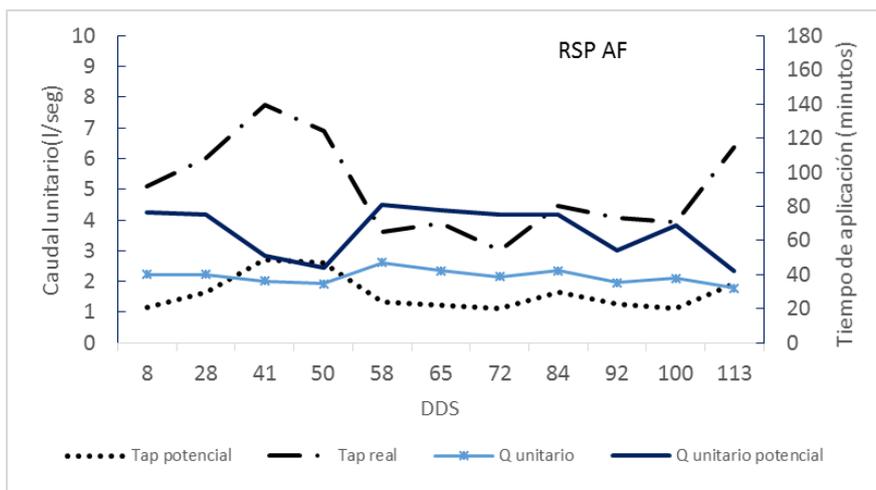


Figura 67: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en AF.

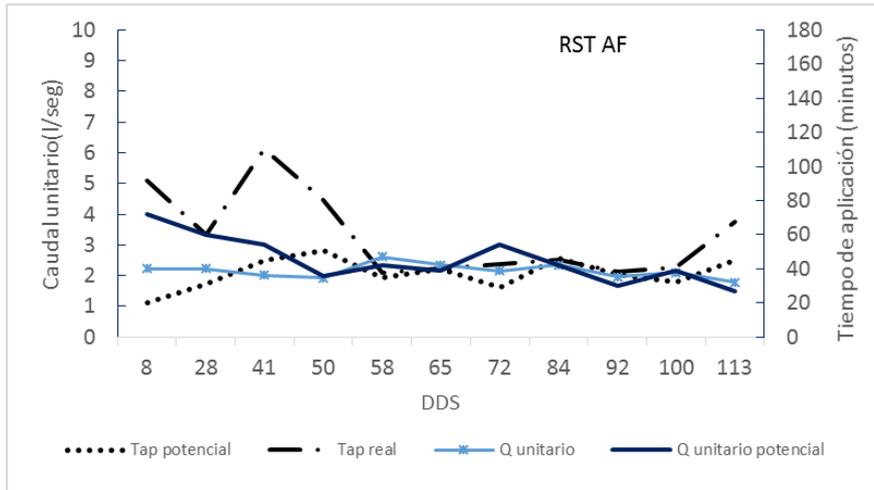


Figura 68: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en AF.

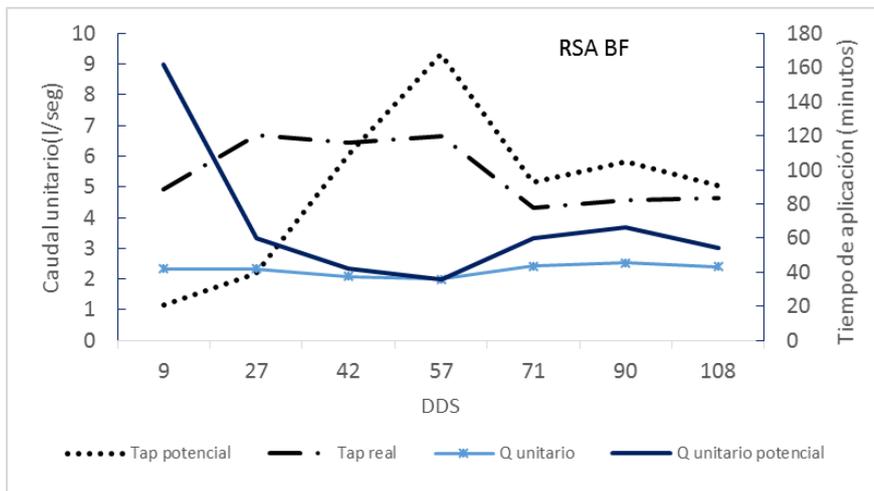


Figura 69: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSA en BF.

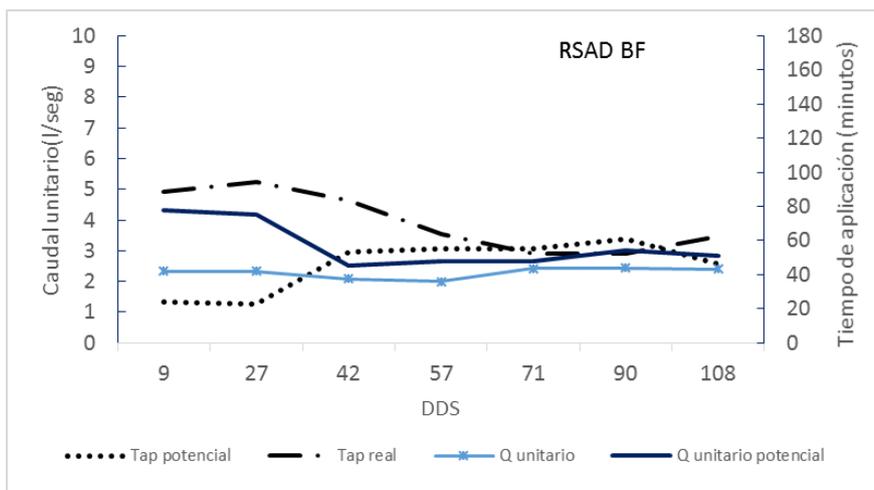


Figura 70: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSAD en BF.

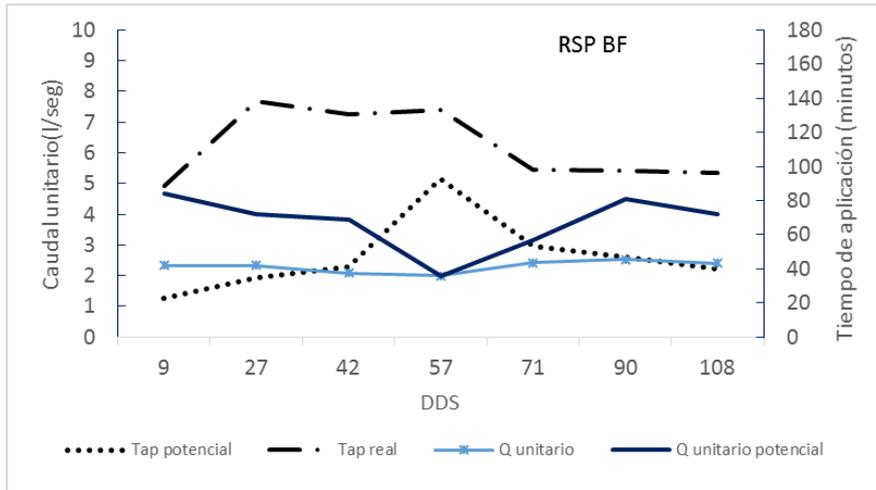


Figura 71: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RSP en BF.

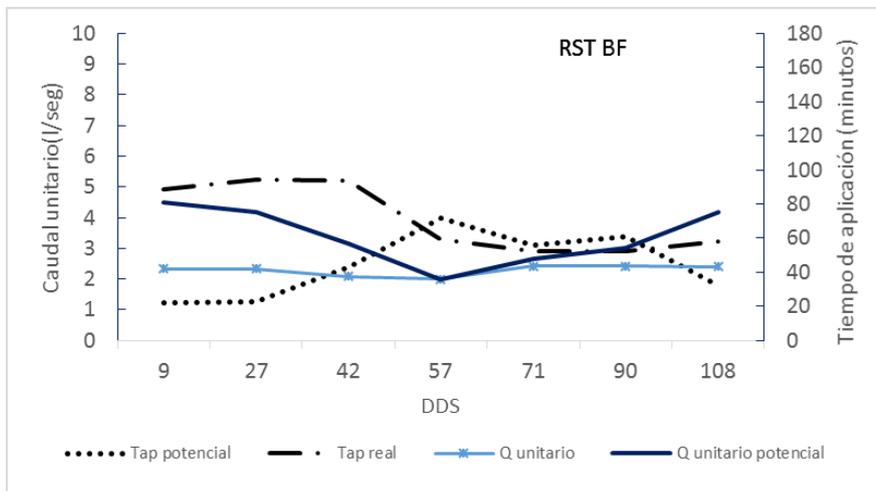


Figura 72: Comparación entre tiempos de aplicación y caudal unitario, reales y potenciales para RST en BF.

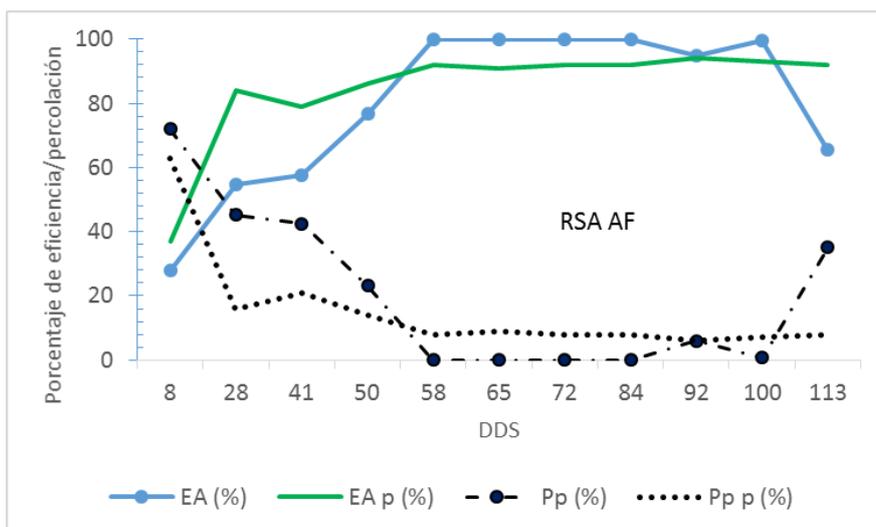


Figura 73: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSA en AF.

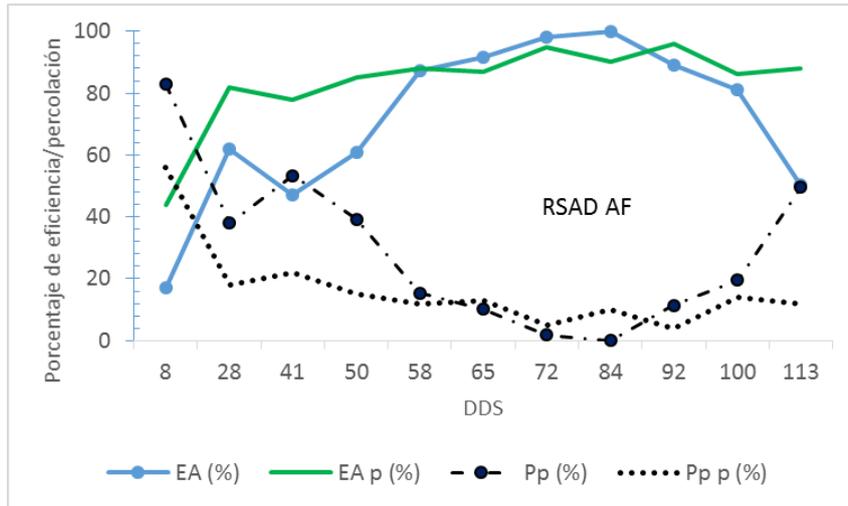


Figura 74: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSAD en AF.

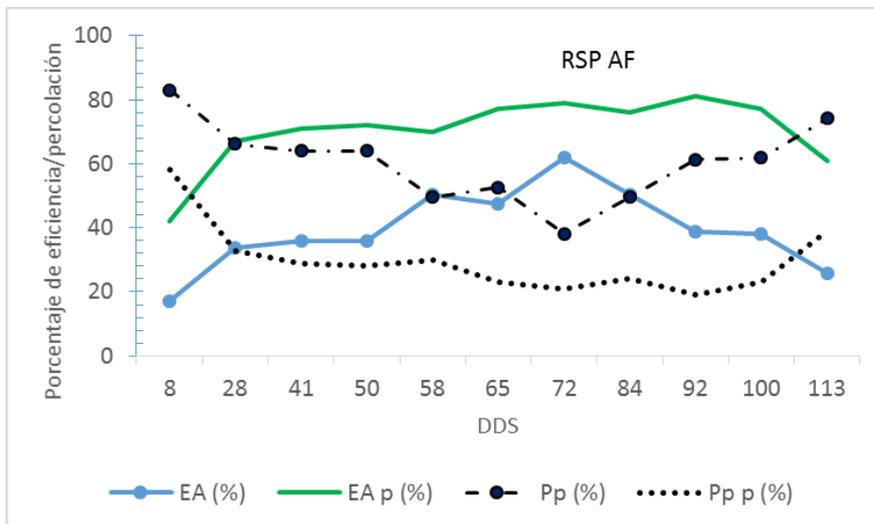


Figura 75: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSP en AF.

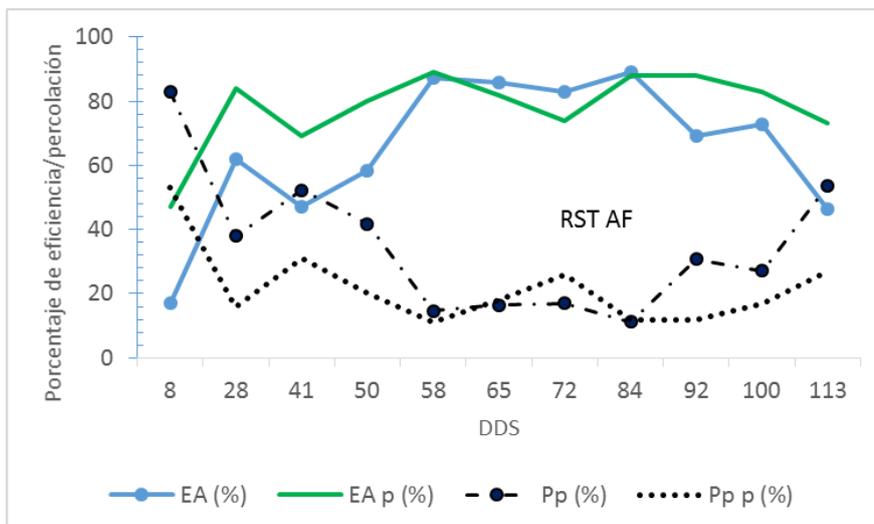


Figura 76: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en AF.

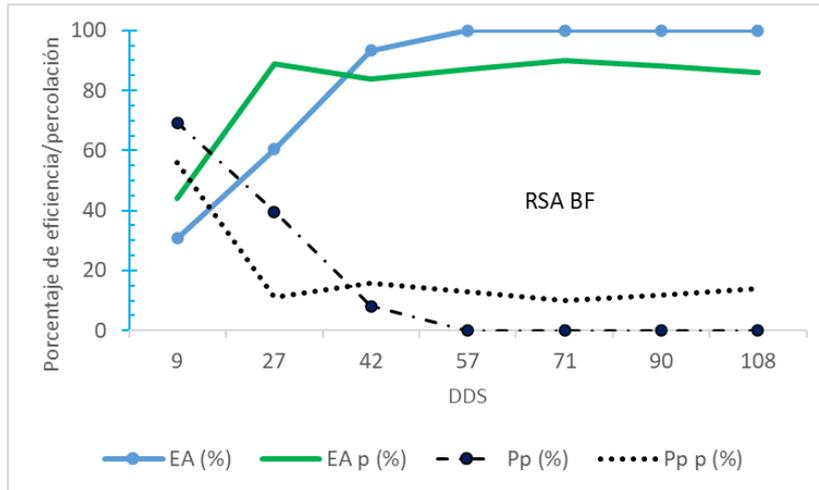


Figura 77: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSA en BF.

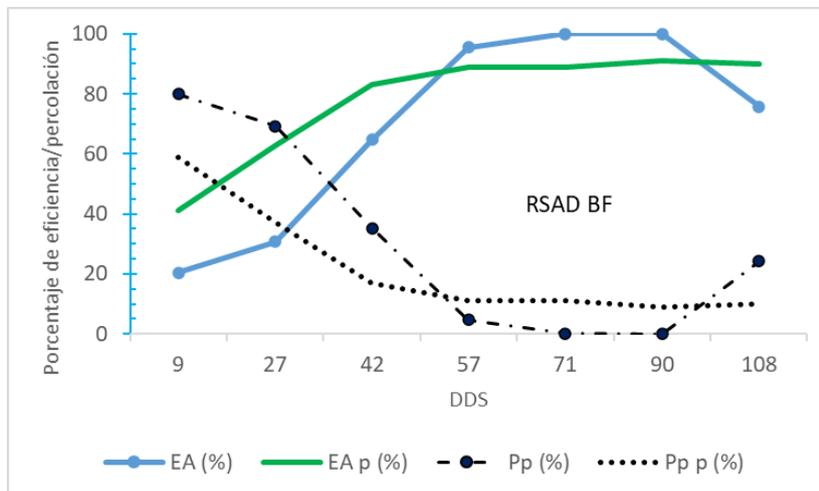


Figura 78: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RSAD en BF.

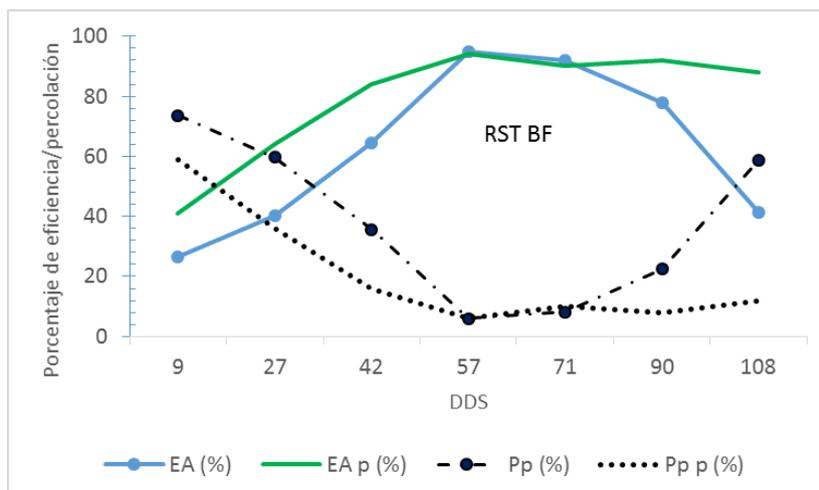


Figura 79: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en BF.

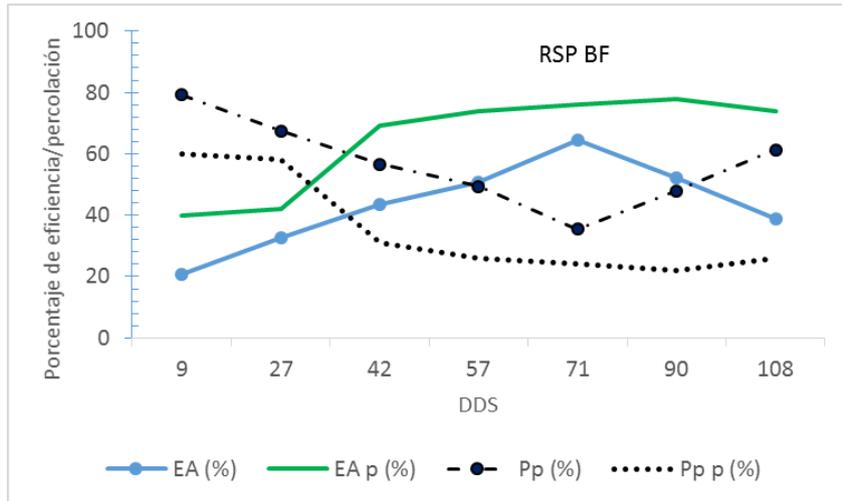


Figura 80: Comparación entre eficiencias de aplicación y porcentajes de percolación, reales y potenciales en RST en BF.

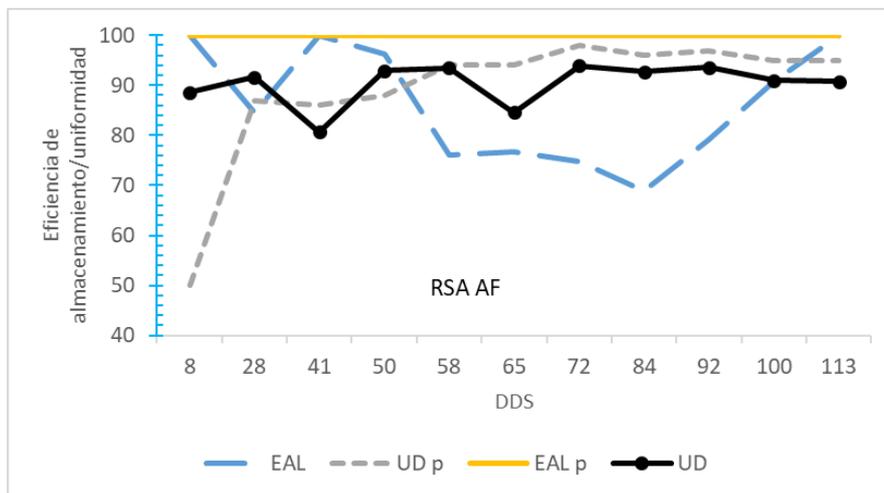


Figura 81: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSA en AF.

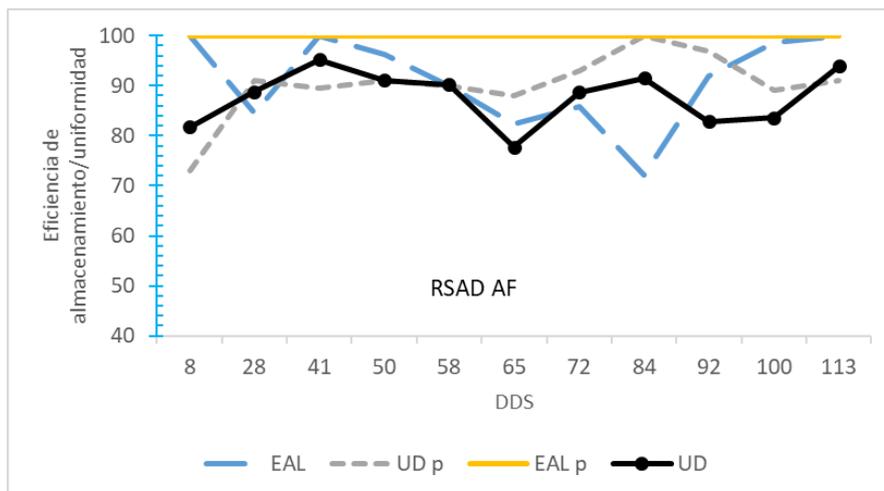


Figura 82: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSAD en AF.

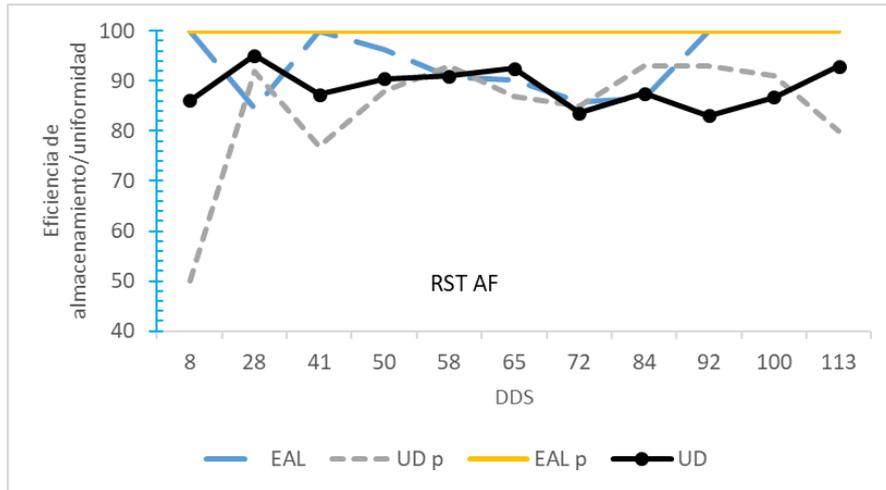


Figura 83: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RST en AF.

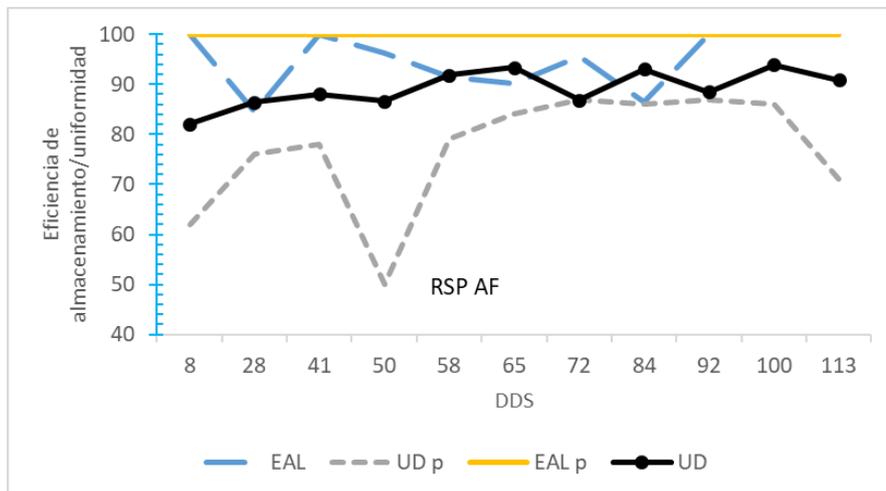


Figura 84: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSP en AF.

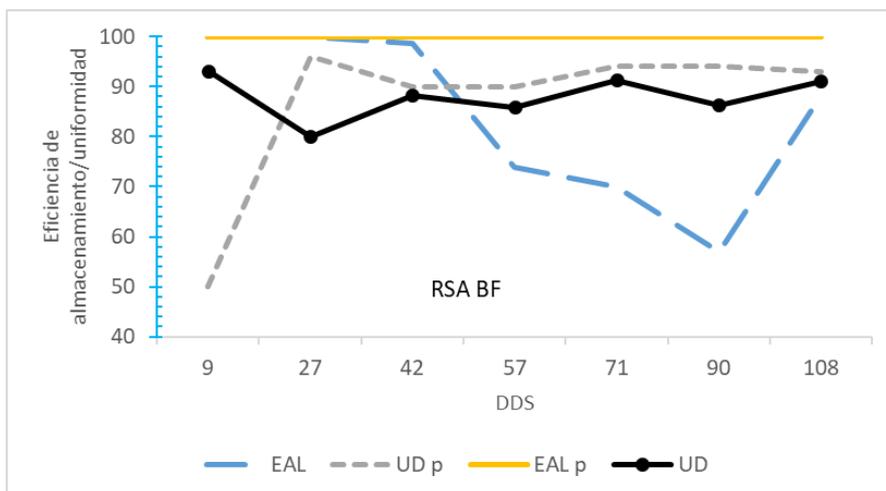


Figura 85: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSA en BF.

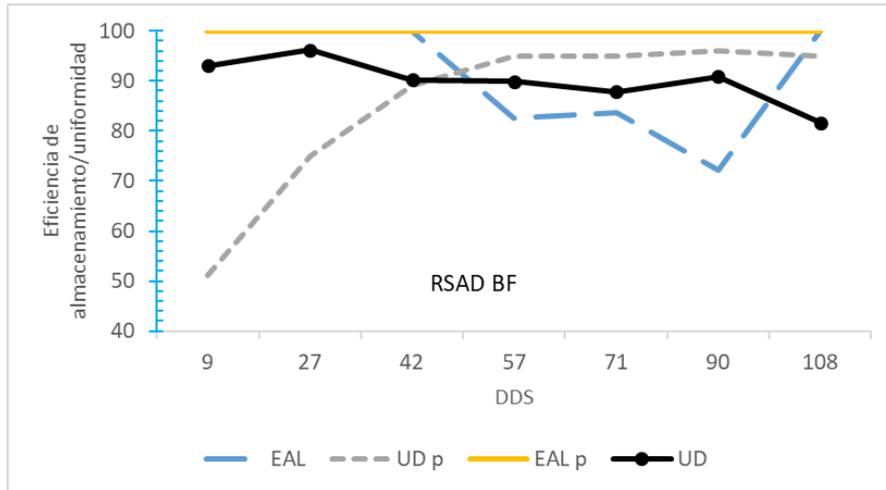


Figura 86: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSAD en BF.

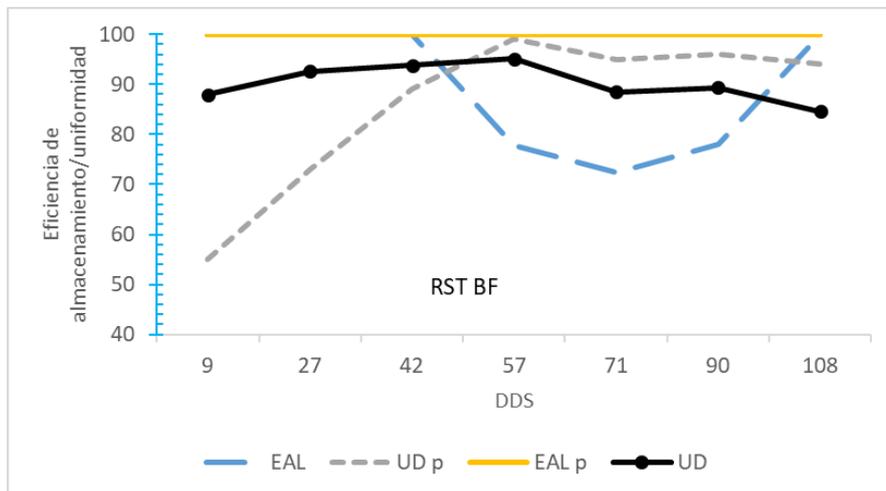


Figura 87: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RST en BF.

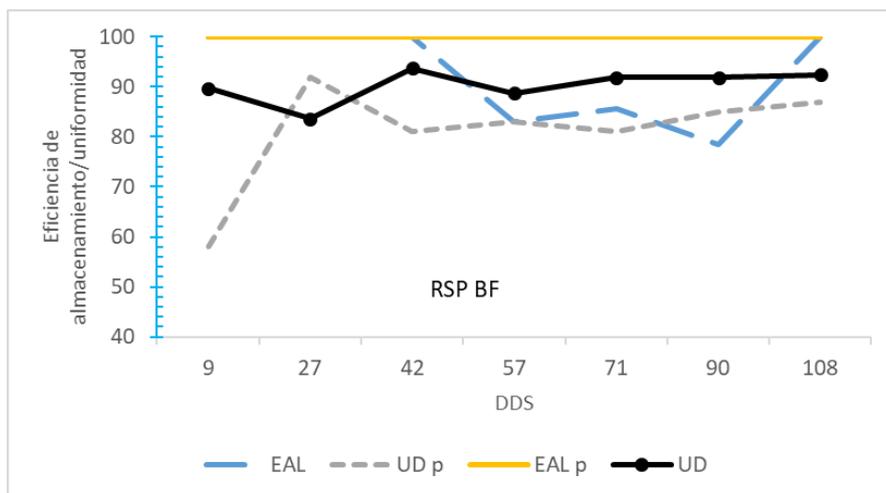


Figura 88: Comparación entre eficiencias de almacenamiento y uniformidad de aplicación, reales y potenciales en RSP en BF.

5.7 Respuesta del cultivo a los diferentes manejos del riego

La temperatura es el factor que mayor importancia tiene sobre la tasa de crecimiento y desarrollo de las plantas, determina la tasa de producción y expansión foliar, en la tabla 34 se presenta la duración y tiempo térmico promedio de los tratamientos.

Tabla 34: Tiempos térmicos y duración en días de las distintas etapas fenológicas del maíz durante la temporada 2016-2017

Fecha	Etapas fenológicas	Duración (días)	Acumulada (días)	TT	TT acumulado
22/11/2016	S-E	6	6	111	111
19/12/2016	E-V6	26	32	553	664
21/1/2017	V6-R1	33	65	763	1427
20/3/2017	R1-R6	58	123	966	2393

*Siendo S: siembra, E: emergencia, V6: sexta hoja expandida; R1: Floración femenina, R6: madurez fisiológica del grano.

La altura de plantas promedio que se registró en el mes de enero (20/01/2017) fue de $1,87 \pm 0,26$ m, varió entre 1,1 y 2,5 m según alternativas de técnica de riego, frecuencia y posición en el surco (cabecera/inicio, medio y pie/final). Existieron diferencias estadísticamente significativas entre posición en el surco (inicio, medio y fin) ($p < 0,0001$) y en el factor frecuencia de riego ($p < 0,0003$). Las plantas con mayor altura se presentaron en la posición de Medio y Pie de surco, y en AF.

Durante la segunda medición (21/02/2017), la altura de plantas promedio fue de 2,83 m con un CV menor, de 8,5 % en un rango de 2 y 3,3 m. Existieron diferencias estadísticamente significativas en función del factor posición en el surco ($p < 0,0001$) y del factor frecuencia ($p < 0,0001$). La posición intermedia en el surco registró en ambas fechas la mayor altura de planta y en cuanto al factor frecuencia, AF obtuvo la mayor altura de planta.

Tabla 35: Alturas de plantas de maíz promedio, según su ubicación en el surco y frecuencia de riego en diferentes momentos del ciclo.

Fecha	Posición	n	Media	DE
20/01/2017	Cabecera/inicio	88	1,75 a	0,24
	Pie/final	88	1,91 b	0,32
	Medio	88	1,91 b	0,19
Frecuencia				
20/01/2017	AF	132	1,92 a	0,26
	BF	132	1,81 b	0,23
Fecha	Posición	n	Media	DE
21/02/2017	Cabecera/inicio	88	2,74 a	0,21
	Pie/final	88	2,77 a	0,27
	Medio	88	2,92 b	0,15
Frecuencia				
21/02/2017	AF	132	2,87 a	0,23
	BF	132	2,75 b	0,22

*Variable analizada: Altura promedio de una planta de maíz (metros).

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$)

*Frecuencias: AF: periodo entre riegos de 10 días, BF: periodo entre riegos de 16 días.

Con respecto al peso seco correspondiente a la suma de hojas y tallo, se encontraron diferencias para frecuencia ($p=0,018$), se observaron 0,18 kilogramos por planta en AF y 0,16 en BF.

El peso hectolítrico presenta un valor promedio de 75 ± 1 kg.h⁻¹, de acuerdo a la norma XII, Resolución SAGyP 1075/94, corresponde a grado 1 en los estándares de calidad de maíz.

El rendimiento de grano promedio fue de 16661 ± 2165 kg.ha⁻¹, dentro de un rango de 12437 a 22016 kg.ha⁻¹. Se encontraron diferencias significativas entre los niveles del factor técnica de riego ($p=0,0002$), estadísticamente separó dos grupos, RSA y RSAD asociados a los mayores valores de rendimiento y en otro grupo RST y RSP. La técnica de RSA presentó el rendimiento máximo de 18953 kg.ha⁻¹ y aplicó la menor LBT (Tabla 36).

Tabla 36: Rendimientos de grano según las técnicas de riego en estudio.

Técnicas	n	Media	DE	LBT (mm)
RSA	12	18953	a	819
RSAD	12	17839	a	1017
RST	12	15805	b	1070
RSP	12	15509	b	1656

*Variable analizada: Rendimiento de grano de maíz (kg.ha⁻¹).

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas (DGC $p \leq 0,05$).

*Técnicas de manejo: RST: Tradicional, RSA: Alterno, RSAD: Alterno Doble, RSP: Pulso.

*LBT: Lámina bruta total aplicada en mm.

El rendimiento obtenido bajo la técnica de RSA de 18900 kg. ha⁻¹ con una EA de 84 % promedio, refuerza el pensamiento de que no existe un mejor método de riego (Pereira & Trout, en 1999), sino sistemas productivos diversos con ventajas y desventajas según su contexto. Motivo por

el cual encontramos análisis de rentabilidad favorables para maíz tanto para métodos presurizados (Wang et al., 2014; Diaz et al., 2007; Domingo et al., 2005) como gravitacionales (Antúnez et al., 2015; Génova et al., 2014; Reinoso et al., 2014).

La variable rendimiento no registró diferencias estadísticas cuando se redujo significativamente la LBT en un 15 %, asociado a un menor número de riegos en BF ($p=0,2434$) (Tabla 37). En otros sistemas de producción de maíz bajo riego gravitacional redujeron hasta un 32% el volumen asignado sin afectar el rendimiento. (Grassini, 2014)

Tabla 37: Rendimientos de grano según frecuencias de riego en estudio.

Frecuencia	n	Media	DE		LBT (mm)	
AF	12	17434	487	a	1202	a
AB	12	16619	487	a	1030	b

*Variable analizada: Rendimiento de grano de maíz ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\text{DGC } p \leq 0,05$)

*AF: Alta frecuencia, 10 días entre riegos, BF: Baja frecuencia, 16 días entre riegos.

*LBT: Lámina bruta total aplicada en mm.

No se encontraron diferencias para el factor posición en la longitud del surco ($p=0,4720$) (Tabla 38). A pesar de no encontrar diferencias significativas para el factor posición, se observó que el mayor valor de rendimiento se encuentra en la posición intermedia en la longitud de surco y coincide con la posición de mayor altura de planta. (Tabla 35)

Tabla 38: Rendimientos de grano según la posición en el surco de riego.

Posición en el surco	n	Media	DE		Máximo	Mínimo
Inicio/Cabecera	16	16724	2341	a	13650	21072
Intermedio	16	17550	2457	a	12872	22016
Final/Pie	16	16800	2352	a	12437	21615

*Variable analizada: Rendimiento de grano de maíz ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

*DE: Desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($\text{DGC } p \leq 0,05$)

La eficiencia de uso del agua de riego (EUA) promedio fue de $1,63 \pm 0,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, varió entre $0,75$ y $2,59 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ según alternativas de técnica de riego y frecuencia. La EUA decreció cuando la LBT superó la LRT de 648 mm, sucedió en todos los niveles hídricos analizados (AF y BF), Figura 89).

Existieron diferencias estadísticamente significativas en función de las técnicas de riego ($p < 0,0001$) (Figura 90) para EUA, y con un valor-p menor que en función de la frecuencia de riego ($p = 0,0235$), $1,57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en AF y $1,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ en BF.

Las diferencias más contundentes se observaron en el factor técnica de riego para EUA, en donde se encontraron diferencias estadísticas entre las 4 propuestas, específicamente, $2,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para RSA, $1,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para RSAD, $1,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para RST y $0,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para RSP (Figura 90). Otros autores

han encontrado para técnicas de riego por surco en maíz valores del orden de 1,15-3,04 kg.m⁻³ (Reinoso, 2014), 1,5-2 kg.m⁻³ (Montemayor Trejo *et al.*, 2012), 2,7 kg.m⁻³ (Kang *et al.*, 2000) y valores similares en condiciones de secano 0,82 y 1,69 kg.m⁻³ (Díaz Valdés, 2014).

La práctica de RSA permitió aumentar un 30% la EUA por sobre el RST, con diferencias significativas entre ambas técnicas, otros autores registraron aumentos de 25% en variedades de frijol (Webber *et al.*, 2006), aunque en otras regiones de España no se registraron aumentos significativos para un cultivo de maíz (Arbat *et al.*, 2009). Kang y colaboradores (2000) compararon en maíz dos alternativas de RSA (con surcos fijos y variables), encontrando diferencias significativas en EUA con respecto al RST entre 20 y 40%. En el presente estudio si consideramos la combinación de RSA y BF la EUA aumentó un 40% por sobre el RST.

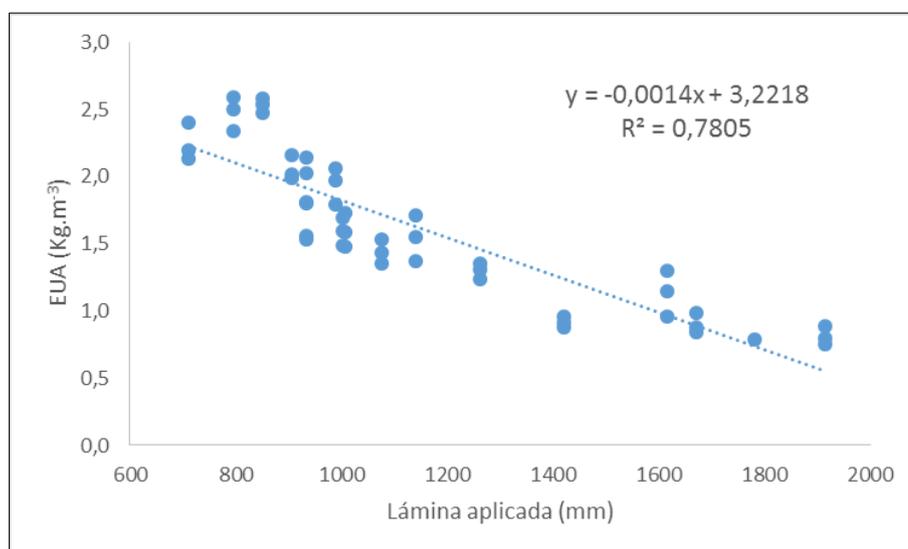


Figura 89: Relación entre la eficiencia de uso de agua y las diferentes láminas aplicadas según propuesta de técnica de riego y frecuencia durante el ciclo de cultivo de maíz 2016-1017.

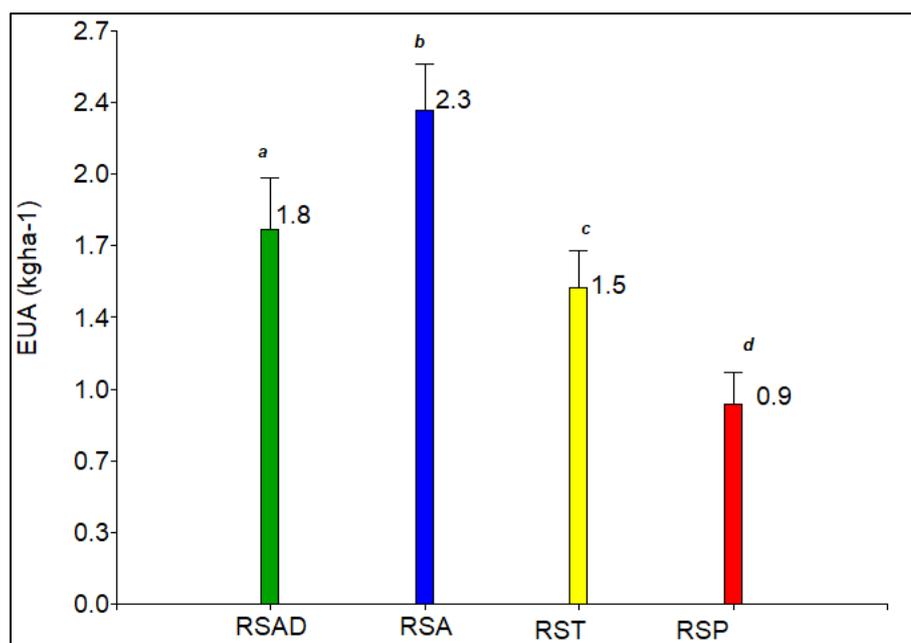


Figura 90: Valores promedio de eficiencia en el uso del agua para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.

La productividad del agua (PA) promedio fue de $2,61 \pm 0,36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, como se observa en la línea de corte del eje y (Figura 91), varió entre 1,91 y $3,38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, según técnica y frecuencia de riego. En el eje x se presenta la lámina promedio aplicada en milímetros durante el ciclo de cultivo a través de la línea de corte (1116 mm), en el cuadrante superior derecho de la Figura 91 se encuentran RSA, y RSAD, como las alternativas que obtuvieron la mayor conversión de agua a grano, partiendo de una misma demanda evapotranspiratoria de 648 mm y de una lámina aplicada que varió entre 700 y 1900 mm.

Si se compara el comportamiento de la PA a través del rendimiento vs la lámina aplicada, se obtuvo una tendencia negativa (Figura 91). Si se considera que la lámina aplicada como mínimo cubrió el requerimiento y que la percolación por encima de la lámina promedio aplicada presentó valores de 37 a 76%, nos muestra una posible modificación del complejo de nutrientes que se manifestaría en las diferencias significativas en la variable rendimiento.

La productividad del agua se rige fisiológicamente por los parámetros de crecimiento y producción del cultivo. Los procesos de consumo de agua (transpiración) y asimilación (biomasa, rendimiento) de los cultivos están fuertemente vinculados, ya que ambos dependen de los estomas de la planta. Los valores de PA se determinan principalmente por: (i) el tipo de cultivo y la genética del cultivo (por ejemplo, C3, C4, MAC, etc.); (ii) disponibilidad de nutrientes en el ciclo de crecimiento del cultivo, y (iii) técnicas de riego. (Van Halsema & Vincent, 2012).

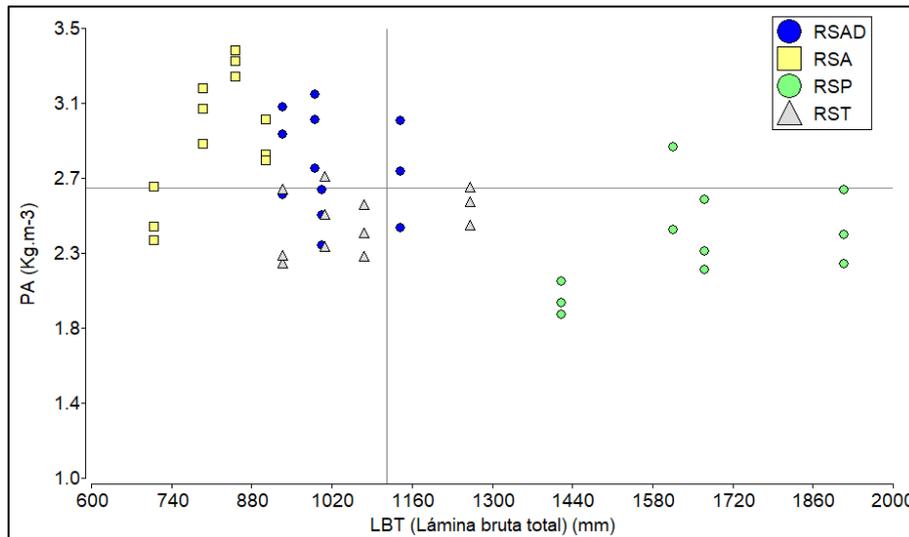


Figura 91: Valores promedio de productividad de agua (PA) y de lámina aplicada durante el ciclo de cultivo para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.

Las técnicas de riego tomaron relevancia en PA ya que existieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0026$), sin encontrarse diferencias para el factor frecuencia ($p = 0,2248$). Se agruparon con los mayores valores de PA: RSA y RSAD, es decir producen más kilos de granos con la misma cantidad de agua evapotranspirada. (Figura 92).

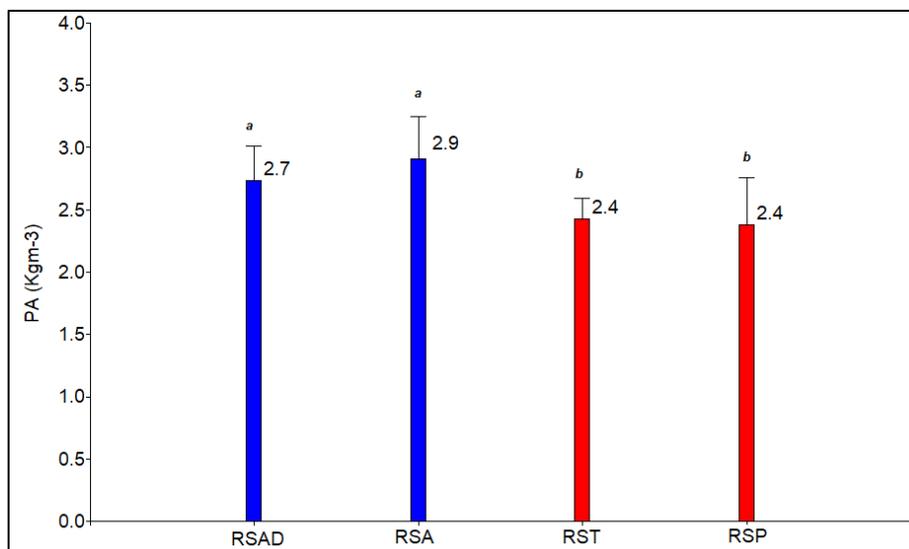


Figura 92: Valores promedio de Productividad del agua para las técnicas de riego: RSA, RSAD, RST y RSP.

Si comparamos técnicas de riego sin diferencias estadísticas en LBT, como RSAD y RST, 1017 y 1070 mm, respectivamente, se encontraron diferencias estadísticas en EUA, PA, rendimiento (Figura 90, 92 y Tabla 36). Considerando las condiciones de uniformidad del estudio en cuanto al

plan de fertilización y utilización de un único híbrido de maíz para todos los tratamientos, los resultados evidencian una influencia de las técnicas de riego por surco alterno respecto de la dinámica de nutrientes del suelo (Van Halsema & Vincent, 2012).

Otros estudios demuestran que un cambio de método de riego por superficie a riego por aspersión para el cultivo del maíz, permitió mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno por disminuir las pérdidas por lixiviación de nitrógeno (Olivé *et al.*, 2005). Los resultados del presente estudio relacionan el mayor rendimiento en RSA (Tabla 36) con la menor lámina percolada (23%) (Tabla 26).

La aplicación de cantidades excesivas de fertilizantes nitrogenados (N) para garantizar una alta cosecha es cada vez mayor (Wang *et al.*, 2010). La aplicación excesiva de N y una gestión irrazonable del agua llevaron a la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas y superficiales (Arauzo *et al.*, 2003). Tanto la gestión del agua como del N asociado al agua deben considerarse cuando el objetivo es un alto rendimiento con un mínimo de agua y un mínimo deterioro del sistema (Wang *et al.*, 2014). Motivo por el cual estudiar técnicas que permitan desarrollar un cultivo con mínimas pérdidas de agua y nutrientes es fundamental.

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados obtenidos se elaboran las siguientes conclusiones:

La descripción general para un ciclo de 125 días de maíz permite fortalecer la información sobre el riego por surco en el valle Inferior del río Negro y predecir un posible comportamiento del riego gravitacional en los suelos del valle con mayor precisión. La lámina de reposición fue de 648 mm, mientras que la lámina requerida promedio por riego fue de 72 mm y la lámina aplicada por evento de 135 mm. Los riegos se concretaron en un tiempo de aplicación de 77 minutos y con una velocidad de avance promedio de 14 metros por minuto.

En las condiciones del estudio: suelo franco limoso, pendiente de 0,036%, surcos sin desagüe al pie de 100 metros, caudal unitario promedio de $2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, tiempo de corte de riego establecido cuando el agua llegue al final (pie de surco) en la mitad de los surcos bajo riego; el RSA fue la técnica que menor cantidad de agua aplicó en el ciclo de cultivo (819 mm) y derivó en la menor pérdida por percolación total (171 mm), siendo muy interesante para la zona ya que en promedio solo percoló un 20 % e implicó una reducción en los milímetros aplicados con respecto al resto de las técnicas de 29 %.

Se validó la primera hipótesis parcialmente, se logró una EA promedio superior al 70% bajo la premisa de riego gravitacional en la técnica por surco alterno, 84% de EA en RSA y 70% en RSAD, no así en RSP. El RSP presentó los mayores valores de lámina bruta aplicada (1656 mm) y por lo tanto de lámina percolada (1043 mm), que se reflejó en una EA promedio de 40%.

Los resultados obtenidos no coinciden con la hipótesis en RSP, debido a la metodología empleada, el agua no infiltraba por completo al ingresar un nuevo pulso o ciclo, se producían solapamientos en los sucesivos pulsos y el proceso de receso solo se registró cuando finalizó el último pulso. Es importante considerar el bajo desempeño de riego logrado en las condiciones del estudio, ya que nos demuestra que el riego en pulso en sí mismo no mejora la EA, si no está acompañado de una correcta planificación de los tiempos de avance en cada ciclo, ya sea por automatismo o de forma manual como en el presente estudio.

A partir del conjunto de evaluaciones durante el ciclo de cultivo, la EA promedio fue de 63%, mientras que la EA global, es decir sin realizar un promedio de las evaluaciones individuales de los riegos, fue de 61%.

Con respecto a la lámina almacenada, todos los tratamientos presentaron valores iguales o superiores a la lámina requerida u objetivo, la EAL fue superior al 90% y la UD que acompañó a los riegos también fue mayor al 90 %.

La EUA separó significativamente las 4 técnicas propuestas, RSA con el mayor valor, 2,3 kg.m⁻³, luego RSAD, 1,8 kg.m⁻³, RST 1,5 kg.m⁻³ y RSP 0,9 kg.m⁻³. La técnica de RSA permitió aumentar un 30% la EUA por sobre el RST y si consideramos la combinación de RSA y BF, la EUA aumentó un 40% por sobre el RST.

Se agruparon estadísticamente con los mayores valores de PA y rendimiento: RSA y RSAD, es decir producen más kilos de granos con la misma cantidad de agua evapotranspirada. El rendimiento promedio general fue de 16661 kg.ha⁻¹, las técnicas de RSA y RSAD expresaron un rendimiento superior en un 20% a la media.

Se validó la segunda hipótesis parcialmente: las técnicas de riego gravitacional que logran una mínima lámina de percolación se asocian con los mayores rendimientos. El rendimiento y la percolación presentaron una correlación negativa significativa en ACP (-0,71 y $p < 0.01$), la EUA y PA vinculadas al rendimiento también presentaron una tendencia negativa cuando aumenta la LBT por sobre la LRT. Si comparamos el ADIq, se observó que la técnica calificada como adecuada (valor cercano a 1) coincide con los valores más altos de EUA, PA y rendimiento de grano. La técnica de RSA presentó un ADIq de 1,08 que evidenció un equilibrio entre el agua requerida y aplicada, y se vinculó con el mayor valor de EUA, 2,3 kg.m⁻³, de PA 2,9 kg.m⁻³ y de rendimiento de grano 18900 kg.ha⁻¹. Pero si comparamos técnicas de riego sin diferencias estadísticas en LBT, como RSAD y RST, 1017 y 1070 mm, respectivamente, es decir sin diferencias en la lámina percolada, presentaron aun así diferencias estadísticas en EUA, PA y rendimiento. Considerando las condiciones de uniformidad del estudio en cuanto al plan de fertilización y utilización de un único híbrido de maíz para todos los tratamientos, los resultados evidencian una influencia de las técnicas de riego por surco alterno respecto de la dinámica de nutrientes del suelo.

Se validó la tercera hipótesis: una baja frecuencia de riego (BF) no disminuye estadísticamente el rendimiento del cultivo, pero aumenta la eficiencia de uso de agua con respecto a una alta frecuencia de riego (AF). Las frecuencias de riego bajo estudio, no registraron diferencias estadísticas en el rendimiento de grano y una reducción moderada del agua de riego de 15%, asociada a BF, permitió aumentar un 10% la EUA, 1,57 kg.m⁻³ en AF y 1,7 kg.m⁻³ en BF.

De manera general se evidenció un mayor peso de las técnicas de riego (RSA, RSAD, RSSP, RST) por sobre las frecuencias de riego (AF y BF) a través del ACP y de forma específica con los p-valores de significancia para las variables analizadas: EA, EUA, UD, Pp, EAL, ADIq y rendimiento.

Los escenarios planteados con el software WinSRFR permitieron aumentar un promedio de 16 %, la EA ascendiendo de 63% a una EA potencial del 78%, en términos generales a través de un aumento del caudal unitario de 57% y una disminución en el tiempo de aplicación del 40%. El modelo de simulación utilizado fue apropiado para interpretar las evaluaciones de riego realizadas, como así también para definir escenarios de optimización en los sistemas de riego evaluados.

El riego gravitacional bajo la técnica RSA aplicó una lámina promedio de 817 mm, cuando la lámina requerida fue de 648 mm, por lo tanto percoló un 20% y alcanzó un rendimiento de 18900 kg. ha⁻¹, en un contexto mundial donde la dependencia energética aumenta sus costos, este sistema permitió desarrollar un cultivo con rendimiento potenciales, mínimos costos de inversión y sin consumo de energía.

Consideraciones a partir de los resultados para futuras investigaciones:

Extender los estudios a otras especies de la región y/o ambientes.

Estudiar la heterogeneidad de aplicación de agua en interacción con otros factores como: sanidad y competencia con otras especies vegetales, sobre todo en las técnicas de riego alterno.

Desarrollar el análisis de crecimiento del cultivo en general y en particular en el desarrollo radicular, según la dotación de agua. Los estudios al respecto fortalecerán la variación en el rendimiento y PA frente a las técnicas de riego.

Estudiar la influencia de las técnicas de riego por surco alterno respecto de la dinámica de nutrientes del suelo, sobre todo vinculado al uso de fertilizantes nitrogenados.

Realizar nuevos estudios de la técnica de RSA y RSAD: comparaciones con surcos de riego fijos y variables, analizar el efecto del RSA en relación a las variables físicas de suelo, aplicar el RSA desde la etapa inicial de germinación del cultivo y ampliar a otras condiciones del valle Inferior como: largo de surco, pendiente, textura del suelo, etc. Incorporar en RSAD la reconfiguración de surcos durante el mismo ciclo, disminuyendo así el efecto de deformación de los mismos por el Qu que implica.

Realizar nuevos estudios de la técnica de RSP, ya sea con el automatismo de una válvula de riego con programador o con nuevas metodologías para estimar los ciclos de riego.

Implementar y validar a campo los diferentes escenarios de optimización del riego por superficie que se plantearon para las diferentes técnicas de riego (RSA, RSAD, RST, RSP).

Continuar con el estudio hacia una agricultura con mayor presión a través del uso de sensores FDR, Watermark y EM38-mk2 en suelos de la región, además de complementar con estudios de suelo en general que permitan aumentar la confiabilidad en los valores obtenidos.

BIBLIOGRAFIA

7. BIBLIOGRAFIA

- Allen, RG, Pereira, LS, Raes, D. & Smith, M.** 1998. Evapotranspiración de cultivos: directrices para calcular las necesidades de agua de los cultivos. Papel de riego y drenaje de la FAO 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.
- Andrade, F.; A. Cirilo; S. Uhart & M. Otegui.** 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial la Barrosa. Balcarce. 292 pp.
- Antúnez, A., Vidal, M., Felmer, S., & González, M.** 2015. Riego por pulsos en maíz grano. Biblioteca digital CEDOC-CIREN Boletín, 312.
- Arauzo, M., Díez, J. A., Hernáiz, P., & del Rey, A.** 2003. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Estudios en la Zona no Saturada del Suelo. Vol VI. Barcelona.
- Arbat, G.; Olivé, F.D.; Roselló, A.; Puig-Bargués, J. & Ramírez de Cartagena, F.** 2009. 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. Vol IX. Barcelona.
- Arbat G., M. Duran-Ros, J. Puig-Bargués, J. Barragán & Ramírez de Cartagena, F..** 2008. Evaluación del riego por superficie en la producción de planta ornamental en la Comunidad de Regantes Acequia Vinyals. Congreso Internacional de Riego. Zaragoza.
- Antúnez, A.; Vidal, M.; Felmer, S P. González, M.** 2015. “Riego por Pulsos en Maíz Grano”. Rengo, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 312, 114 pp.
- Bacigaluppo, S; G Gerster & F Salvagiotti.** 2017. Ecorregión Pampeana, centro-sur de Santa Fe. Sistema productivo: agrícola continuo. En: Ediciones INTA. Manual de indicadores de calidad del suelo para las Ecorregiones de Argentina. 259-266 pp.
- Basualdo, A.; E. H. Berbery; C. Hidalgo; D. Dadamia; A. Soldano; R. De Ruyver; F. Bert; M. E. Fernández Long; C. Bruscantini; S. Cañás; F. Claus; M. E. Dillon; L. Ferreira; L. Frulla; C. Gonzalez Morinigo; Y. García Skabar; F. Grings; D. Herdies; M. Holzman; H. Karszenbaum; J. Mattos; O. V. Müller; S. Occhiuzzi; M. Pasten; G. C. Pujol; S. Righetti; R. Rivas; C. Saulo; L. Sgroi & Spennemann, P.** 2016: El proyecto “JASMIN”, Joint Assessment of Soil Moisture Indicators for southeastern South America. Disponible en: <http://repositorio.smn.gob.ar/discover>.
- Balzarini, M.; R., Macchiavelli; F., Casanoves, F.** 2005. Aplicaciones de modelos mixtos en agricultura y forestería. Notas de Clase. Curso Internacional Aplicaciones de Modelos Mixtos en

Agricultura y Foresteria. CATIE. Turrialba, Costa Rica. Mimeo. 189 pp. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193024447002.pdf>

Bautista, E., Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S. & Schlegel, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management* 96:1146–1154.

Bautista E. and Walker W. R. 2010. Advances in estimation of parameters for surface irrigation modeling and management". 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona, USA IRR10-9643. doi:10.13031/2013.35863.

Bautista, E., Schlegel, J.L. & Strelkoff, T.S. 2012. WinSRFR 4.1 - User Manual. USDA-ARS Arid Land Agricultural Research Center. 21881 N. Cardon Lane, Maricopa, AZ, USA.

Bos, M. & J. Chambouleyron. 1998. Parámetros de desempeño de la agricultura de riego en Mendoza, Argentina. Instituto Internacional del manejo del agua, Serie Latinoamerica: N° 5.111 p.

Burt, C. M.; Clemmens, A. J.; Strelkoff, T. S.; Solomon, K. H.; Bliesner, R. D.; Hardy, L. A.; Howell, T. A. & Eisenhauer, Dean E. 1997. Irrigation Performance Measures: Efficiency and Uniformity. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications* 38.

Carreño, S., & Humberto, S. 2000. Evaluación económica y comparación de tres métodos de riego para 7, 6 hectáreas de manzano (*Malus domestica*) en la Sexta Región. Proyecto de Título, Ing. Civil Agrícola, Universidad de Concepción. Fac. Ing. Agríc. Chillán, Chile.

Caviglia, O.P., V.O. Sadras, & Andrade F.H. 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas. I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat–soybean. *Field Crops Res.* 87:117-129.

CIL – AYEE. 1988. Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Informe técnico.

Chambouleyron J. & Morábito J. 2008. El Riego en Argentina. Publicación interna INA – Mendoza.

Chambouleyron J. & Morábito J. 1982. Evaluación del riego en fincas. INCyTH-CRA, Mendoza, Argentina.

Childs, J. L., Wallender, W. W., & Hopmans, J. W. 1993. Spatial and Seasonal Variation of Furrow Infiltration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(1), 74–90 pp. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1993)119:1(74)

Ciampitti, I. & F. Garcia. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Informaciones Agronómicas* N° 33, Archivo Agronómico N° 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Bs. As., Argentina.

Clemmens, A.J. & A.R. Dedrick, 1994. Irrigation techniques and evaluations. En: Tanji, K.K., Yaron, B. (Eds.), *Advances Series in Agricultural Sciences*, Springer, Berlin.

- Córcoles, J.I., Tarjuelo, J. M., Moreno, M. A.** 2016. Methodology to improve pumping stations management of ondemand irrigation networks. *Biosyst. Eng.*, Vol: 4 pp: 94-104.
- Corwin, D.L. & Lesch S.M.** 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part II. Case study. *Comput. Electron. Agri.* 46: 135–152 pp.
- Cuesta T., Neira X., Alvarez C. & Cancela J.** 2005. Evaluation of water-use in traditional irrigation. An application to the Lemos Valley irrigation district, northwest of Spain. *Agricultural Water Management* 75 137-151.
- Díaz Valdés, T., Partidas Ruvalcaba, L., Suárez Fernández, Y., Lizárraga Jiménez, R., & López A.** 2014. Uso eficiente del agua y producción óptima en maíz, con el uso de cuatro dosis de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1), 32-36 pp.
- Díaz, T., Pérez, N. W., Páez, F., López, A., & Partidas, L.** 2007. Evaluación del crecimiento del maíz (*Zea mays* L.) en función de dos técnicas de riego y diferentes niveles de nitrógeno. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(4), 84-87.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. & Robledo C.W.** InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Doorenbos, J. & Pruitt, W. O.** 1977. Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje N°. 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 144 pp.
- Domingo-Olivé, F., Serra, J., Roselló, A., & Teixidor, N.** 2005. Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego. VII Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo. *Estudios de la Zona no Saturada del Suelo. ZNS*, 5, 115-118.
- Elliott, R.; W.R., Walker & Skogerboe, G.V .** 1983. Infiltration parameters from furrows irrigation advance data. *Transactions of the ASAE*, 26 (6): 1726-1731 ISSN: 0733-9437. Michigan, USA. doi: 10.13031 / 2013.33833
- Enciso J. M.; Porter, D. & Péries, X.** 2007. Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. Servicio de Extensión AgriLife de Texas A & M.
- FAO**, 2015. Estudio del potencial de ampliación del riego en argentina. UTF/ARG/017 Desarrollo Institucional para la Inversión. ISBN 978-92-5-308995-6.
- FAO**, 2009. CROPWAT 8.0 has been developed by Joss Swennenhuis for the Water Resources Development and Management Service of FAO.
- Disponibile en: <https://www.fao.org/nr/water/ET0.html>.

- FAO**, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 298 p.
- Ferré, P.A & Topp, G.C.** 2002. "Time domain reflectometry". In: Dana, J.H. & Topp, G. C. (Eds), Methods of soil Analysis, Part 4-Physical Methods, p. 434-446. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- Génova, L.** 1994. Diseño, operación y evaluación de riego complementario por surcos, en terrenos no nivelados de la región norpampeana. Actas del Congreso Internacional de Ingeniería Rural y III Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Morón, Provincia de Buenos Aires.
- Génova, L.; Andreau, R. & Etchevers, P.** 2014. Desempeño de tres métodos de riego por surcos: caudal único, dos caudales y caudal discontinuo en un cultivo de maíz. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (2):174-191.
- Grassi, C.** 1987. Diseño y operación del riego por superficie. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 415 p.
- Grassi, C.** 1998. Fundamentos del Riego. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. CIDIAT. Mérida, Venezuela.
- Grassini, P.; Haishun, Y.; Suat, I.; John, T.; Charles, B.; Kenneth, G. C.** 2014. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II Irrigation management and crop water productivity. Field Crops Res. 120 (133-141). Available in: Science Direct, Ipswich, MA.
- Guerra, P; Masota, H.T; Olivieri, J.J.** 1966. Estudios de suelos con fines de riego. Proyecto FAO/Viedma.
- Godagnone, R.E. & Bran, D.E.** 2009. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro: geología, hidrogeología, geomorfología, suelos, clima, vegetación y fauna. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. 392 pp.
- González-Cebollada, C.; Moret-Fernández, D.; Buil-Moure, I. & Martínez-Chueca, V.** 2016. Optimization of Field Topography in Surface Irrigation. J. Irrig. Drain. Eng. doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001041. 04016026.
- Gomensoro, F., Loyola, P. F., & Sánchez, J. P.** 2011. Aportes al desarrollo de los distritos de riego de Belén y Pomán. PROSAP. INIA.
- Hanson, B.; Orloff S. & Douglas, P.** 2000. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. California Agriculture. Volume 54, No. 3:38-42 pp.
- Hammad, S. & G. Stringham.** 1978. Maximum non-erosive furrow irrigation Stream Size. Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE V. 104 (275-281).

- Horst, M.G.; Shamutalov, S. S.; Gonçalves & J.M.; Pereira. L.S.** 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agric. Water Manag.* 87(2), 115-127.
- IDEVI**, 2011. Informe y análisis sobre declaraciones de cultivo 1998/2011. Departamento de desarrollo económico-IDEVI.10 p.
- Kang, S.Z., Z.S. Liang, X.T. Hu, Y.H. Pan, P.Z. Shi y J. Zhang.** 2000. Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrig. Sci.* 19(4), 181-190.
- Lui, E.; Roa, R.; Martínez, R.S.; Zelmer, H.; Reinoso & L.; D’Onofrio, M.** 2012. Evaluaciones de riego parcelarias en el valle inferior del Río Negro, estrategias para la mejora de indicadores. VI Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego. Mendoza. Argentina.
- Malmantile, A.; Gerster, G., R.; Salvagiotti, F. & Bacigaluppo, S.** 2018. Velocidad de infiltración del agua y compactación del suelo, en respuesta a la intensificación de la rotación con gramíneas. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Oliveros. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Martín D.** 2009. “Información Técnica N° 27: Estadísticas climáticas del valle de Viedma”. Año 4-N°9. E.E.A. Valle Inferior-Convenio Provincia de Río Negro-INTA.
- Margiotta, F.A.; L. Reinoso & R.S. Martínez.** 2008. Evaluación de Materiales Comerciales de maíz Campaña 2007/2008. 13 pp. EEA INTA Valle Inferior.
- Margiotta, F.A.; L. Reinoso & R.S. Martínez.** 2009. Evaluación de materiales comerciales de maíz. Campaña 2008/2009. 25 pp. EEA INTA Valle Inferior.
- Martínez, R.S.; Prieto, D.; Antúnez, A.; Pla, M. & Zelmer, H.** 2016. Evaluación del Riego Superficial como herramienta para el mejoramiento del diseño y operación de los sistemas.
- Martínez, R.S; F.A. Margiotta; L. Reinoso & R.M. Martínez.** 2012. Buscando alcanzar altos rendimientos del cultivo de maíz: experiencias en los valles norpatagónicos. 3° Reunión Internacional de Riego. Argentina. Manfredi. INTA.
- Martínez, RS; Lui, E; Reinoso, L; Arancio, A y Henry, A.** 2008. Utilización de sensores de potencial mátrico y pozos freáticos para el manejo del agua en el cultivo de Nogal (*Juglans regia* L.) en el valle inferior del Río Negro. Actas del XXXI Congreso Argentino de Horticultura. Mar del Plata, Argentina. p. 138.
- Maturano, M.** 2002. Estudio del uso del agua y del nitrógeno dentro del marco de una agricultura sostenible en las regiones maiceras castellano-manchega y argentina. Tesis Doctoral. UCLM. España.

- Merriam, J. & Keller, J.** 1978. Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management. Department of Agriculture and Irrigation, Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Michael, A. M. & Pandya, A. C.** 1971. "Water Front Advance in Irrigation Borders," Journal of Agricultural Engineering Research, 16(1), pp. 62–71. doi: 10.1016/S0021-8634(71)80005-7.
- Montemayor Trejo, A; Lara Míreles, J.; Woo-Reza, L.; Munguía López, J.; Rivera González, M.; Trucíos Caciato, M.** 2012. Producción de maíz forrajero (*Zea mays l.*) en tres sistemas de irrigación en la comarca Lagunera de Coahuila y Durango, Méjico. *Agrociencia* 46: 267-278.
- Morábito, J.; Salatino, S.; Hernández, R.; Schilardi, C.; Álvarez, A.; Rodríguez P.** 2015. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las provincias del centro-noreste de Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*.
- Morábito, J., S. Salatino & C. Schilardi.** 2012. El desempeño del uso agrícola del agua en los oasis de los ríos Mendoza y Tunuyán a través de nuevos indicadores. VI Jornadas de riego y fertirriego. Facultad de Ciencias agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.
- Morábito J., C. Mirábile & S. Salatino.** 2007. Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). *Revista Ingeniería del Agua de la Universidad de Córdoba, España*, Vol. 14, No 3. pp. 199-213. ISSN: 1134–2196.
- Morábito J.** 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Eficiencia actual y potencial. Parámetros de riego y recomendaciones para un mejor aprovechamiento agrícola en un marco sustentable. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- Moreno, M.A., Ortega, J.F., Córcoles, J.I., Martínez, A., Tarjuelo, J.M.** 2010. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrig Sci* Vol: 28, pp: 445-460.
- Olivé, F.D., Serra, J., Rosello, A. & Albert, N.T.** 2005. Lavado de nitratos en un cultivo de maíz con diferentes tipos de riego.
- Panigatti, J.L.** 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 pp.
- Pereira, L.S. & R.G. Allen.** 1999. Crop Water Requirements. En: van Liez, H.N. (ed.); L.S. Pereira (coed); F.R. Steinez (coed.). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Land and Water Engineering (Vol I), Irrigation and Drainage (Cap. 5)*, 213-262. Edited by CIGR, The International Commission of Agricultural Engineering, published by ASAE. USA.
- Pereira, L., I. Corder & I. Iacovides.** 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management*. 12 pp.

- Pereira L.S. & Trout T.J.** 1999. Irrigation methods. En: van Lier HN, Pereira LS, Steiner FR (Eds.). CIGR Handbook of agricultural engineering. vol. I: Land and water engineering. Michigan: ASABE. 82 pp.
- Playán, E.; Lecina, S.; Isidoro, D.; Dechmi, F.; Causapé, J. & Faci, J.M;** 2005. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V of Bardenas (Spain). Agricultural Water Management. 22 pp.
- Pla, M; Martínez, R.S.; Lui, E.; Zelmer, H. & Travaglio, J.** 2013. Primeras experiencias de riego gravitacional con altos caudales en Patagonia norte. CONAGUA. San Juan. Argentina.
- P&R.** Ficha técnica N°1: Introducción al riego por pulsos. N°6: Determinación de la lámina a aplicar en el riego por pulsos 2019. <https://pyrargentina.com.ar/biblioteca/hojas-tecnicas/>
- QGIS 3.4** Development Team, 2018. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- Quichán, S. Martínez, R.S.; Melchor Martínez, R; Esquercia, W.; Lui, E. & Mazzieri, J.** 2015. Riego por aspersión en la Norpatagonia y su efecto sobre las propiedades del suelo. Revista Pilquen Sección Agronomía N° 15 • 2015/2016 ISSN 1851-2852.
- Reinoso L.; R.S., Martínez; J., Mercau; M., Gutierrez & M.E., Otegui.** 2018. Rendimiento potencial de maíz en los valles de la Norpatagonia: una aproximación desde los modelos de simulación. Congreso AAPRESID. Córdoba. Argentina.
- Reinoso L.** 2014. Rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Río Negro: Evaluación de la frecuencia de riego y la fertilización nitrogenada. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. Buenos Aires. Argentina.
- Reinoso, L.; R.S. Martínez; F. Margiotta; R.M. Martínez & P. Zalba.** 2009. Estudios de frecuencias de riego sobre el rendimiento de maíz en el Valle Inferior del Rio Negro. En Congreso Nacional del Agua Ed: Dirección Oficial de Impresiones, Rawson. 318 pp. ISBN: 978-987-25369-0-9.
- Rhoades, J; Manteghi, N; Shouse, P. & Alves, W.** 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. Soil Science Society American Journal 53: 433-439.
- Ritchie, S. & J. J., Hanway.** 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Technol. Spec. Rep., 48 pp.
- Romay C.,** 2012. Desempeño del riego por caudal discontinuo en Mendoza, Argentina. Eficiencias actuales y potenciales. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Cuyo. Mendoza. Argentina.

- Romay, C. & L. Génova.** 2011. Recomendaciones para eficientizar el riego con caudal discontinuo, ajustando variables de programación de la válvula P&R. Segundas Jornadas Nacionales de Riego Discontinuo.
- Roqué, C.** 2003. Siembra directa y riego discontinuo en el departamento de Cruz del Eje, Córdoba, Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Alimentos. Córdoba, Argentina.
- Roscher K,** 1985. Surface Irrigation. Characteristics, design and performance. Department of irrigation and civil engineering. Agricultural University, Wageningen. The Netherlands.
- Sánchez, R. M.** 2013. Determinación de la demanda hídrica de los principales cultivos del valle bonaerense del río Colorado. In Congreso Nacional del Agua. 24. CONAGUA 2013. 2013 10 14-18, 14 al 18 de octubre del 2013. San Juan. Argentina.
- Salatino, S; Bagini, R.; Satlari, G & Morábito, J.** 1992. “Parámetros y eficiencia de riego en el área de influencia del Arroyo Claro en Tunuyán, Mendoza”. Instituto Nacional del Agua, Departamento General de Irrigación e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Snyder, R.L., Lanini, B.J., Shaw, D.A., & Pruitt, W.O.** 1989a. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for agronomic crops, grasses, and vegetable crops. Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, California, Leaflet No. 21427, 12 p.
- Schilardi, C.** 2011. Desempeño del riego por superficie en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior, Mendoza Argentina. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.
- Starr, J.L. & I.C. Paltineanu.** 2002. Capacitance Devices. En: Dane, J.H. y G.C. Topp, G.C. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4- Physical Methods. pp. 463-474. American Agronomy Society, USA.
- Sudduth, K.A., Drummond, S.T. & Kitchen, N.R.** 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Comput. Electron. Agri. 31, 239–264.
- Taghvaeian, S.; Chavez, J.L.; Bausch, W.C.; De Jonge, K.C. & Trout, T.J.** 2014. Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize. Irrigation Science 32 (1), 53-65.
- USDA,** 1984. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Furrow Irrigation. US Government Printing Office, Washington, D.C.

- Vallone, R.; D. Prieto & J. Morábito.** 2007. Desarrollo de tecnologías para el saneamiento y recuperación de tierras y optimización de sistemas de riego en áreas de regadío. Jornadas de Investigación en Recursos Hídricos, Mendoza. Argentina.
- Van Halsema, G.E. & L., Vincent.** 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural Water Management*. Volumen 108: 9-15. ELSEVIER.
- Villalobos-González, A., López-Castañeda, C., Miranda-Colín, S., Aguilar-Rincón, V. H., & López-Hernández, M. B.** 2018. Efecto del estrés hídrico y nitrógeno en las raíces de variedades híbridas y criollas de maíz (*Zea mays* L.). *Agroproductividad*, 11: 3-8. 6 pp.
- Walker, R.; Prestwich, C.; Spofford, T.** 2006. Development of revised USDANRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural Water Management* 85: 157-164 pp.
- Walker, W. R. & G.V, Skogerboe.** 1987. *Surface irrigation, theory and practice*. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, New Jersey. 386 pp.
- Wang, Z., Li, J. y Li, Y.** 2014. Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China Plain. *Agricultural Water Management* Volumen 142, August 2014, Pages 19-28, 142, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.013>
- Wang, H., Ju, X., Wei, Y., Li, B., Zhao, L., Hu, K.,** 2010. Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agric. Water Manag.* 97, 1646–1654.
- Webber, H. A., Madramootoo, C. A., Bourgault, M., Horst, M. G., Stulina, G. & Smith, D. L.** 2006. “Water Use Efficiency of Common Bean and Green Gram Grown Using Alternate Furrow and Deficit Irrigation,” *Agricultural Water Management*, 86(3), pp. 259–268. doi: 10.1016/j.agwat.2006.05.012.
- Yonts C., Eisenhauer D. & Fekersillassie D.** 1996. Impact of Surge Irrigation on Furrow Water Advance. *Transactions of ASAE* 39(3):973–979.