

Simplificación y adecuación del método de Allen para determinar el caudal de diseño de los pivotes para el riego del cultivo de la papa

Ramón Pérez-Leira
Yoel Martínez-González

Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Cuba

En Cuba, el diseño hidráulico de los pivotes se ha realizado mediante el uso de programas de computación basados en restricciones hidráulicas y operacionales, con lo cual se ha dejado de considerar la compatibilidad entre la pluviosidad y la velocidad de infiltración del suelo. En busca de una mayor eficiencia en los diseños de los pivotes se realiza el presente trabajo, con el objetivo de simplificar el sistema de ecuaciones propuesto por Allen (1990) para el diseño de los pivotes y que se basa en las propiedades de infiltración del suelo. El nuevo procedimiento de cálculo permite evitar un proceso iterativo en la determinación de la dosis de riego aplicada al suelo y la pluviosidad máxima. La programación del método en un nuevo algoritmo lineal en Excel se compara con el programa USUPivot y se aplica a un caso de estudio para el cultivo de la papa. Los resultados demuestran precisión y mayor simplicidad para casos típicos en los cuales es posible determinar el caudal de diseño de los pivotes sólo en función de su longitud y de la cantidad de horas diarias a regar.

Palabras clave: simplificación, diseño, pivotes, ecuaciones, algoritmo, caudal, riego, papa.

Introducción

En las últimas décadas, el uso de las máquinas de pivote se ha hecho extensivo sobre diversas regiones, haciendo posible el riego en diferentes condiciones de clima, suelo y cultivo.

La fácil automatización, el bajo requerimiento de fuerza laboral y la posibilidad de utilizar bajas presiones han sido las razones principales que han permitido la rápida extensión de esta técnica de riego (Lyle y Butler, 1980; Bordousky *et al.*, 1992, y Tarjuelo, 1999).

Sin embargo, la baja de la presión de funcionamiento de los pivotes trae como consecuencia la reducción del diámetro mojado y el aumento del diámetro de las boquillas y de las gotas producidas. Esto implica un aumento de la pluviosidad del sistema, lo que acrecienta también el riesgo de que existan problemas de escorrentía o encharcamiento de los suelos si no se logra una

correspondencia precisa entre la intensidad de aplicación de la lluvia y la velocidad de infiltración del suelo regado.

En 1972, Dillon *et al.*, citados por Tarjuelo, 1999, desarrollaron un procedimiento para compatibilizar la utilización del riego de un pivote en un determinado suelo y cultivo sin producir escorrentía. Para lograrlo, ajustaron la velocidad de rotación del pivote a la vez que tuvieron en cuenta el almacenaje superficial de agua aplicada.

Allen (1990) desarrolló un procedimiento de diseño para determinar la mínima presión de funcionamiento y el mínimo diámetro mojado en el extremo del pivote sin que se produzca escorrentía. El procedimiento consiste en utilizar una modificación de la ecuación de Kostiakov deducida con anillos infiltrómetros para estimar la curva de infiltración equivalente bajo riego por aspersión.

Este procedimiento fue recogido en el programa de computación USUPivot (Allen, 1991) para facilitar los engorrosos cálculos matemáticos e iteraciones que

implicaba para dar solución a su sistema de ecuaciones.

El método propuesto por Allen constituyó un aporte considerable a la precisión del diseño hidráulico de los pivotes, al incluir los elementos agronómicos que incidían en el aprovechamiento óptimo del agua entregada a los cultivos.

Sin embargo, las condiciones de diseño implícitas en *USUPivot* limitan su aplicación al no poder realizar el diseño de pivotes equipados con los difusores disponibles en el mercado que generan anchuras mojadas superiores a las predeterminadas en dicho programa.

En Cuba, un porcentaje considerable de las producciones agrícolas (especialmente las que provienen del cultivo de la papa) se garantiza con el riego de los pivotes equipados con boquillas difusoras, y aunque se han explotado más de mil máquinas de pivote sobre diversos suelos y cultivos durante más de dos décadas, no se ha implementado ninguna forma de diseño basada en las propiedades de infiltración del suelo.

El diseño hidráulico de los pivotes se realiza de manera habitual mediante el uso del programa de computación *Pivot* de González y Navarro (1997), basado en restricciones hidráulicas y operacionales, y nunca se ha considerado de manera tan precisa la compatibilidad entre la pluviosidad y la velocidad de infiltración como lo desarrolló Allen en su metodología.

Por las razones expuestas con anterioridad y en busca de una mayor eficiencia en los diseños de los pivotes se realiza el presente trabajo con los siguientes objetivos:

- Simplificar y programar el método de Allen de manera que permita una mayor adecuación de su procedimiento de cálculo a las condiciones reales del riego de los pivotes con boquillas difusoras.
- Aplicar el nuevo algoritmo de cálculo en la determinación del caudal de diseño para diferentes longitudes de pivote y regímenes de riego diario para un caso de estudio en el cultivo de la papa.

Simplificación y adecuación del método de cálculo

Para la realización de este trabajo se siguió la secuencia de cálculo propuesta por Allen (1990) que se muestra a continuación:

1. Seleccionar una serie de dosis de aplicación (en milímetros) por paso de equipo (*Db*), comenzando por una pequeña. Se tomaron valores desde 10 hasta 80 mm. Para cada *Db* se hará lo siguiente:
2. Calcular la dosis bruta descargada (*Db*) por la expresión:

$$Db = \frac{Dba}{Pe} = \frac{Dn}{Ea} = \frac{N \cdot lr}{EDa \cdot Pe} \quad (mm)$$

donde:

Pe = proporción efectiva del agua emitida por los emisores que llega a la superficie del suelo, determinada a partir de la expresión de Fisher y Allen, citados por Tarjuelo, 1999.

$$Pe = 0.976 + 0.005 \cdot ETP - 0.00017 \cdot ETP^2 + 0.0012 \cdot V - IG (0.00043 \cdot ETP + 0.00018 \cdot V + 0.000016 \cdot ETP \cdot V)$$

donde:

ETP = evapotranspiración potencial (se asumió para la papa 6.2 mm/día, según Roque, 1995).

V = velocidad del viento (se asumió 15 km/h como promedio).

IG = índice de grosor de la gota definido como

$$0.032 \frac{P^{1.3}}{B}$$

donde:

P = presión de operación de la boquilla (para el ejemplo asumido, *P* (100-250 kPa))

B = diámetro de la boquilla (para este caso, *B* (2.5-9.0 mm)).

Como en este caso *IG*, para los dos casos extremos de presión y diámetro, es inferior a siete, entonces se toma este último valor para el cálculo de *Pe*. Se trabajó con el resultado final de *Pe* = 0.97.

Dn = dosis neta de riego pretendida (mm).

Ea = eficiencia general de aplicación (como decimal).

N = necesidades punta del cultivo (mm/día) (equivalente a *ETP*).

lr = intervalo entre riegos (días) (se asumen cuatro días para el cultivo de la papa).

EDa = eficiencia de distribución del agua (obtenida de tabla según Keller y Bliesner, (1990), en función del *CUh* y el área adecuadamente regada) para un *CUh* = 80 % y *AAR* = 75 % *EDa* = 0.831.

3. Calcular los valores de pluviosidad máxima (*Pm*), correspondiente al centro del modelo elíptico (mm/

min) y la altura de agua aplicada sobre el terreno (D) en un tiempo t (mm), según las expresiones siguientes:

$$Pm = \frac{\left(1 - SR \frac{Pm}{K}\right) (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}}{\left[1.05 - 1.6\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5\right)^2\right]^{1/2}}$$

$$D = AS + \left\{ \frac{\left[1.05 Pm^2 - 1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5\right)^2\right]^{-1/2} \left[-1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5\right) / Dba\right]}{\left(1 - SR \frac{Pm}{K}\right) K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{-1/(n+1)} n}\right\}^{-n+1}$$

donde:

SR = factor de sellado relativo del suelo (0.36 para suelo recién labrado, 0.20 para suelo labrado hace tiempo y 0.16 para rastrojo de alfalfa). Se asumió $SR = 0.16$.

K = coeficiente empírico de la ecuación de Kostiakov (mm/min).

AS = almacenaje superficial después de haberse iniciado el encharcamiento (mm).

n = coeficiente experimental de ajuste de la ecuación de Kostiakov.

Como se puede apreciar, existen dos ecuaciones con dos incógnitas que Allen consideró "difícilmente despejables", por lo que elaboró el programa *USUPivot* para poder solucionar dicho problema a través de un ciclo iterativo (Tarjuelo, 1999). Para abreviar este diseño se realizó una simplificación de estas ecuaciones y así se evitó realizar las iteraciones. Un resumen de la secuencia seguida para esta simplificación se ofrece en el anexo 1. Las dos ecuaciones finales reflejadas a continuación posibilitaron continuar el método a través de un algoritmo de cálculo lineal.

$$Pm = \frac{1}{\frac{SR}{K} + \frac{\left[1.05 - 1.6\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5\right)^2\right]^{1/2}}{(D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}}$$

$$D = Dba \cdot \frac{1}{2} \left\{ (n+1) \left(\frac{As}{Dba} + 0.5\right) - n + \sqrt{-4 \left[\frac{\left[n - (n+1) \left(\frac{As}{Dba} + 0.5\right) \right]^2}{0.25 \left(2(n+1) \left(\frac{As}{Dba}\right) - n \right) \right]} + 0.656 \cdot n \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \right\}$$

- Calcular el tiempo que tarda el modelo de reparto de agua (t_p) en pasar sobre un punto del terreno en el extremo del pivote (min), teniendo en cuenta que se forma una semielipse, cuyo eje horizontal es t_p , el semieje vertical es Pm y el área es Dba . La expresión final de cálculo es la siguiente:

$$t_p = \frac{4 Dba}{Pm}$$

- Calcular la velocidad con que debe moverse la última torre (V) para poder aplicar la Dba y satisfacer las necesidades del cultivo (m/min):

$$V = \frac{2\pi \cdot Lt}{60T \cdot lr} = \frac{2\pi \cdot Lt \cdot N}{60T \cdot Dba \cdot EDa}$$

donde:

Lt = distancia del centro del pivote a la última torre (m).
 T = tiempo de riego al día (h/día).

- Calcular la mínima anchura mojada (AM) en el extremo del pivote para que no haya escorrentía (m):

$$AM = t_p \cdot V = \frac{8 Lt \cdot N}{60T \cdot Pm \cdot EDa}$$

- Seleccionar un emisor que moje una anchura mayor que AM . En este paso, el programa *USUPivot* realiza su comparación con respecto a las siguientes condiciones reflejadas en el cuadro 1.

En la actualidad, los modelos y posibilidades de alcance de las boquillas difusoras son muy variados, por lo que asumir una anchura mojada de cuatro metros le resta posibilidades de un análisis más preciso, al no ajustarse a las anchuras reales que se pueden alcanzar con diferentes modelos de boquillas o de *rotators* en los

Cuadro 1. Valores de AM para diferentes dispositivos asumidas por el programa USUPivot.

Tipo de emisor	Anchura mojada (m)
Boquilla difusora	4
Tubo transversal de 6 m con boquillas	7
Tubo transversal de 14 m con boquillas	12
Aspersores de impacto de baja presión	22
Aspersores de impacto de media presión	26
Aspersores de impacto de alta presión	30

pivotes. En Cuba se utilizan boquillas difusoras que alcanzan valores de anchura mojada entre 4.8 m y 14.4 m en dependencia del diámetro de salida y la presión de operación (Cárdenas, 2000). Para las condiciones de este estudio se asumió un valor promedio de 10 m, por lo que los valores de AM con que se compararon los resultados fueron modificados (ver cuadro 2).

8. Calcular el gasto de diseño del pivote (Q) a partir de la expresión:

$$Q = 0.116 \frac{N \cdot A}{Ea \cdot Fd} \quad (l/s)$$

donde:

A = área de riego que abarca el pivote (ha) determinada por la expresión:

A = $\pi \cdot L^2 \cdot 10^{-4}$ (L=longitud que riega el pivote en metros).

Fd = fracción del día empleado en regar (como decimal):
Fd = T/24.

donde:

T = tiempo de operación o de riego en el día (horas).

Cuadro 2. Valores de AM que se asumieron en la nueva programación.

Tipo de emisor	Anchura mojada (m)
Boquilla difusora	10
Tubo transversal de 10 m con boquillas	16
Aspersores de impacto de baja presión	22
Aspersores de impacto de media presión	26
Aspersores de impacto de alta presión	30

Este algoritmo de cálculo fue diseñado en una hoja de Excel y validado (con las nuevas ecuaciones simplificadas) con el programa USUPivot para un caso típico con diversas longitudes de pivote. Los resultados obtenidos al comparar los gastos de diseño por ambos procedimientos se pueden apreciar en el anexo 2.

Aplicación del nuevo algoritmo al caso de estudio

Una vez comparado el algoritmo, se aplicó el método a dos tipos de suelo con diferentes parámetros de infiltración, según la ecuación de velocidad de infiltración de Kostiakov:

$$i = K \cdot n \cdot t^{n-1}$$

donde:

i = velocidad de infiltración (mm/min).

K = coeficiente empírico de Kostiakov (mm/min).

t = tiempo (min).

n = exponente empírico de Kostiakov.

La selección de estos suelos se realizó de forma que constituyera un ejemplo representativo de aquellos en los que más predomina el riego con máquinas de pivote central. Los parámetros de infiltración de los suelos seleccionados se presentan en el cuadro 3.

Para este análisis se consideraron cinco regímenes de riego diarios: 10, 12, 14, 16 y 18 horas/día, de forma tal que los cuatro primeros se adaptan mejor a las posibilidades técnicas de las máquinas modelo Fregat y los cuatro últimos a las de las máquinas eléctricas modelo Kuban.

Una vez definido el gasto de diseño para cada una de estas variantes de explotación, se realizó el diseño hidráulico de cada longitud comercial y modelo de pivote mediante el programa de computación Pivot, diseñado por González y Navarro (1997). Este diseño permitió conocer la distribución de diámetros, reguladores de presión, caudal de salida y presión necesaria a la entrada de cada ramal de riego.

Cuadro 3. Parámetros de la ecuación de Kostiakov de los suelos seleccionados, según Faran et al. (1998).

Suelo	Parámetros de la ecuación de Kostiakov	
	K (mm/min)	n
Ferralítico rojo típico	24.87	0.324
Ferralítico rojo compactado	50.16	0.322

Como primer resultado significativo se pudo comprobar que las anchuras mojadas que se requerían para todas las variantes de cálculo fueron inferiores a los diez metros que se obtenían con el uso de las boquillas difusoras, por lo que se descarta el riesgo de encharcamiento superficial con el riego de estos dispositivos en los suelos rojos analizados.

Una vez definidas las variables de cálculo, se obtuvieron los caudales o gastos de diseño para cada modelo de pivote. En los cuadros 4 y 5 se observan los valores de caudal para cada una de las longitudes comerciales de pivotes de accionamiento hidráulico y eléctrico de los modelos Fregat y Kuban, respectivamente.

Como se puede observar en el cuadro 5, los valores de la dotación permanecen constantes para todas las longitudes de pivote. Los parámetros que inciden en este resultado son las siguientes: necesidades hídricas del cultivo al día (N), la eficiencia de aplicación (E_a) y la fracción del día empleado para el riego (F_d). Como este último es el único parámetro variable en este análisis, entonces para cualquier longitud de máquina

la dotación sólo depende del número de horas al día que se riegue.

Hay una restricción adicional que está implícita en este análisis de gasto para los pivotes, que es el criterio del rango de velocidad óptima de circulación en la tubería de la máquina. Pérez (1981) y Pérez (2001) coinciden en que este rango desde estar entre 0.9 y 1.5 m/s. Sin embargo, los fabricantes de máquinas Fregat y Kuban recomiendan caudales de circulación hasta los 90 l/s. Para alcanzar este gasto en las tuberías de las Fregat de diámetro de 177.4 mm (7"), se requiere de una velocidad de circulación superior a los 3.6 m/s. Basado en este criterio, se ha decidido respetar la condición de no sobrepasar de 90 l/s los gastos de circulación en ninguno de los dos modelos de pivote analizados. Por tal motivo, se definió el caudal de 90 l/s como el límite superior de gasto para diseñar los pivotes, independientemente de los resultados obtenidos en el procedimiento de cálculo. A modo de nomograma se confeccionó un gráfico donde se relacionan, para diferentes longitudes de pivote y regímenes de riego diario, los gastos de diseño óptimos

Cuadro 4. Modelos, cantidad de torres (CT), dotación (q) y gasto de diseño para todas las longitudes comerciales de pivotes modelo Fregat, obtenido para diferentes regímenes de riego diarios (10, 12, 14 y 16 h/día).

Modelo de máquina	CT	10 horas/días		12 horas/día		14 horas/días		16 horas/días	
		q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)
DMY-A199	7	2.25	28.04	1.88	23.37	1.61	20.03	1.41	17.53
DMY-A229	8	2.25	37.04	1.88	30.86	1.61	26.46	1.41	23.15
DMY-A253	9	2.25	45.47	1.88	37.89	1.61	32.48	1.41	28.42
DMY-A283	10	2.25	56.71	1.88	47.26	1.61	40.51	1.41	35.45
DMY-A308	11	2.25	67.09	1.88	55.91	1.61	47.92	1.41	41.93
DMY-A337	12	2.25	80.61	1.88	67.18	1.61	57.58	1.41	50.38
DMY-B379	13	2.25	101.82	1.88	84.85	1.61	72.73	1.41	63.64
DMY-B409	14	2.25	118.34	1.88	98.62	1.61	84.53	1.41	73.96
DMY-B434	15	2.25	133.14	1.88	110.95	1.61	95.10	1.41	83.21
DMY-B463	16	2.25	151.93	1.88	126.61	1.61	108.52	1.41	94.96

Cuadro 5. Modelos, cantidad de torres (CT), dotación (q) y gasto de diseño para todas las longitudes comerciales de pivotes modelo Kuban, obtenido para diferentes regímenes de riego diarios (12, 14, 16 y 18 h/día).

Modelo de máquina	CT	12 horas/días		14 horas/día		16 horas/días		18 horas/días	
		q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)	q (l/s/ha)	Gasto (l/s)
LK1-PK-358	7	1.88	75.63	1.61	64.83	1.41	56.72	1.25	50.42
LK1-PK-397	8	1.88	93.01	1.61	79.72	1.41	69.76	1.25	62.00
LK1-PK-435	9	1.88	111.66	1.61	95.71	1.41	83.75	1.25	74.44
LK1-PK-474	10	1.88	132.58	1.61	113.64	1.41	99.44	1.25	88.39
LK1-PK-500	11	1.88	147.53	1.61	126.45	1.41	110.65	1.25	98.35
LK1-PK-512	12	1.88	154.69	1.61	132.59	1.41	116.02	1.25	103.13
LK1-PK-551	13	1.88	179.16	1.61	153.56	1.41	134.37	1.25	119.44
LK1-PK-589	14	1.88	204.72	1.61	175.48	1.41	153.54	1.25	136.48

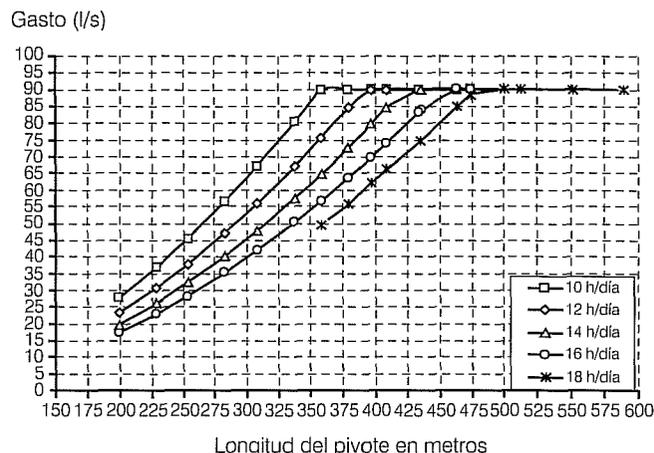
para los suelos ferralíticos rojos analizados (ilustración 1).

El uso de este nomograma, aunque resulta menos preciso y su aplicación está restringida para las condiciones de suelo y cultivos que se abordan en el estudio, constituye otra vía para abreviar la determinación del caudal de diseño para cada longitud de pivote y permite prescindir de todo el algoritmo de cálculo para tener un conocimiento previo de la capacidad de bombeo que se requiere en cada variante.

Posteriormente es posible continuar el procedimiento para el cálculo de la presión de trabajo necesaria a la entrada del pivote, según Tarjuelo (1999) o mediante el programa *Pivot* (González y Navarro, 1997).

El procedimiento desarrollado por dichos autores permitió conocer, además, el rango de dosis de riego, régimen de velocidades de las máquinas y los tiempos de aplicación requeridos para cada una de las longitudes de pivotes. Con ello fue posible descartar aquellas aplicaciones que demandaron velocidades de trabajo superiores a las máximas posibles a alcanzar por la técnica de riego (menores en las Fregat y mayores en las Kuban). También fue posible desechar aquellas aplicaciones que, por el contrario, requerían tiempos de aplicación superiores al intervalo máximo de riego para el cultivo de la papa de cuatro días (96 horas), según recomendaciones de Roque (1995) y González *et al.* (2000). Un resumen de esta información se puede apreciar en los cuadros 6 y 7.

Ilustración 1. Nomograma para la determinación del gasto de diseño de las máquinas Fregat y Kuban a partir de su longitud y el régimen de riego diario.



Del análisis final se puede resumir que existe una correspondencia directa entre el régimen de riego diario y la dotación que se le entrega al pivote, una vez que se han mantenido constantes el resto de las variables de diseño (relacionadas con el suelo y el cultivo) para un caso de estudio. Por tal motivo es posible adoptar el criterio de la dotación para diseñar los pivotes cuando el resto de las condiciones son análogas.

De acuerdo con las condiciones operativas del riego y las disponibilidades de energía eléctrica en las empresas agrícolas del país, es posible asumir valores de dotación

Cuadro 6. Parámetros técnico-explotativos de las máquinas Fregat para los cuatro regímenes de riego diario analizados.

Cantidad de torres	Longitud (m)	10 horas/días Dotación 2.25 l/s/ha			12 horas/día Dotación 1.88 l/s/ha			14 horas/días Dotación 1.61 l/s/ha			16 horas/días Dotación 1.41 l/s/ha		
		Rango Dba (mm)	Rango de Tr (h)	Q (l/s)	Rango Dba (mm)	Rango de Tr (h)	Q (l/s)	Rango Dba (mm)	Rango de Tr (h)	Q (l/s)	Rango Dba (mm)	Rango de Tr (h)	Q (l/s)
		7	199.0	20-70	26.8-93.8	28.0	15-50	24.1-80.4	23.4	12-50	22.5-93.8	20.0	10-40
8	228.7	20-70	26.8-93.8	37.0	20-50	32.2-80.4	30.9	15-50	28.2-93.8	26.5	12-40	25.7-85.8	23.2
9	253.4	25-70	33.5-93.8	45.5	20-50	32.2-80.4	37.9	15-50	28.2-93.8	32.5	15-40	32.2-85.8	28.4
10	283.0	25-70	33.5-93.8	56.7	20-50	32.2-80.4	47.3	20-50	37.5-93.8	40.5	15-40	32.3-85.8	35.4
11	307.8	30-70	40.2-93.8	67.1	25-50	40.2-80.4	55.9	20-50	37.5-93.8	47.9	20-40	42.9-85.8	41.9
12	337.4	30-70	40.2-93.8	80.6	25-50	40.2-80.4	67.2	20-50	37.5-93.8	57.6	20-40	42.9-85.8	50.4
13	379.2	40-70	53.6-93.8	101.8	30-50	48.2-80.4	84.8	25-50	46.9-93.8	72.7	20-40	42.9-85.8	63.6
14	408.8	40-70	53.6-93.8	118.3	30-50	48.2-80.4	98.6	25-50	46.9-93.8	84.5	25-40	42.9-85.8	74.0
15	433.6	40-70	53.6-93.8	133.1	40-50	64.3-80.4	110.9	30-50	56.3-93.8	95.1	30-40	53.6-85.8	83.2
16	463.2	40-70	53.6-93.8	151.9	40-50	64.3-80.4	126.6	30-50	56.3-93.8	108.5	30-40	53.6-85.8	95.0

Dba = dosis o altura de agua a aplicar (mm).

Tr = tiempo para aplicar un riego con determinada Dba (h)

Q = gasto o caudal del pivote (l/s).

Valores de gasto prohibitivos para el pivote simbolizados en negro.

Cuadro 7. Parámetros técnico-explotativos de las máquinas Kuban para los cuatro regímenes de riego diario analizados.

Cantidad de torres	Longitud (m)	12 horas/días Dotación 1.88 l/s/ha			14 horas/día Dotación 1.61 l/s/ha			16 horas/días Dotación 1.41 l/s/ha			18 horas/días Dotación 1.25 l/s/ha		
		Rango Dba	Rango de Tr	Q	Rango Dba	Rango de Tr	Q	Rango Dba	Rango de Tr	Q	Rango Dba	Rango de Tr	Q
		(mm)	(h)	(l/s)	(mm)	(h)	(l/s)	(mm)	(h)	(l/s)	(mm)	(h)	(l/s)
7	358	12-50	19.3-80.4	75.6	10-50	18.8-93.8	64.8	10-40	21.5-85.8	56.7	10-30	24.1-72.4	50.4
8	397	12-50	19.3-80.4	93.0	10-50	18.8-93.8	79.8	10-40	21.5-85.8	69.8	10-30	24.1-72.4	62.0
9	435	15-50	24.1-80.4	111.7	12-50	22.5-93.8	95.7	10-40	21.5-85.8	83.7	10-30	24.1-72.4	74.4
10	474	15-50	24.1-80.4	132.6	12-50	22.5-93.8	113.6	12-40	25.7-85.8	99.4	10-30	24.1-72.4	88.8
11	500	15-50	24.1-80.4	147.5	15-50	28.2-93.8	126.5	12-40	25.7-85.8	110.6	10-30	24.1-72.4	98.3
12	512	15-50	24.1-80.4	154.7	15-50	28.2-93.8	132.6	12-40	25.7-85.8	116.0	12-30	29.0-72.4	103.1
13	551	20-50	32.2-80.4	179.2	15-50	28.2-93.8	153.6	15-40	32.2-85.8	134.4	12-30	29.0-72.4	119.4
14	589	20-50	32.2-80.4	204.7	15-50	28.2-93.8	175.5	15-40	32.2-85.8	153.5	12-30	29.0-72.4	136.5

Dbá = dosis o altura de agua a aplicar (mm).

Tr = tiempo para aplicar un riego con determinada Dbá (h)

Q = gasto o caudal del pivote (l/s).

Valores de gasto prohibitivos para el pivote simbolizados en negro.

para el diseño de las máquinas de accionamiento hidráulico Fregat entre 1.61 y 1.88 l/s/ha (12 a 14 horas de riego diarias) y para las máquinas eléctricas Kuban, dotaciones de 1.41 a 1.61 l/s/ha (14 a 16 horas de riego diarias).

Conclusiones

- La simplificación del método de Allen a través del nuevo sistema de ecuaciones, así como la concepción de un algoritmo lineal para la determinación del gasto de diseño de los pivotes

permite una aplicación más directa y efectiva de este procedimiento a las condiciones de anchura mojada que se consiguen con el uso de boquillas difusoras o cualquier otro dispositivo de emisión.

- La adecuación de este algoritmo de cálculo a casos típicos, asociados con suelos y cultivos de interés productivo, permite simplificar aún más el diseño de los pivotes, al quedar sujeto esto último a la longitud del ramal y al régimen de riego diario.
- Los resultados obtenidos en este trabajo contribuyen a la introducción y aplicación de la metodología de Allen, y sientan las bases para futuros trabajos de programación relacionados con esta aplicación.

Anexo 1

Simplificación del sistema de ecuaciones de Allen para el cálculo de la pluviometría máxima (P_m), y dosis o altura de agua (D) aplicada en un tiempo t .

Simplificación de P_m a partir de la expresión original (1a):

$$P_m = \frac{\left(1 - SR \frac{P_m}{K}\right) (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}}{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Dbá} - 0.5\right)^2\right]^{1/2}} \quad (1a)$$

$$\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2} Pm = \left(1 - SR \frac{Pm}{K} \right) (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)} \quad (2a)$$

$$= (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{n/(n+1)} - \frac{SR}{K} (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)} Pm$$

$$\left\{ \left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(D / Dba - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{SR}{K} (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)} \right\} \quad (3a)$$

$$Pm = (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}$$

$$Pm = \frac{(D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{n/(n+1)}}{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2} + \frac{SR}{K} (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}} \quad (4a)$$

$$Pm = \frac{1}{\frac{SR}{K} + \frac{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Dba} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2}}{(D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}}} \quad (5a)$$

Simplificación de D a partir de la expresión original (1b):

$$D = \left\{ \frac{\left[1.05 Pm^2 - 1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(D / Dba - 0.5 \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[-1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(D / Dba - 0.5 \right) / Dba \right]}{\left(1 - SR \frac{Pm}{K} \right) K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{-1/(n+1)} n} \right\}^{- (n+1)} + AS \quad (1b)$$

$$(D - AS)^{-\frac{1}{n+1}} = \left\{ \frac{\left[1.05 Pm^2 - 1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(D / Dba - 0.5 \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[-1.6 Pm^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(D / Dba - 0.5 \right) / Dba \right]}{\left(1 - SR \frac{Pm}{K} \right) K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{-1/(n+1)} n} \right\} \quad (2b)$$

$$(D - AS)^{-\frac{1}{n+1}} = \frac{\left[1.6 Pm \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right) / Db a \right]}{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2} \left(1 - SR \frac{Pm}{K} \right) K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{-1/(n+1)} n} \quad (3b)$$

Sustituyendo 6a en 3b, la expresión quedaría:

$$(D - AS)^{-\frac{1}{n+1}} = \frac{\left[1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{1}{Db a} \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right) \right]}{\left[\frac{SR}{K} + \frac{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2}}{(D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}} \right]} \cdot \frac{1}{\left[1 - \frac{SR}{K} \frac{1}{\left[\frac{SR}{K} + \frac{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2}}{(D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}} \right]} \right]} K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{1/(n+1)} n} \quad (4b)$$

$$(D - AS)^{-\frac{1}{n+1}} = \frac{1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{1}{Db a} \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right)}{\frac{1}{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{D}{Db a} - 0.5 \right)^2 \right]^{1/2}} (D - AS)^{n/(n+1)} (n+1)^{n/(n+1)} K^{1/(n+1)}} K^{\frac{1}{n+1}} (n+1)^{-1/(n+1)} n} \quad (5b)$$

$$(D - AS)^{-\frac{1}{n+1}} = - \frac{1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{1}{Db\bar{a}} \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right) (n+1) (D - AS)^{n/(n+1)}}{\left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right)^2\right] n} \quad (6b)$$

$$\frac{(D - AS)^{\frac{1}{n+1}}}{Db\bar{a}} = \frac{n \left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right)^2\right]}{(n+1) 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right) (D - AS)^{\frac{1}{n+1}}} \quad (7b)$$

$$\left(\frac{D}{Db\bar{a}} - \frac{AS}{Db\bar{a}}\right)^{\frac{1}{n+1}} = \frac{n \left[1.05 - 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right)^2\right]}{(n+1) 1.6 \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - 0.5\right) \left(\frac{D}{Db\bar{a}} - \frac{AS}{Db\bar{a}}\right)^{\frac{1}{n+1}}} \quad (8b)$$

Luego de varias simplificaciones queda:

$$D = Db\bar{a} \frac{1}{2} \left\{ (n+1) \left(\frac{AS}{Db\bar{a}} + 0.5\right) - n + \sqrt{\left[n - (n+1) \left(\frac{AS}{Db\bar{a}} + 0.5\right) \right]^2 - 4 \left[0.252 \left((n+1) \left(\frac{AS}{Db\bar{a}}\right) - n \right) + 0.656 n \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \right]} \right\} \quad (9b)$$

Anexo 2

Comparación del nuevo algoritmo con el programa *USUPivot*.

Condiciones para las cuales se validó el nuevo sistema de ecuaciones:

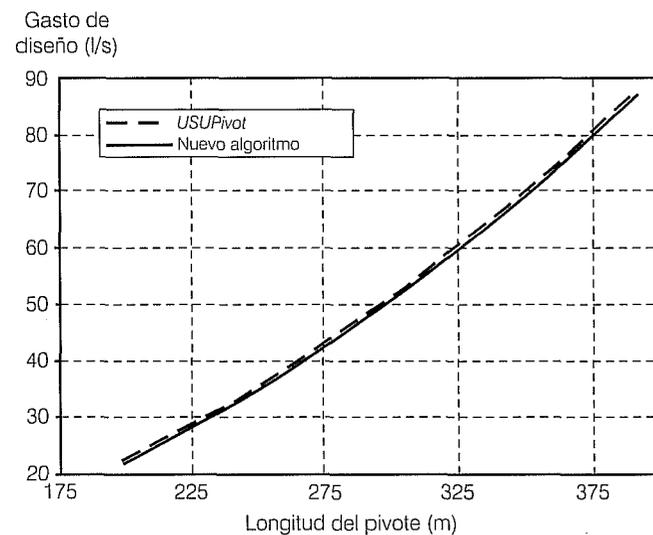
Suelo ferralítico rojo compactado con ecuación de infiltración	$Y = 50.16 t^{0.322}$
Almacenamiento superficial	2 mm
Factor de sellaje superficial	0.16
Longitud del pivote	Variable
Evapotranspiración máxima del cultivo (papa)	6.2 mm/día
Velocidad del viento	4 m/s
Coefficiente de uniformidad	80%
Área regada adecuadamente	75%
Eficiencia general de aplicación	80%
Horas de riego al día	12 h
Modelo de distribución	Elíptico

Recibido: 16/01/2003
Aprobado: 01/08/2003

Referencias

- ALLEN, R.G. Applicator selection along center pivots using soil infiltration parameters. *Visions of the future, Proceedings of the Third National Irrigation Symposium, ASAE*. Phoenix, Arizona, 1990, pp. 549-555.
- ALLEN, R.G. *Center pivot and linear move nozzle selection program*. Logan: Dept. Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, 1991.
- BORDOUSKY, J.P., LYLE, W.M., LASCANO, R.J. y UPCHURCH, D.R. Cotton irrigation management with LEPA systems. *Trans. ASAE*. Vol. 35, núm. 3, 1992, pp. 879-884.
- CÁRDENAS L., J.F. *Estudio del uso de la boquilla difusora cubana en las máquinas de riego de pivote central*. Tesis para optar por el título de Master en Ciencias de Riego y Drenaje. La Habana: Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Universidad Agraria de La Habana, 2000, pp. 53-55.
- LYLE, P. y BUTLER, G. Low energy labor from Texas pivot. *Irrigation farmer*. Vol. 7, núm. 4, 1980, p. 4.
- FARAN, M., RODRÍGUEZ, J.A. y DÍAZ, A. Familia de curvas de infiltración de los suelos arroceros cubanos. *Ciencias técnicas agropecuarias*. Vol. 8, núm. 1, 1998, pp. 75-77.
- GONZÁLEZ, B.P. y NAVARRO, F.R. *PIVOT: sistema de cálculo para la distribución de aspersores, boquillas y reguladores de presión en máquinas de pivote central (versión 2.0)*. La Habana: Ministerio de Agricultura, 1997.
- González, B.P., ALEMÁN, G.C., PLACERES, M.Z., CISNEROS, Z.E., CÁRDENAS, L.J.F., DOMÍNGUEZ, G.M., PÉREZ, L.R., ROQUE, R.R. y DÍAZ, C.A. *Máquinas de pivote central. Instructivo Técnico Riego y Drenaje*. Serie Operación de Sistemas. Núm. 1. La Habana, 2000, pp. 15.
- KELLER, J. y BLIESNER, R.D. *Sprinkle and trickle irrigation*. AVI Book. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- PÉREZ F., D. *Equipos de bombeo*. La Habana: Pueblo y Educación, 1981.
- PÉREZ M., F. *Introducción a la Ingeniería hidráulica y ambiental*. La Habana: Félix Varela, 2001.
- ROQUE R., R. *Respuesta de la papa (Solanum tuberosum L.) al riego en suelos ferralíticos rojos del occidente de Cuba*. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias agrícolas. La Habana: Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, 1995, pp. 94.
- TARJUELO, J.M. *El riego por aspersión y su tecnología*. Madrid: Mundi-Prensa, 1999, pp. 231-358.

Comparación de los caudales obtenidos para diferentes longitudes de pivote por ambos métodos de cálculo.



Valores de gasto de diseño en litros por segundo para diferentes longitudes de pivote obtenidos por el programa USUPivot y por el nuevo algoritmo propuesto.

Longitud (m)	USUPivot	Nuevo algoritmo	Diferencia %
199.0	22.60	22.37	1.02
228.7	29.80	29.54	0.87
253.4	36.60	36.27	0.90
283.0	45.60	45.24	0.79
307.8	54.00	53.52	0.89
337.4	64.80	64.30	0.77
362.2	74.70	74.10	0.80
379.2	81.90	81.22	0.83
391.8	87.40	86.71	0.79

Abstract

PÉREZ-LEIRA, R. & MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, Y. *Simplification and adaptation of the Allen method to determine the flow for the design of pivots to irrigate potato crops*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XIX, no. 2, April-June, 2004, pp. 89-100.

In Cuba, the center pivot design has been developed based on hydraulic and operational restrictions. As a result, the maximum rainfall and the intake capacity of the soils has not be considered. The present work is developed with the objective of simplifying the system of equations proposed by Allen for the design of pivots based on the infiltration properties of the soils. The new procedure allows to avoid an iterative process in the determination of the irrigation depth applied to the soil and the maximum rainfall. The programming of the method in a new lineal algorithm in Excel has been compared with the USUPivot program, and it is applied to a case study for potato crops. The results show precision and more simplicity for typical cases in which it is possible to determine the inflow in the pivots only according to their length and the daily amount of time to irrigate.

Keywords: simplification, design, pivots, equations, algorithm, flow, irrigation, potato.

Dirección institucional de los autores:

Dr. Ramón Pérez-Leira

Profesor asistente.
Centro de Investigaciones Hidráulicas,
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría",
Calle 127 s/n, Apartado 6028, Habana 6. Marianao, Ciudad de la
Habana, Cuba,
teléfonos: (537) 260 1416 y (537) 260 3636
rpleira@cih.cujae.edu.cu, rpleira@yahoo.com.

M. en C. Yoel Martínez-González

Profesor instructor.
Centro de Investigaciones Hidráulicas,
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría",
Calle 127 s/n, Apartado 6028, Habana 6. Marianao, Ciudad de la
Habana, Cuba,
teléfonos: (537) 260 1416 y (537) 260 3636
ymarq@cih.cujae.edu.cu, argos_pass@hotmail.com.