

Efecto de la salinidad del extracto acuoso del suelo en sistemas de riego por aspersión

Effect of the salinity of aqueous soil extract in sprinkler irrigation systems



<https://cu-id.com/2177/v33n3e02>

✉ Jorge Carlos Armas-Baño^{I*}, ✉ Pável Vargas-Ferrer^{II}, ✉ Pável Vargas-Rodríguez^I,
✉ Alberto Méndez-Jocik^{III}, ✉ Kaddiel Fernández-Hung^{IV}

^IUniversidad de Oriente. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

^{II}Dirección Provincial de Proyectos Hidráulicos, INRH. Santiago de Cuba, Cuba.

^{III}Empresa Nacional de Proyectos Ingeniería. Departamento de Diseño. La Habana, Cuba.

^{IV}Grupo de Difusión Tecnológica Empresa de Cítricos Contra maestre. Contra maestre. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN: El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos promueve la gestión eficiente del agua en las empresas agropecuarias, sobre la base de aplicar resultados de investigaciones científicas. A pesar de la inversión realizada en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca, aún persisten dificultades para hacer sostenible las producciones agrícolas, debido a la baja agroproductividad de los suelos y el descenso de la eficiencia en el uso del agua de riego, por ello se infiere la necesidad de actualizar, desde el diseño de las instalaciones, los parámetros de explotación de los sistemas de riego con máquinas de Pivote Central y Enrolladores. Se aborda, a partir de la solución de dos casos de estudios reales, los efectos negativos de la presencia de sales en la solución del suelo, sobre el rendimiento de los cultivos y en la sostenibilidad de las fuentes de abasto implicadas en la actividad del riego. Se empleó el método hipotético - deductivo, para validar la conveniencia de considerar en la etapa de diseño, la salinidad en el extracto de saturación del suelo. Como resultado se identificó el caudal medio de bombeo, como el parámetro de diseño que influye significativamente en la explotación de estas máquinas de riego; el incremento de este parámetro infiere la necesidad de establecer sistemas de drenaje parcelario para disminuir los efectos de la saturación de los suelos y la presencia de sales en la solución del suelo.

Palabras clave: máquinas de riego, caudal de bombeo, eficiencia de riego, saturación del suelo, salinidad.

ABSTRACT: The National Institute of Water Resources promotes efficient water management in agricultural enterprises, based on the application of scientific research results. In spite of the investment made in the Laguna Blanca Agricultural Enterprise, there are still difficulties in making agricultural production sustainable, due to the low agro-productivity of the soils and the decrease in the efficiency of irrigation water use. For this reason, it is necessary to update, from the design of the installations, the operating parameters of the irrigation systems with centre pivot and reel machines. Based on the solution of two real case studies, the negative effects of the presence of salts in the soil solution on crop yields and on the sustainability of the supply sources involved in the irrigation activity are addressed. The hypothetical-deductive method was used to validate the convenience of considering salinity in the soil saturation extract at the design stage. As a result, the average pumping flow rate was identified as the design parameter that significantly influences the operation of these irrigation machines; the increase of this parameter infers the need to establish plot drainage systems to reduce the effects of soil saturation and the presence of salts in the soil solution.

Keywords: Irrigation Machines, Pumping Rate, Irrigation Efficiency, Soil Saturation, Salinity.

*Autor para correspondencia: Jorge Carlos Armas-Baño, e-mail: jorgecarlosarmasbano@gmail.com

Recibido: 13/10/2023

Aceptado: 14/06/2024

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: **Conceptualización:** J. Armas; **Análisis formal:** J. Armas, P. V. Ferrer, K. Fernández; **Investigación:** J. Armas, P. V. Ferrer, K. Fernández, P. Vargas, A. Méndez; **Metodología:** J. Armas, P. V. Ferrer, K. Fernández, P. Vargas, A. Méndez; **Supervisión:** J. Armas, P. Vargas. **Redacción-borrador original:** J. Armas, P. V. Ferrer, K. Fernández. **Redacción-revisión y edición:** J. Armas, P. V. Ferrer, K. Fernández, P. Vargas, A. Méndez.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El agua y la seguridad alimentaria están estrechamente relacionadas. La agricultura es, con gran diferencia, la mayor consumidora de agua, y representa alrededor del 69% de todas las extracciones en todo el mundo y más del 80% en los países en desarrollo. Un acceso fiable y suficiente de agua aumenta los rendimientos agrícolas, proporcionando más alimentos e ingresos más altos en las zonas rurales donde viven las tres cuartas partes de la población hambrienta del mundo. No es de extrañar que los países con mejor acceso al agua suelen ser también los que presentan niveles más bajos de subnutrición [FAO \(2000\)](#) citado por [Baucells & Méndez \(2004\)](#).

El suelo y el agua son los dos recursos primarios, no sólo de la agricultura, sino de toda la vida que existe sobre el planeta Tierra, cuando el abastecimiento de agua es suficiente y los suelos son fértiles, la agricultura puede sostener la vida humana civilizada, a condición de que el clima sea favorable según [FAO \(1996\)](#) citado por [Tarjuelo, \(2005\)](#), aseguran que, en cambio, la falta del agua necesaria, incluso temporalmente, impide las faenas agrícolas y desencadena la inseguridad alimentaria. En la actualidad, la población del mundo y las necesidades de alimentos están aumentando a un ritmo sin precedentes, siendo más difícil incrementar el suministro de agua a los agricultores.

Según [Palacios-Vargas \(2021\)](#), en las condiciones climatológicas actuales, caracterizadas por la alternancia de fenómenos naturales adversos como consecuencia directa del Cambio Climático, son significativas las afectaciones en las producciones agrícolas de la mayoría de los escenarios de uso, en ocasiones el potencial agroproductivo del suelo tampoco es tenido en cuenta para seleccionar la técnica de riego a utilizar.

Según refiere [Vargas-Ferrer \(2022\)](#), las simplificaciones que se realizan durante el diseño agronómico de los sistemas de riego por aspersión con pivote central y en los sistemas de riego con enrolladores, conlleva a subvalorar las necesidades de agua de los cultivos, y propicia una instalación más susceptible a los problemas de mal drenaje y salinidad, los cuales persisten en los suelos de categoría agroproductiva III y IV, característicos del área objeto de estudio ([Barragan-Fernandez & Casañas-Cladellas, 1980](#)).

En este sentido, la investigación se realiza como una modesta contribución que aborda las implicaciones que tiene la presencia de sales en el extracto acuoso del suelo, en las necesidades totales de agua de los cultivos y por tanto en los parámetros de explotación de las instalaciones de riego por aspersión mecanizado, específicamente las máquinas de pivote central y los enrolladores.

De acuerdo con [FAO \(2000\)](#) citado por [Vargas-Ferrer \(2022\)](#), el análisis de la selección de las instalaciones para el riego por aspersión debe incluir: La correspondencia entre la intensidad media de la lluvia y la capacidad de absorción del suelo; la correspondencia entre las dimensiones y la configuración del territorio irrigado con los parámetros fundamentales y los índices de las instalaciones; el análisis de las condiciones climáticas y topográficas del territorio (la complejidad del relieve del terreno, la pendiente y las propiedades físico - químicas del suelo), así como de las condiciones y posibilidades económicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del caso de estudio

El área del estudio ocupa una superficie total de 122,88 hectáreas en la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca, en la zona conocida como Aguacate, municipio Contramaestre, provincia Santiago de Cuba, de ella se propone irrigar con pivote central eléctrico una superficie de 51,78 ha, para beneficiar el cultivo de plátano burro (variedad CEMSA -) y una parcela rectangular de 18,5 ha para beneficiar cultivos de pastos para la alimentación animal con técnicas de riego de enrollador; el resto del área se irrigará utilizando otras técnicas de riego por aspersión.

El área pertenece a la UBPC No.1 "4 de abril", limita al Sur con el canal magistral, al Norte con el canal secundario No.1 que abastece las maquinas 3 y 4, al Este con un terraplén que divide las áreas 1 y 3 de dicha UBPC y al Oeste con la UBPC 2. Las coordenadas son: 195 000-197 000 Norte y 575 000-578 000 Este, hoja cartográfica 4977-II-b-4 escala 1:10 000 del ICGC.

Datos básicos para el diseño

Fuente de abasto

Disponibilidad y accesibilidad: La fuente de abasto constituyó el río Cauto específicamente en el lugar conocido como Arrollo Blanco, donde existe una estación de bombeo en la margen derecha del río Cauto equipada con 6 bombas $Q = 400 \text{ L/s}$ y $H = 784 \text{ kPa}$ para un caudal total de la estación de bombeo $Q = 2,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

Calidad del agua para el riego: Se tomaron muestras de agua en la fuente de abasto para determinar sus propiedades físicas y químicas y se analizaron en el laboratorio de la delegación provincial del INRH, comprobándose su aptitud para el riego de los cultivos propuestos. A los efectos de diseño se utilizó para la comparación de las variantes, una salinidad en el agua de riego ($CE_{AR} = 1,2 \text{ dS/m}$), correspondiente a aguas de riego de salinidad media ([Pizarro, 1985](#)).

Suelos

De acuerdo con el informe de la DSF-EALB-Santiago de Cuba (2006) se clasificó el suelo de ambas parcelas de riego, como Oscuro Plástico Gleysoso gris amarillento, sobre materiales carbonatados, mediana humificación (2 a 4%), poco erosionado, de textura media-arcillosa, medianamente gleysado y ligeramente salino, de perfil uniforme hasta los 0,7 m. No se pudo medir el contenido de sales en la solución del suelo en ninguno de los dos casos, pero se comprobó durante la visita técnica que, los suelos presentan un drenaje natural superficial e interno deficiente.

En ambas parcelas se reconocieron las siguientes limitantes: mal drenaje, poca profundidad efectiva y alta plasticidad. Las siguientes propiedades hidrofísicas se pueden considerar comunes para ambas parcelas.

TABLA 1. Propiedades hidrofísicas del suelo, [DSF-EALB-Santiago de Cuba \(2006\)](#)

Velocidad de infiltración	(Vi) = 26,0 mm/h (estabilizada 50 min)
Capacidad de Campo	(CC) = 54,1% PSS (alta)
Límite Productivo	(LP) ≈ 80,0% CC
Densidad Aparente	(DA) = 1,02 g/cm ³

Se asumió para el diseño que la parcela es de perfil uniforme hasta los 0,7 m con textura mediaarcillosa, la profundidad efectiva = 25 cm (poco profundo), la pendiente predominante ligeramente superior al 1% (llana). Las recomendaciones para su utilización en el cultivo del plátano establecen la siembra en bancales combinada con la aplicación de materia orgánica y de un sistema de drenaje superficial. En el caso de la parcela experimental para el cultivo de pastos, el suelo de la parcela es de perfil uniforme y textura media con una pendiente del 2% y una capacidad de almacenamiento de 1mm/cm de suelo.

Cultivos

El cultivo a beneficiar con la máquina de riego de pivote central fue el plátano burro (CEMSA –) con tecnología extradenso, se tuvieron en cuenta las siguientes características: profundidad radical 0,7 m, coeficiente de cultivo 0,75 rendimiento potencial 65 t/ha, un déficit permisible de manejo = 40% y tolerancia a la inundación de 1 a 2 días. En el caso de la parcela experimental se utilizó para el riego un enrollador cuyas características se ofrecen más adelante, se beneficiarán cultivos de pastos con una considerar comunes para ambas parcelaprofundidad radicular de 67 cm, y un déficit permisible de manejo de 55% del agua útil.

Clima

De acuerdo con la tarea técnica se asumió para el diseño del pivote central (cultivo de plátano burro), unas necesidades punta de 7,5 mm/día, correspondiente al mes de abril, de igual forma se consideró para el diseño de la parcela a irrigar con el Enrollador, unas necesidades netas puntas de agua = 6,3 mm/d. Se estima para la zona una velocidad medida de los vientos predominantes Vv = 2,5 m/s.

Características de las técnicas de riego

En el caso del pivote central, se previó detener el riego al menos 4 horas al día, coincidiendo con las horas pico de la tarifa eléctrica, sin días libres de riego, estimándose que puede alcanzarse una eficiencia de aplicación de agua del 90%.

Separación entre torres 35m (modelo torres cortas), longitud de alero múltiplo 3 m (máximo 25 m), altura del pivote 4 m, diámetro de la tubería lateral 200 x 189 mm, AL, C150 - PN 6.

Presión nominal de los aspersores 210 kPa y anchura mojada en el extremo móvil 7 m, velocidad máxima de desplazamiento de la última torre de 2,1 m/min.

Se decidió utilizar un aspersor (rotator) de tamaño medio o menor en su extremo situado en un tubo bajante para dejarlo a 2,5 m sobre el suelo.

En el caso del enrollador se estimó una eficiencia de riego $E_{AP} = 75\%$, igualmente se previó detener el riego durante las horas de máxima demanda de energía eléctrica y se procuró realizar hasta dos posiciones de riego diarias, separadas por al menos 1 hora para el cambio de una posición a otra. Se asumió una jornada diaria de 20 h, las características técnicas del equipo se refieren en el procedimiento de diseño.

De acuerdo con [Tarjuelo \(2005\)](#), el procedimiento de diseño del pivote central incluye:

Estimación de la longitud del pivot, el número de torres y la longitud del alero:

- El pivote se ubicó en una superficie cuadrada de 517 800 m².
- Al tratarse de una parcela cuadrada, el diámetro de la circunferencia circunscripta a cubrir con el riego es igual a un lado del cuadrado (ϕ) = 719,6 m, por tanto, el radio de la superficie a irrigar por el pivot será:

$$R_{SR} = \frac{\phi}{2} \quad (1)$$

El número de torres necesarias será:

$$N_{TORRES} = \frac{R_{SR}}{S_{Torres}} \quad (2)$$

se concibió una máquina con 10 torres de 35 m, los 9,8 m restantes se cubrieron con un alero de 3 m,

quedando 6,8 m para cubrir con el aspersor final cuya anchura mojada es de 7 m.

La superficie del círculo regado por la máquina será:

$$A_{SR} = \pi \times R_{SR}^2 \quad (3)$$

como la superficie total del cuadro es de 51,78 ha, se quedarían sin regar el 21,46% de la parcela.

Capacidad del Pivote [Q_p (L/s)]

Según a [Tarjuelo, \(2005\)](#), citado por [Fernández-Hung et al. \(2022\)](#) para el riego de cultivos de cobertura completa se ha generalizado el uso de la siguiente ecuación:

$$Qp = 2,78 \times \frac{N_H \times A_{PR}}{T_{OD} \times E_{fAP}} \times \frac{0,9}{(1 - LR)} \quad (4)$$

donde:

el último término se utiliza cuando existe presencia de sales en la solución del suelo, (cuando LR > 0,1).

E_{fAP}- eficiencia de aplicación en la parcela de riego (decimal), es la fracción de agua aplicada con el riego que queda retenida en la zona radicular y a disposición de la planta. Su valor depende del tipo de suelo, de la técnica de riego y de otros factores

T_{OD}- tiempo de operación diario del equipo (h), en el mejor de los casos se asume como el 90% del fondo horario para tener en cuenta posibles interrupciones en el período punta según [USDA \(2013\)](#) y [USDA-NRCS \(2016\)](#), de acuerdo con [MFP- Cuba \(2021\)](#) se asumió un tiempo de operación diario de 20 h.

LR- representa las necesidades de lavado, su valor depende de la conductividad eléctrica del agua de riego [CE_{ar} (dS/m)] y de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo [CE_{es} (dS/m)] ([CEN, 2013](#)). De acuerdo con [Keller & Bliesner \(1990\)](#), el término 0,9 se incluye para tener en cuenta las pérdidas por percolación inevitables y suponiendo que estas satisfacen el 10% de las necesidades de lavado, de manera que se garantice el 90% de la producción debido a tenores salinos inapropiados en el suelo, estos autores proponen $LR = \frac{CE_{ar}}{5(CE_{es} - CE_{ar})}$, para sistemas de riego por aspersión y superficial. Más recientemente [USDA-NRCS \(2016\)](#) propone;

$$LR = 0,18 \times \left(\frac{CE_{ar}}{CE_{es}} \right)^3 \quad (5)$$

donde:

utilizada para riegos de alta frecuencia y representa el límite de salinidad en la zona radicular que el cultivo tolera sin afectación del rendimiento máximo potencial.

N_H- se asumió para el mes de máximas necesidades del cultivo del plátano de acuerdo con la tarea técnica, que resultó el mes de abril de 2 325 m³/ha = 7,5 (mm/d o L/m²/d):

Duración del riego

El tiempo necesario para que el lateral realice una vuelta [T_{MÍN} (h)] depende de la máxima velocidad de desplazamiento de la última torre [V_{MAX} (m/min)] y del perímetro a recorrer, la máxima velocidad viene fijada por el fabricante según las características del desmultiplicador en el mecanismo de transmisión. Se obtuvo de:

$$Tm_{\min} = \frac{2\pi * Rut}{Vm_{\acute{a}x}} \quad (6)$$

Para determinar el tiempo máximo para completar una vuelta [T_{MAX} (h)], primero fue necesario estimar la velocidad mínima de avance a la que empieza a haber escorrentía en el extremo del pivote, de acuerdo con [Dillon et al. \(1972\)](#), el procedimiento de cálculo siguió la metodología propuesta por este autor, recomendada por [Tarjuelo \(2005\)](#), en la misma se obtiene la pluviosidad máxima en el extremo del pivote [P_{MÁX} (mm/h)], en función de la capacidad del pivote (L/s), el radio de la superficie regada (m) y la anchura mojada en el extremo de la máquina [AM (m)], teniendo en cuenta la textura y la pendiente del suelo se determina [T_M (h)], el máximo que puede tardar el equipo en pasar sobre un punto del terreno (desde que empieza a mojarlo hasta que deja de hacerlo) para que no exista escorrentía:

$$P_{MÁX} = \frac{28800 * Qp}{\pi * Rsr * AM} \quad (7)$$

donde:

para un suelo franco, pendiente del 1% y almacenaje superficial estimado de 7,6 mm, se obtuvo: TM ≈ 0,51 h = 30,6 min. Así, la mínima velocidad de desplazamiento del equipo para que no haya escorrentía se obtuvo por medio de:

$$Vm_{\min} = \frac{AM}{TM} \quad (8)$$

El tiempo máximo que tardará el equipo en dar una vuelta será:

$$Tm_{\acute{a}x} = \left(\frac{2\pi * Rut}{Vm_{\min}} \right) \quad (9)$$

Dosis bruta y dosis neta, media aplicada, límites de frecuencia de aplicación

La dosis bruta media más alta que puede aplicarse sin riesgo de escorrentía será la correspondiente al T_{MÁX}, y la dosis bruta media mínima se obtendrá en función de T_{MÍN}, multiplicando las mismas por la eficiencia de aplicación se obtendrían las dosis netas correspondientes, las siguientes expresiones resuelven estos parámetros:

$$Dbm_{\acute{a}x} = 0.36 * \frac{(Qp * Tm_{\acute{a}x})}{Asr} \quad (10)$$

$$Dbm_{\min} = 0.36 * \frac{(Qp * Tm_{\min})}{Asr} \quad (11)$$

$$Dnm_{\acute{a}x} = Dbm_{\acute{a}x} * E_{fap} \quad (12)$$

$$Dnm_{\min} = Dbm_{\min} * E_{fap} \quad (13)$$

Los límites de la frecuencia de riego máxima y mínima se obtuvieron por:

$$IRm_{\acute{a}x} = \frac{Dn_{m\acute{a}x}}{NH} \quad (14)$$

$$IRm_{\acute{m}n} = \frac{Dn_{m\acute{m}n}}{NH} \quad (15)$$

La presión necesaria a la entrada del pivote se determinó por medio de:

$$Hpiv = Hasp + Hfpiv + \Delta Zpiv + hpiv \quad (16)$$

donde:

H_{piv} → presión necesaria a la entrada del pivote (mca).

H_{asp} → presión nominal del último aspersor.

H_{fpiv} → pérdida de presión por rozamiento en la tubería del pivote (m).

ΔZ_{piv} → desnivel geométrico entre el punto pivote y el extremo de la tubería.

h_{piv} → altura de la tubería del pivote sobre el terreno.

La pérdida de carga a lo largo de la tubería se determinó mediante la ecuación propuesta por [Chu et al. \(1980\)](#).

$$Hfpivo = 0.548 \times Hm \quad (17)$$

donde:

Hm → se obtuvo por la expresión de William-Hazen asumiendo régimen turbulento intermedio.

El procedimiento de diseño para el enrollador se tomó del mismo autor:

Cálculo de los parámetros de riego:

- La dosis neta de riego [D_N (mm)] se calculó en función de la capacidad de almacenamiento del suelo [CA (mm/cm)], la profundidad a humedecer [Z (cm)] y el déficit permisible de humedad [DPM (decimal)], así:

$$D_N = CA \times Z \times DPM \quad (18)$$

- La dosis bruta a aplicar [D_B (mm)] se estimó en función de las pérdidas de agua que tienen lugar en la parcela, así como las que ocurren en el sistema de conducción y distribución del agua, las cuales se valorizan a través de la Eficiencia de riego [E_R (decimal)], por:

$$Db = \frac{D_N}{E_{rap}} \quad (19)$$

- La frecuencia de riego máxima [$IR_{m\acute{a}x}$ (días)] se obtuvo a partir del cociente de la dosis de riego neta y las necesidades netas de agua del cultivo, las mismas se asumieron 6,3 mm/d por recomendaciones de la tarea técnica:

$$IRm_{\acute{a}x} = \frac{D_N}{NH} \quad (20)$$

su valor se ajustó a un número entero coincidente con el número de bandas de la parcela [E (m)].

Caudal medio de bombeo necesario [Q_p (L/s)]

Al igual que en el caso del pivote, se calculó como el cociente entre el volumen de agua que es necesario

aplicar a la parcela en un riego y el número de horas necesarias para este propósito, al constituir igualmente una opción de riego que entrega el agua en movimiento, son válidas las mismas explicaciones:

$$Qp = 2,78 \times \frac{NH \times A_{PR}}{T_{OD} \times E_{fAP}} \times \frac{0,9}{(1-LR)} \quad (21)$$

ante la posibilidad de que ocurran días con vientos fuertes ($V_v \geq 4$ m/s) en los cuales convendría no regar, muchos fabricantes recomiendan mayorar entre el 15 y el 20% el caudal del equipo, dejando un margen de seguridad para poder beneficiar cultivos de mayor demanda y para caso de averías. Sin embargo la práctica del diseño establece que, al considerar 20 h de riego ([Tarjuelo, 2005](#)).

Selección del aspersor

Se seleccionó en función del caudal medio de bombeo (m^3/h) y el rango de presiones máxima y mínima en la que mejor funciona el aspersor, se utilizó el catálogo publicado por [Tarjuelo \(2005\)](#), para asumir las características principales del aspersor, las mismas se refieren en la siguiente tabla:

Pluviometría máxima del aspersor [P_{MAX} (mm/h)]

Se obtuvo en función de la descarga del aspersor y la superficie que este humedece y debe ser menor o igual que la velocidad de infiltración estabilizada del suelo para evitar pérdidas de agua por escorrentía y/o percolación profunda.

$$Pm_{\acute{a}x} = \frac{Q_{asp}}{\pi(0.9 \times R_{asp})^2 \left(\frac{\alpha_{sr}}{360^\circ} \right)} \quad (22)$$

se comprobó que este aspersor no provocará problemas de escorrentía superficial sobre el suelo desnudo. Se consideró el 90% del radio de alcance del aspersor, para tener en cuenta que ($P_{M\acute{A}X}$) cae en la mayor parte del área mojada, sobre una superficie superior al valor medio humedecido [Keller & Bliesner \(1990\)](#).

Separación entre posiciones de riego

Se asumió una velocidad de los vientos predominantes ($VV = 2,5$ m/s), esto infiere que se humedece $\approx 68\%$ del diámetro mojado por el aspersor, a partir de esto, el ancho de banda o separación entre posiciones de riego se obtuvo por:

$$E = 2 \times R_{asp} \times \%mojado \quad (23)$$

previando colocar el equipo en la dimensión más corta de la parcela de riego para que sea menor el desplazamiento de la manguera del enrollador y por consiguiente las pérdidas por rozamiento que tienen lugar, se previó además que el ancho de banda fuera de dimensiones enteras.

TABLA 2. Características principales del aspersor seleccionado [Tarjuelo, \(2005\)](#)

Presión del aspersor (H_{asp})	405,3 kPa	Diámetro de salida (ϕ_{boq})	32 mm
Caudal del aspersor (Q_{asp})	78,7 m ³ /h	Angulo sector regado (α_{sr})	220°
Radio de alcance (R_{asp})	52 m	Angulo de salida (α_s)	22°
Diámetro de manguera (ϕ_{mang})	110 mm	Altura del Enrollador (h_E)	3,15 m
Longitud de manguera (L_{mang})	260 m	Pérdidas locales ($H_{f_{loc}}$)	Pa

Velocidad de avance del aspersor [V_{AV} (m/h)]

$$V_{av} = \frac{Q_{asp}}{D_b \times E} \quad (24)$$

se comprobó que el valor obtenido resultó dentro del rango permisible según el fabricante (entre 5 y 50 m/h).

Duración del riego

El tiempo necesario para el riego de una posición [T_R (h)], depende de la longitud a recorrer y de la velocidad de avance, se tuvo en cuenta, además, el tiempo de funcionamiento al principio y al final de la parcela, así como el tiempo de avance, y la conveniencia de realizar dos posiciones de riego al día. El cálculo incluyó:

- La distancia al inicio [D_{INI} (m)] entre el extremo final de la parcela y la posición inicial del enrollador, la misma se obtuvo por:

$$D_{ini} = \frac{2}{3} \times R_{asp} \quad (25)$$

La duración del riego en la posición inicial del equipo [T_{INI} (h)]:

$$T_{ini} = \frac{2}{3} \times \frac{(\alpha_{sr})^\circ}{360^\circ} \times \frac{R_{asp}}{V_{av}} \quad (26)$$

La duración del riego en la posición final del equipo [T_{FIN} (h)]:

$$T_{fin} = \frac{2}{3} \times 1 - \frac{(\alpha_{sr})^\circ}{360^\circ} \times \frac{R_{asp}}{V_{av}} \quad (27)$$

La duración del riego durante el recorrido desde el final hasta el inicio de la parcela [T_{AV} (h)] y donde la longitud recorrida (L_{MANG}) resultó, en este caso, de la diferencia entre la mitad de la parcela regada y (D_{INI}):

$$T_{av} = \frac{L_{mang}}{V_{av}} \quad (28)$$

- La duración total del riego en una posición resultó:

$$T_R = T_{ini} + T_{av} + T_{fin} \quad (29)$$

se asumió hasta 1h de duración para el cambio de una posición a otra del equipo [T_C (h)], por lo tanto la primera sesión de riego (en la mañana), se obtuvo sumar $T_R + T_C$.

La presión necesaria en el hidrante que abastece del Enrollador se obtuvo sumando a la presión de trabajo del aspersor dada en el catálogo del fabricante [H_{asp} (mca)], la altura de éste sobre el terreno [h_E (m)], el desnivel topográfico más desfavorable [ΔZ_E (m)] y las pérdidas de caga por rozamiento en la manguera

[$H_{f_{mang}}$ (mca)], así como las pérdidas locales [$H_{f_{loc}}$ (mca)] que ocurren en los mecanismos de propulsión y regulación, la expresión fue la siguiente:

$$H_H = H_{asp} + h_{fmang} + \Delta Z_E + h_{floc} + h_e \quad (30)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Referentes de diseño (Tablas 3 y 4, Figuras 1 y 2)

Cuando la calidad de la información referida al complejo Agua - Suelo - Planta - Clima y a las características de la tecnología de riego, incluidas las prestaciones de los equipos de bombeo, es garantizada de manera oportuna, es posible prever durante la etapa de diseño posibles soluciones que deberá enfrentar el personal dedicado a la explotación de las instalaciones.

Fue necesario conocer la disponibilidad y calidad de la fuente de abasto para compararla con las necesidades anuales de las instalaciones, esto permitió, comprobar la pertinencia de las técnicas de riego, interésó conocer sobre la accesibilidad de la fuente de abasto para verificar las prestaciones de bombeo de la instalación.

Se tuvo en cuenta la aptitud de los suelos para el riego de los cultivos propuestos por [Ayers & Westcot \(1987\)](#) presentaron información sobre la tolerancia de las plantas a la salinidad, a partir de datos obtenidos por varios autores y los recientes de Mass-Hoffman, estos últimos, propusieron una fórmula que relaciona la producción de los distintos cultivos con la salinidad del suelo.

Aplicando la fórmula de Mass-Hoffman a la gran cantidad de datos recopilados por [Ayers & Westcot \(1987\)](#) se determinaron los valores de resistencia y sensibilidad a la salinidad de distintos cultivos. Esto conllevó a asumir un valor de salinidad en el extracto acuoso de suelo correspondiente con el 100% de producción de los cultivos a beneficiar en cada caso, se asumió para la comparación entre las variantes, un valor $CE_{ES} = 1,0$ dS/m, debido a la presencia de tenores salinos en el suelo, correspondiente a una garantía de producción del 100% ([Pizarro, 1985](#)). Además, interésó conocer la velocidad de infiltración estabilizada y tiempo al cual se estabiliza la misma, la profundidad de la capa activa, la textura y el relieve para prever de manera prioritaria el diseño de un sistema de drenaje superficial y para poder estimar una dosis de lavado que permita programar a corto plazo, lavados de mantenimiento junto con el riego.

TABLA 3. Resultados del diseño agronómico del Pivote Central

Parámetros de diseño.	Con presencia de sales	Sin presencia de sales
Número de torres.	10	10
Superficie irrigada.	40,6 ha	40,6 ha
Capacidad del pivote.	61 L/s	47 L/s
Velocidad máxima	2,1 m/min	2,1 m/min
Tiempo mínimo para una rotación.	17,45 h	17,45 h
Pluviometría máxima.	224 mm/h	171 mm/h
Tiempo máximo para humedecer un punto.	0,09 h	0,13 h
Velocidad mínima	1,36 m/min	0,9 m/min
Tiempo máximo para una rotación.	27,02 h	40,5 h
Dosis bruta máxima.	14,71 mm	16,88 mm
Dosis bruta mínima.	9,50 mm	7,27 mm
Dosis neta máxima.	13,24 mm	15,19 mm
Dosis neta mínima.	8,55 mm	6,54 mm
Frecuencia de riego máxima.	1,76 d	2,03 d
Frecuencia de riego mínima.	1,14 d	0,87 d
Pérdidas por rozamiento.	35,49 kPa	21,57 kPa
Presión en el punto pivot.	318 kPa	312 kPa

TABLA 4. Resultados del diseño agronómico del Enrollador

Parámetros de diseño.	Con presencia de sales.	Sin presencia de sales.
Dosis neta ajustada	25,2 mm	31,5 mm
Dosis bruta ajustada	33,6 mm	42,0 mm
Frecuencia de riego máxima.	4 d	5 d
Caudal que entrega el Enrollador.	111 m ³ /h	78,7 m ³ /h
Pluviometría máxima.	18,5 mm/h	18,7 mm/h
Ancho de banda	88,5 m	71 m
Número de bandas	4 bandas	5 bandas
Velocidad de avance del equipo	37,22 m/h	26,4 m/h
Tiempo al inicio de la posición	0,68 h	0,7 h
Tiempo al final de la posición	0,43 h	0,4 h
Tiempo de avance del equipo	5,89 h	8,4 h
Tiempo de riego	7,0 h	9,5 h
Pérdidas por rozamiento.	223,8 kPa	116,5 kPa
Presión en el hidrante.	1002 kPa	693,5 kPa

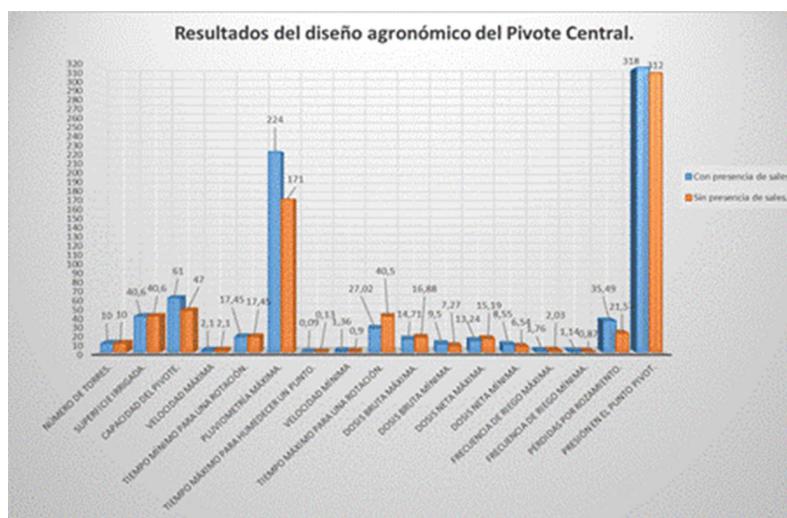


FIGURA 1. Comportamiento parámetros de diseño del Pivote Central.

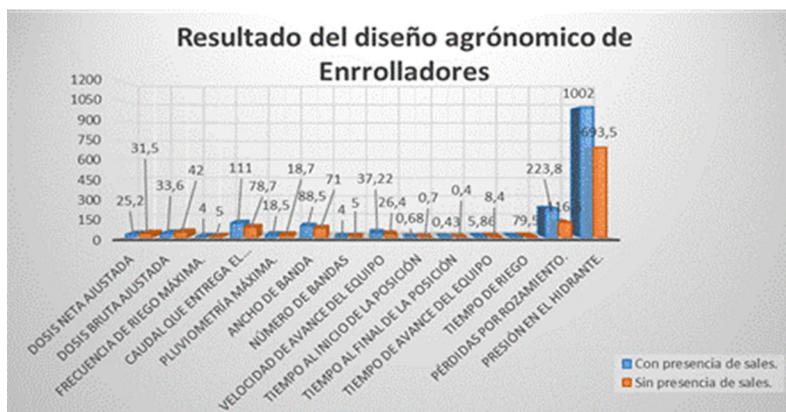


FIGURA 2. Comportamiento parámetros de diseño del Enrollador.

Referente a los cultivos fue conveniente conocer, el marco de plantación y sentido de siembra, la profundidad radical, la tolerancia del cultivo a la inundación y a la salinidad, así como el coeficiente de cultivo en las tres fases principales para poder dar seguimiento a las necesidades de agua de los cultivos durante el manejo del riego en las instalaciones. A los efectos del diseño de los sistemas de riego, las mismas fueron asumidas de acuerdo a lo establecido en la tarea técnica de proyección.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se concibió un pivote central para entregar un caudal = 47 L/s, con una presión necesaria a la entrada de la máquina de 32 mca, con posibilidad para completar una rotación entre 17,45 y 40,5 horas, sin que ocurra escorrentía superficial. Como se trata de una técnica de riego que entrega el agua a las plantas en movimiento y la capacidad de almacenamiento del suelo no es homogénea en todo el perfil del suelo y además de que la dosis bruta máxima es elevada (16,88 mm), se recomienda durante el manejo del agua de riego, pronosticar el momento oportuno para el riego en función del contenido de humedad de suelo.

Como el riego se aplicará cada dos días, es conveniente dividir la parcela en dos mitades iguales, cada una de ellas se regará durante una jornada de riego completa (20 horas con doble turno), teniendo en cuenta el déficit permisible de humedad, para evitar escorrentía. En el caso de la variante con presencia de sales, al incrementarse el caudal medio de bombeo disminuye la frecuencia de riego máxima y por tanto queda diseñada una instalación más restringida, resultando más complicado particionar el riego, sin aplicar automatismos para programar el riego, ya que la frecuencia de riego máxima resultó 1,76 días.

Se seleccionó un enrollador con un cañón de riego que descarga 22 L/s con una presión en la base de 42 mca, como resultado del diseño la parcela quedó dividida en 5 bandas de 355 m cada una. La jornada de riego incluye dos posiciones diarias, cada una se

concibió para un tiempo de riego de 9h y 30 min, se planificó hasta una hora para el cambio de una posición a otra.

A partir de la presión necesaria en el hidrante y aplicando las ecuaciones de Bernoulli y Continuidad, se pudo obtener la presión necesaria en la válvula prevista a la entrada de la parcela, cuyo valor fue aproximadamente el 70% del que tiene lugar en la variante con presencia de sales, muy similar a lo que sucede con el caudal medio de bombeo necesario para el riego de la parcela.

En el diseño de la variante con presencia de sales, el caudal a aplicar se incrementó el 30%, sin embargo, la dosis bruta ajustada a aplicar durante el riego, disminuye un 20%, esto es debido a que al igual a como ocurre con los pivotes centrales, estas máquinas de riego también entregan el agua en movimiento. En todo caso es necesario verificar durante la explotación el contenido de humedad del suelo, ya que las condiciones de sobre humedecimiento o saturación de los suelos conllevan a facilitar el efecto negativo de las sales en el extracto acuoso del suelo.

Efectos de la salinidad en el extracto acuoso del suelo

El principal parámetro de diseño que influye en la modificación de la explotación de ambos equipos de riego es el caudal medio de bombeo que es necesario garantizar para la aplicación de las dosis de riego. Como ya se ha comprobado, al tener en cuenta las necesidades de lavado por las ecuaciones (4) y (21), el caudal se incrementó un 23% en la máquina de pivote central y un 30% en el caso del enrollador, las consecuencias pueden resultar significativamente negativas para la sostenibilidad de la instalación.

Como la superficie a humedecer es la misma, en el caso de la máquina de Pivote central, la Pluviometría también aumenta, esta situación implica la necesidad de prever los posibles excesos de humedad en el perfil efectivo del suelo y puede hacer más difícil el movimiento de la maquinaria de riego, ya que se incrementan las pérdidas superficiales del riego, al igual que el riesgo de saturación de los suelos y el

efecto perjudicial de las sales, esta situación infiere la necesidad de garantizar soluciones de drenaje superficial en el sistema de riego.

En el caso del sistema de riego con Enrollador, esta situación es diferente puesto que numéricamente el valor de la pluviometría se mantiene muy similar en los dos casos; sin embargo, esta situación que en principio parece contradictoria se explica porque en este caso el incremento del caudal medio de bombeo conllevó a seleccionar otro dispositivo de emisión de caudal con otras prestaciones (mayor radio de alcance y mayor presión necesaria para su funcionamiento), esto conllevó a que se incrementara $\approx 20\%$ la superficie a regar en cada posición y por esa razón ambos valores de pluviometría son similares, pero esto no significa que se elimine el riego de saturación del perfil efectivo del suelo.

El hecho de incrementar el volumen de agua aplicado en un tiempo de riego 2,5 horas menor, infiere un riesgo igualmente importante de sobre humedecimiento del suelo debido al riego, con el consecuente efecto negativo de la presencia de sales en el perfil productivo del suelo.

La duración del riego entre ambas variantes no presenta unas diferencias que no se puedan asumir durante la explotación, sin embargo, en el caso del Pivote central, el diseño con presencia de sales en la solución del suelo conlleva a una disminución importante del tiempo máximo para completar una vuelta.

CONCLUSIONES

- La salinidad en el extracto acuoso del suelo presenta efectos negativos sobre el rendimiento de los cultivos, afectando la productividad del agua en las explotaciones agrícolas, estimar las dosis de lavado durante el diseño contribuye a disminuir el efecto negativo de las sales en la solución del suelo.
- Incrementar el volumen de agua a aplicar a los cultivos, teniendo en cuenta la salinidad del agua de riego y en el extracto de saturación del suelo, no necesariamente puede incrementar la duración del riego en instalaciones de riego por aspersión móviles, debido a la particularidad de entregar la dosis de riego en movimiento.
- El deficiente drenaje natural y la ausencia de sistemas de drenaje superficial condicionan la presencia de tenores salinos perjudiciales en los suelos agrícolas de la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca.
- Aún falta por instalar sistemas de riego en una superficie agrícola importante de la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca, esto implica la necesidad de aplicar criterios de selección de técnicas de riego, utilizando información básica

apropiada como una opción válida para incrementar el valor de uso de las fuentes de abasto de la Empresa.

- Como resultado se identificó el caudal medio de bombeo, como el parámetro de diseño que influye significativamente en la explotación de estas máquinas de riego; el incremento de este parámetro infiere la necesidad de establecer sistemas de drenaje parcelario para disminuir los efectos de la saturación de los suelos y la presencia de sales en la solución del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Nos complace reconocer el apoyo ofrecido por el equipo de investigación del Proyecto de Investigación PS113LH001 032 Evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego en la Empresa Agropecuaria “Laguna Blanca”, para el desarrollo de la investigación y las facilidades para la edición y socialización de los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W.: *Water quality for agriculture*, no. ser. Estudio FAO. Riego y Drenaje.No.29, Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Editions FAO ed., vol. 29, Rome, Italy, 1987, ISBN: 92-5-102263-1.
- BARRAGAN-FERNANDEZ, J.D.; CASAÑAS-CLADELLAS, A.: “Sistemas autopropulsados de riego por aspersión a baja presión”, En: *Jornades sobre Recerca, Tecnologia i Societat (1es: 1980: Barcelona, Catalunya)*, Ed. Universitat Politècnica de Barcelona, Barcelona, España, pp. 281-282, 1980.
- BAUCELLS, P.G.; MÉNDEZ, M.A.: “Panorama del riego y el drenaje en cuba”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 13(2): 51-54., 2004, ISSN: 1010-2760.
- CEN: *Máquinas de riego móviles*, Inst. Comité Europeo de Normalización (CEN), norma, España, 2013.
- CHU, S.T.; MOE, M.; GILLEY, G.: *Center Pivot Irrigation Design, [en línea]*, Ed. Agric. Exp. Stn. Tech. Bull, Chu&Moe (1972) ed., vol. 61, 1939-2011 p., 1980, Disponible en: https://openprairie.sdstate.edu/agexperimentsta_tb/61
- DILLON, R.C.; HILER, E.A.; VITTETOE, G.: “Center-pivot sprinkler design based on intake characteristics”, *Transactions of the ASAE*, 15(5): 996-1001, 1972.
- DSF-EALB-SANTIAGO DE CUBA: *Informe de suelos de la Empresa Agropecuaria Laguna Blanca. Departamento de Suelos y Fertilizantes.*, Inst. Empresa Agropecuaria Laguna Blanca

- (EALB). Departamento de Suelos y Fertilizantes (DSF), Delegación de la Agricultura, Informe de suelos de la EALB, Santiago de Cuba. Cuba, 2006.
- FAO: *Producción de alimentos: Función decisiva del agua*, Inst. Food & Agriculture Org. (FAO), Roma. Italia, 1996.
- FAO: “El agua como recurso para la producción de alimentos”, En: *26ª Conferencia regional de la F.A.O. para América Latina y el Caribe. Mérida, México*, Ed. Food & Agriculture Org. (FAO), Mérida, México, 2000.
- FERNÁNDEZ-HUNG, K.; VARGAS-RODRÍGUEZ, P.; CUETO-RODRÍGUEZ, J.R.; BROWN-MANRIQUE, O.N.: “Capacity of center pivot systems and emitter discharges for citrus irrigation. A case study”, *INGE CUC*, 18(1): 105-113, 2022, ISSN: 2382-4700, DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.18.1.2022.09>.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D.: *Sprinkle and trickle irrigation*, Ed. Springer, vol. 3, New York, USA, 1990.
- MFP- CUBA: *Sistema tarifario eléctrico para servicios no residenciales, pertenecientes a empresas y entidades 100% cubanas*, Inst. Ministerio de Finanzas y Precios (MFP), Resolución 28/2011. 2021, La Habana, Cuba, publisher: Ministerio de Finanzas y Precios La Habana, Cuba, 2021.
- PALACIOS-VARGAS, R.P.: *Evaluación de la eficiencia en el uso del agua de riego en la EALB*, Inst. Empresa Agropecuaria Laguna Blanca (EALB), Informe de Proyecto de Investigación PS113LH001 032, Santiago de Cuba, Cuba, 2021.
- PIZARRO, F.: *Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos*, Ed. Editorial Agrícola Española, S.A, 2a ed. ed., Madrid, España, 541 p., publisher: Madrid (Spain) Edit. Agrícola Espanola, 1985.
- TARJUELO, M.B.J.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Mundi Prensa, Edición Revisada y Ampliada. Madrid, Barcelona y México ed., Madrid, España, 2005, ISBN: 84-8476-225-4.
- USDA: *Manual Nacional de Ingeniería de Riego. Capítulo 7.*, Ed. USDA, Departamento de Agricultura de Estados Unidos ed., USA, 2013.
- USDA-NRCS: *Sprinkler Irrigation. National Engineering Handbook, [en línea]*, Part 623 ed., USA, 2016, Disponible en: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/waterMgt/irrigation/NEH15/ch11>.
- VARGAS-FERRER, P.: *Efecto de la salinidad del extracto acuoso del suelo en la capacidad de Pivotes Centrales*, Universidad de Oriente, Informe de tesis de culminación de estudios., Santiago de Cuba. Cuba, 2022.
- Jorge Carlos Armas-Baño, Estudiante, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba.
- Pavel Vargas-Ferrer, Ing., Dirección Provincial de Proyectos Hidráulicos. INRH. Santiago de Cuba. e-mail: pavel.vargasferrer@gmail.com.
- Pável Vargas-Rodríguez, Dr.C., Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba: e-mail: p Vargas@uo.edu.cu.
- Alberto Méndez-Jocik, Dr.C., Jefe del Departamento de Diseño, Empresa de Proyectos Ingeniería, La Habana, Cuba, e-mail: joc4263@gmail.com.
- Kaddiel Fernández-Hung, Ing., Especialista Grupo de Difusión Tecnológica Empresa de Cítricos Contra maestre, Santiago de Cuba: e-mail: opp1@geditec.co.cu.