

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE REDES COLECTIVAS DE RIEGO

P. Planells, J. F. Ortega, M. Valiente, J. Montero y J.M. Tarjuelo¹

RESUMEN: Cada vez más se tiende a dimensionar las instalaciones de riego colectivo para que trabajen a la demanda, por lo que supone de ahorro de agua y de comodidad de manejo. En este trabajo se analiza la repercusión de los distintos criterios de diseño y de manejo de las zonas de riego a la demanda en la determinación de la dotación de las tomas en parcela y en el grado de libertad de uso de la misma por el agricultor, mostrando una aplicación en una zona semiárida de riego por aspersión. En estos casos, un criterio que parece adecuado es fijar una pluviosidad media del sistema igual para toda la zona regable como base para el diseño. Los resultados indican que el uso de válvulas hidráulicas con pilotos reguladores de caudal son, hoy en día, dispositivos imprescindibles en este tipo de instalaciones para cubrir los objetivos de facilidad de diseño y manejo de la red, repercutiendo además en una disminución del coste de la instalación al reducirse los caudales de diseño por línea por ajustar las dotaciones al tamaño exacto de cada parcela, desapareciendo las holguras de caudal que conlleva el uso de un número reducido de limitadores con un valor fijo del caudal.

INTRODUCCIÓN

El uso óptimo y sostenible de los cada vez más limitados recursos hídricos disponibles para el regadío requiere que las instalaciones de riego, tanto al nivel de parcela como de red general de distribución, permitan gestionar el agua de riego con las estrategias de manejo más adecuadas a cada situación. Este aspecto, al que en ocasiones no se le ha dado suficiente importancia resulta hoy absolutamente imprescindible si se quieren rentabilizar las inversiones necesarias en infraestructuras, estando además condicionado por los cultivos que se adopten en la zona regable, así como por la evolución de las políticas y mercados agrícolas.

Actualmente se tiende a dimensionar las redes colectivas de riego para su funcionamiento a la demanda, al menos fuera del periodo punta (julio, agosto). Con un nivel de automatización no muy elevado se puede realizar la apertura y cierre de las válvulas de cada uno de los sectores o subunidades de riego desde un ordenador central, o desde unidades autónomas de campo que controlan las válvulas hidráulicas de un mismo propietario o de una agrupación.

Esta forma de riego permite la libre disponibilidad del agua por el agricultor en condiciones de presión y caudal adecuadas, y contribuye a conseguir un uso más eficiente de la misma. Así, cada agricultor puede programar sus riegos de acuerdo con las necesidades concretas de sus cultivos, según el estado fenológico en que se encuentren, y de la tecnología disponible.

A pesar de las claras ventajas del riego a la demanda, el dimensionamiento de la instalación para que sea capaz de cubrir las necesidades de riego en periodo punta puede encarecer el coste de la instalación. Por eso muchas veces se plantean variantes que conducen a un riego a turnos (o demanda restringida) durante los meses punta de consumo de agua (normalmente julio y agosto), y riego a la demanda en el resto de la campaña. Un hecho que puede justificar ese tipo de decisiones es que los encargados de la vigilancia y mantenimiento de las instalaciones son normalmente capaces de llevar este control del riego con toda facilidad, atendiendo las demandas de los agricultores bajo condicionantes tales como:

- No superar una superficie máxima regada en el conjunto de la red.
- Evitar la concentración de la superficie a regar en un momento dado, estableciendo, por ejemplo, una superficie máxima por grandes sectores estratégicamente distribuidos en el conjunto de la red de riego. De esta forma se conseguiría una distribución más uniforme de los caudales en toda la red.

El cálculo de los caudales de diseño por línea asociados a una determinada garantía de suministro (o calidad de funcionamiento) en una red colectiva de riego a la demanda puede considerarse que tiene dos fases: por una parte el cálculo de la dotación de las tomas y por otra el propio cálculo de los caudales por línea.

Con este trabajo se pretende estructurar una metodología que permita una correcta selección de las dotaciones

¹ Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha. Campus Universitario s/n, -02071-Albacete. Tfno.: 967 599200, ext. 2836 e-mail: planells@pol-ab.uclm.es

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 Num.1 (marzo 1999), páginas 27-36, recibido el 5 de marzo de 1998 y aceptado para su publicación el 12 de enero de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

de las tomas y cuantificación de los caudales de diseño por línea, como base para el dimensionamiento y análisis de las redes colectivas de riego a la demanda.

DETERMINACIÓN DE LA DOTACIÓN DE LAS TOMAS

La determinación de la dotación de las tomas implica una serie de consideraciones e hipótesis, apareciendo ciertas discrepancias en la bibliografía (Bonnal 1983, Clement y Galand 1986, Granados 1990, Arviza 1993, Monserrat *et al.* 1997). Aquí se intenta clarificar la repercusión final de las distintas hipótesis consideradas, y proponer la que entendemos es la mejor solución.

El primer paso en todos los casos es calcular el caudal ficticio continuo (q) de la alternativa de cultivos adoptada para la zona regable. Éste es el caudal que habría que derivar de forma continua y permanente para satisfacer las necesidades brutas de la alternativa de cultivos (ya sean máximas o con un cierto déficit hídrico justificado económicamente) durante el periodo punta. Su cálculo se realizará, pues, como:

$$q = N_r \cdot \frac{10.000}{(24 \cdot 3.600)} = 0.116 \cdot N_r \tag{1}$$

donde: q = caudal ficticio continuo ($1 \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$); N_r = necesidades brutas de riego de la alternativa de cultivo en periodo punta ($1 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$); $10000(\text{m}^2/\text{ha})$; 24 (h/día) y 3600 (s/h).

En realidad, las instalaciones de riego colectivo sólo van a estar funcionando un cierto número de horas al día (normalmente 16 a 18 h), que es lo que se denomina jornada efectiva de riego (JER). Llamamos rendimiento de la red a $r = JER/24$. El caudal ficticio continuo que consideraremos en adelante será pues $q_r = q/r$

Además de esto, debe tenerse en cuenta los días libres de riego (d_l) durante el intervalo entre riegos (I_r). Éstos no suelen ser más de uno de cada siete ya que, además de lo que supone de encarecimiento de la instalación, fuera del periodo punta sobrarían días en los que no es necesario regar al ser menores las necesidades hídricas de los cultivos.

El método de riego a utilizar en la parcela condiciona el caudal que es preciso derivar a ésta para su correcto funcionamiento. Un aspecto importante en este sentido es que todas las parcelas deben dividirse en un número entero de sectores o subunidades de riego (N_s) en función de su tamaño. Otro aspecto a considerar es que la duración del riego de cada subunidad (t_r) debe ser similar para una adecuada planificación y diseño de las instalaciones. Después, durante el manejo de las instalaciones, evidentemente en un riego a la demanda, cada agricultor puede variar su tiempo de riego (dosis aplicada), pero siempre dentro de la JER.

Siguiendo a Monserrat *et al.* (1997), el caudal de suministro o dotación de agua a la parcela (d) puede calcularse fácilmente con sólo establecer la igualdad entre el volumen de suministro y el volumen de necesidades, resultando:

$$d \cdot t_r \cdot N_s = q_r \cdot JER \cdot I_r \cdot S \tag{2}$$

Y por tanto:

$$d = q_r \cdot \frac{JER \cdot I_r}{t_r \cdot N_s} \cdot S = q_r \cdot GL \cdot S \tag{3}$$

$$GL = \frac{d}{q_r \cdot S} \tag{4}$$

$$GL = \frac{JER \cdot I_r}{t_r \cdot N_s} \tag{5}$$

donde: d = dotación ($1/\text{s}$); JER = jornada efectiva de riego (h/día); q_r = caudal ficticio continuo durante la JER ($1 \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$); I_r = intervalo entre riegos (día); t_r = tiempo de riego de un sector o subunidad de riego en una parcela (h); N_s = número de subunidades de riego por parcela; S = superficie de la parcela (ha); y GL = grado de libertad asignado a la parcela.

La ecuación (4) pone de manifiesto que el GL representa la relación entre el caudal real derivado a la parcela y el que debería derivarse de formar permanente y continua durante la JER . Es, pues, un indicador del exceso de caudal aportado a la parcela para reducir su tiempo de riego. Ésta es precisamente la razón por la cual suele darse un GL mayor cuanto menor es el tamaño de la parcela. Así, Granados (1990) y otros autores consideran que el GL debe variar entre 1,5 y 6 según sea el tamaño de la parcela. Como veremos en los ejemplos que vamos a desarrollar más adelante, estos valores pueden ser absolutamente insuficientes en muchos casos y conducir a errores importantes cuando se utilizan procedimientos que fijan de antemano estos GL para calcular la dotación.

En realidad, la dotación (d) no depende de la JER ya que de (3) se tendrá:

$$d = \frac{q}{JER} \cdot \frac{JER \cdot I_r}{t_r \cdot N_s} \cdot S = q \cdot \frac{24 \cdot I_r}{t_r \cdot N_s} \cdot S$$

pero se ha preferido mantener q_r en todo el planteamiento para destacar que el manejo del riego está siempre ligado a la JER . Tanto es así que el GL lo hemos referido a la JER y no a 24 h, como en los planteamientos clásicos, por entender que de esta manera está más adaptado a las condiciones de funcionamiento de la red.

Normalmente, lo que se ha venido haciendo hasta la utilización de válvulas hidráulicas que incorporan pilotos limitadores de caudal con posibilidades de regulación continua, era establecer unos intervalos de superficie a los cuales se asignaba el mismo limitador de caudal, es decir la misma dotación (d). De la fórmula (4) se deduce que si d es constante, en realidad lo que estamos haciendo es asignar diferentes GL a cada superficie de parcela dentro del mismo intervalo. Como veremos en el ejemplo, esto dará lugar a manejar GL muy altos (> 15) en muchos casos. De la ecuación (5) se deduce que si el GL es variable, también debe serlo el tiempo de riego por sector o subunidad de riego en una parcela (t_r), ya que dentro del intervalo de superficies no suele variar N_s , ni por supues-

to, JER ni I_r . Todo esto conduce a que únicamente cuando somos capaces de regular de forma continua la dotación por parcela, podemos mantener constante el GL y el t_r dentro de un mismo intervalo de superficies.

Para zonas de riego por aspersión resulta muy interesante expresar la ecuación (3) en función de la pluviosidad media del sistema P_{ms} ($l\ m^{-2}\ h^{-1}$), de la superficie de la parcela S (ha) y del número de subunidades N_s , dando lugar a la siguientes expresiones de la dotación d (l/s):

$$d = 2.778 \cdot P_{ms} \cdot \frac{S}{N_s} \quad (6)$$

el tiempo de riego de la subunidad:

$$t_r = N_r \cdot \frac{I_r}{P_{ms}} \quad (7)$$

el tiempo de riego de la parcela (t_p):

$$t_p = t_r \cdot N_s \quad (8)$$

y el grado de libertad:

$$GL = \frac{JER \cdot P_{ms}}{N_r \cdot N_s} \quad (9)$$

Si se elige una P_{ms} constante para todas las parcelas, aunque dentro de la zona regable se utilicen distintos marcos de riego según las preferencias del agricultor, la dotación de cada una de ellas es función de su superficie y del número de subunidades de la misma según se bebece de la ecuación (6). En la *Figura 1* se representa gráficamente esta variación para una $P_{ms} = 6\ mm/h$.

Conocido t_r puede calcularse el número máximo de sectores o subunidades de riego que pueden regarse dentro del número de días disponibles para regar de la siguiente manera:

$$N_{s\ max} = [(JER/t_r)_{entero} (I_r - d_t)_{entero}] \quad (10)$$

donde: $N_{s\ max}$ = número máximo de subunidades que pueden regarse dentro del intervalo entre riegos (entero); d_t = días libres de riego dentro del intervalo entre riegos I_r ; y del resto de factores ya se ha indicado su significado. El cociente (JER/t_r) representa el número de posiciones de riego al día, por lo que tiene que ser un número entero. La diferencia $(I_r - d_t)$ puede ser un número entero o una fracción del número de posiciones de riego al día. Así, si se hacen 3 posiciones de riego al día y el intervalo entre riegos es $I_r = 5$ días, la diferencia $(I_r - d_t)$ puede ser $4\ 1/3$, es decir el quinto día sólo se hace una posición de riego (por ejemplo la nocturna) y se dejan libres $d_t = 2/3$ de día.

El número de sectores o subunidades de riego en una parcela debe fijarse teniendo en cuenta:

- Que el tamaño del sector, que coincidiendo con lo que indican Monserrat et al. (1997) depende del método de riego empleado, no supere un cierto límite, y resulte, a ser posible, semejante en toda la zona regable.
- Cuanto mayor sea el nivel de automatización utilizado, menor puede ser el tamaño del sector. En este sentido caben básicamente dos opciones: automatización conjunta de toda la zona regable o automatización in-

dividual de cada propietario o grupo de propietarios, con pequeños programadores de campo (alimentados por pilas, baterías o incluso pequeños generadores solares) que realizan la apertura y cierre de las válvulas hidráulicas que controlan las distintas subunidades de riego.

La selección del número de sectores o subunidades de riego por parcela debe hacerse fundamentalmente en función del tamaño de las parcelas, tratando de minimizar el coste de inversión y funcionamiento (presión) de la subunidad resultante, según el sistema de riego empleado y del tipo de parcelación existente en la zona regable.

Para la selección del número de subunidades por parcela se pueden seguir diferentes criterios. A título de ejemplo se plantean los tres siguientes:

- Fijar unos intervalos de superficie según el tipo de parcelación existente en la zona regable, manteniendo constante la P_{ms} y el t_r . En la *Figura 2* se representan los resultados que se obtendrían para el caso de los intervalos de superficie de la *Tabla 1*, imponiendo la condición de no superar la dotación de $30\ l/s$ y mantener el mismo número de subunidades dentro de cada intervalo para que conserven a su vez el mismo GL . En la segunda columna de la *Tabla 1* se muestra el número de subunidades por parcela resultante en este caso (*opción a.1*). Si se utilizara distinto N_s dentro del mismo intervalo de superficie, estaríamos en realidad subdividiendo ese intervalo en otros según se recoge en la tercera columna de la *Tabla 1* (*opción a.2*), con una dotación media dentro del subintervalo mayor, y con distinto GL (*Figura 2*, línea discontinua).
- Hacer que la dotación se mantenga dentro de un límite superior y otro inferior, obteniéndose los intervalos de superficie y los N_s correspondientes a cada intervalo. Esta opción puede resultar muy interesante para poder utilizar la misma válvula hidráulica con piloto limitador de caudal en toda la zona regable (*Figura 3*).
- Considerar la misma dotación media en todos los intervalos de superficie. En la *Figura 4* se representa el caso de fijar una dotación media de $15\ l/s$ (para utilizar válvula de 3" en la mayor parte de las tomas).

Superficie (ha)	N_s (opción a.1)	N_s (opción a.2)
$S < 1$	1	1
$1 < S < 3$		2
$3 < S < 6$	4	3 ($3 < S < 4.5$) 4 ($4.5 < S < 6$)
$6 < S < 10$	6	6
$S > 10$	8	8

Tabla 1. Intervalo de superficies y número de subunidades resultante en el ejemplo de la opción A representado en la *Figura 2*.

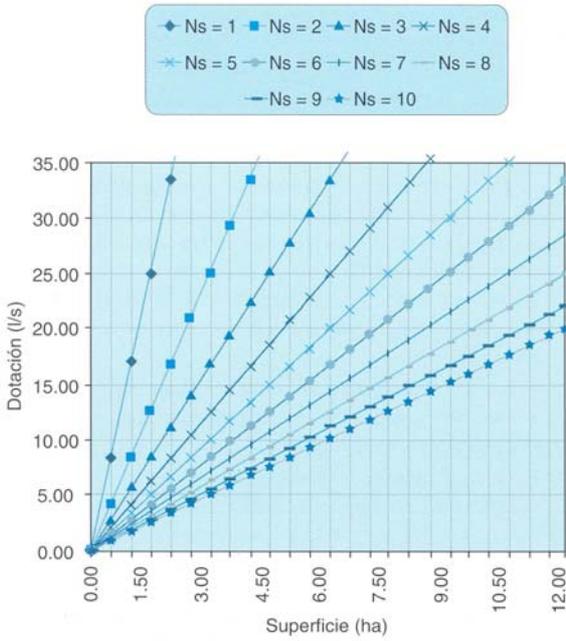


Figura 1. Variación de la dotación de la toma en una parcela según su superficie y el número de subunidades dentro de la parcela cuando se mantiene constante una $P_{ms} = 6 \text{ mm/h}$

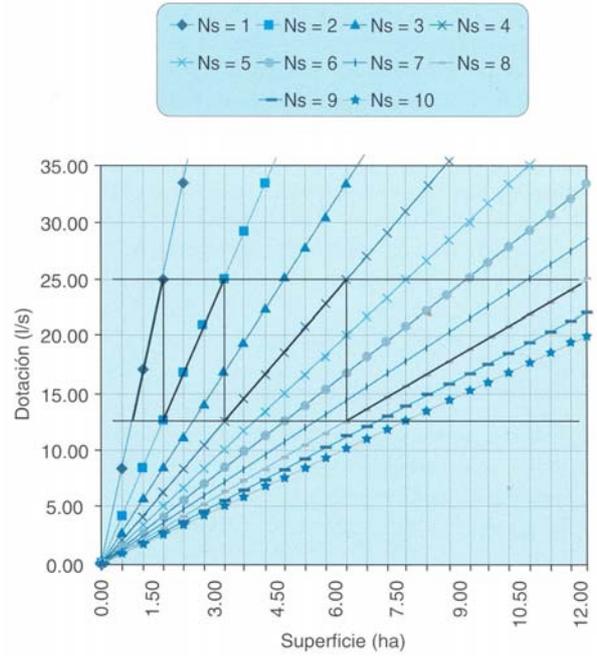


Figura 3. Variación de la dotación de la toma en una parcela para unos límites de dotación prefijados (en 12 y 25 l/s) y número de subunidades resultante con la condición de mantener constante una $P_{ms} = 6 \text{ mm/h}$.

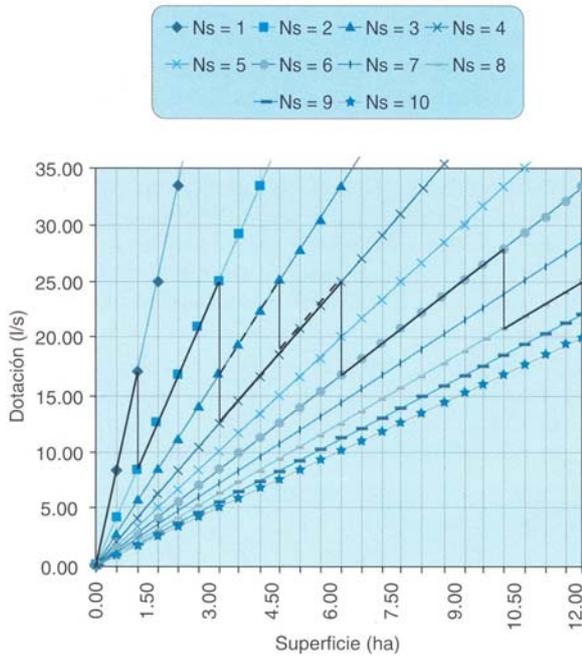


Figura 2. Variación de la dotación de la toma en una parcela para unos intervalos de superficie prefijados y número de subunidades resultante con la condición de mantener constante una $P_{ms} = 6 \text{ mm/h}$ y no superar una dotación de 30 l/s, con dos opciones: a.1) mantener N_s constante dentro del intervalo de superficie y a.2) utilizar dos N_s diferentes en el intervalo de 3 a 6 ha.

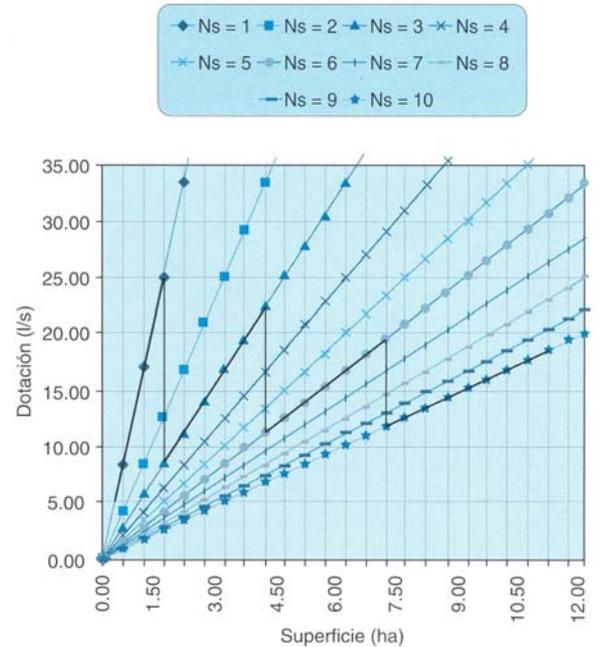


Figura 4. Variación de la dotación de la toma en una parcela al mantener una dotación media por toma prefijada (en 15 l/s en este caso), y número de subunidades e intervalo de superficies resultante con la condición de mantener constante una $P_{ms} = 6 \text{ mm/h}$.

CÁLCULO DE LOS CAUDALES DE LÍNEA

La base teórica para el cálculo de caudales por línea en redes de distribución a la demanda fue establecida por Clement (1966) utilizando un método probabilístico. Éste supone una distribución aleatoria de caudales, de manera que si una red tiene N tomas con una dotación d , que pueden estar abiertas o cerradas en un momento dado, es improbable que todas estén abiertas a la vez, y por tanto, que el caudal en cabecera (Q_0) sea $Q_0 = N d$. Lo que pretende el método es calcular el caudal de diseño que puede circular por cada línea para una determinada garantía de suministro o calidad de funcionamiento, buscando reducir el diámetro necesario respecto al requerido con todas las tomas abiertas.

El caudal que puede circular por una línea es una variable aleatoria, obtenida como suma de las variables aleatorias binomiales asociadas a cada una de las tomas aguas abajo de la línea en cuestión. Si este número de tomas es elevado, se puede considerar que el caudal que circula por la línea sigue una distribución Normal de media:

$$\eta = \sum_{i=1}^n N_i \cdot p_i \cdot d_i$$

y varianza:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i \cdot (1 - p_i) \cdot N_i \cdot d_i^2$$

siendo: N_i = número de tomas iguales dentro de cada uno de los n tipos de tomas existentes aguas abajo de la línea en cuestión (i variable entre 1 y n), p_i la probabilidad de que la toma "i" esté funcionando, y $(1-p_i)$ la probabilidad de que no funcione. La probabilidad p de que una toma esté abierta será el cociente entre el tiempo diario de riego de la toma para satisfacer las necesidades diarias del cultivo (t_d) y la duración de la JER ($p = t_d/JER$). De la ecuación (2) se deduce que $td = (t_r N_s)/I_r$, y teniendo en cuenta la ecuación (5) se tendrá que $p = I/GL$. De esta manera (Figura 5) $Q = m + U_s$, representa el límite superior del intervalo de confianza cuyo coeficiente de confianza viene dado por el parámetro CF (calidad de funcionamiento o garantía de suministro), y donde los valores de U son los percentiles de la función de distribución normal asociados a los coeficientes CF (Tabla 2).

CF	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	99.5
U	1.28	1.34	1.41	1.48	1.56	1.65	1.75	1.88	2.05	2.33	2.58

Tabla 2. Valores de U en función de la calidad de funcionamiento (CF)

La CF la fija el proyectista en función del nivel de garantía que se quiera dar a la red, adoptando normalmente $CF = 95\%$ para $N > 50$, $CF = 99\%$ para N entre 10 y 50, y $CF = 100\%$ (todas las tomas abiertas) para $N < 10$.

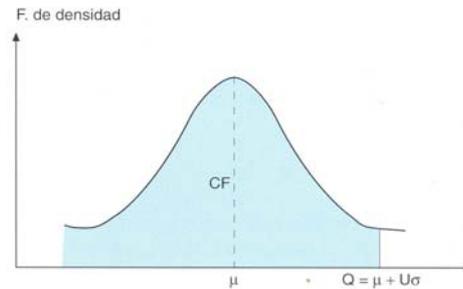


Figura 5. Esquema de la función normal

La primera fórmula de Clement (1966), correspondiente al caso de una línea que abastece a N tomas homogéneas que derivan un caudal d , es:

$$Q = N \cdot dp + U \cdot \sqrt{p \cdot (1 - p) \cdot N \cdot d^2} \tag{11}$$

Esta ecuación se ha venido generalizando para el caso de n grupos homogéneos de tomas (normalmente no más de seis cuando se utiliza la misma toma para un cierto intervalo de superficies de parcela, aunque hoy en día con la utilización de válvulas hidráulicas con posibilidad de regular amplios intervalos de caudal no tiene sentido establecer ningún límite de este tipo), adoptando la expresión de Boissezon y Hait (IRYDA, 1985):

$$Q = Q_r + U \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i \cdot (1 - p_i) \cdot N_i \cdot d_i^2} \tag{12}$$

donde: Q_r el caudal continuo por una línea que tiene aguas abajo N tomas de i tipos diferentes ($N = \sum_{i=1}^n N_i$),

cada una de ellas con dotación d_i ;

por lo que será:

$$Q_r = \sum_{i=1}^n N_i \cdot Q_{r_i} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot p_i \cdot d_i \tag{13}$$

A cualquiera de las superficies de un mismo intervalo en que se han agrupado las distintas parcelas de la zona regable se les suele asignar la misma probabilidad p_i (por tanto el mismo GL) y la dotación d_i correspondiente a la superficie media del intervalo para simplificar los cálculos. Esto último no es necesario cuando se utilizan ordenadores, aunque la diferencia de caudal por línea obtenido con la dotación media y con las dotaciones reales es pequeña, y disminuye al aumentar el número de tomas.

Una simplificación de la ecuación (12) es utilizar la probabilidad media del conjunto de tomas aguas abajo de la línea en cuestión (p), resultando:

$$Q = Q_r + U \cdot \sqrt{p \cdot (1 - p) \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i^2} \tag{14}$$

donde p es ahora la probabilidad media, definida como:

$$p = \frac{Q_r}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i} \tag{15}$$

La diferencia de caudal de diseño resultante respecto a la situación real es muy pequeña, y disminuye al aumentar el número de tomas.

El caudal total Q_b , con todas las tomas abiertas a la vez, se calcula como:

$$Q_t = \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i \quad (16)$$

Se denomina coeficiente de simultaneidad a $CS = Q/Q_b$, aplicándose principalmente a la línea situada en el origen de la red.

En ningún caso, evidentemente, puede ser $Q > Q_b$, situación que podría presentarse si se aplica la fórmula de Clement a un número muy reducido de tomas.

En este proceso hay que tener en cuenta además que el cálculo de una red colectiva no termina en la determinación de los caudales de diseño por línea, sino que debe continuarse con el dimensionamiento de la red y de la estación de bombeo así como su regulación para adaptarse a las condiciones de demanda. Aquí hay que tener en cuenta que la curva de demanda de la red no es algo fijo sino que, para cada caudal demandado, la presión necesaria oscila dentro de un cierto intervalo dependiendo del lugar exacto donde se produce el consumo de ese caudal en la red. Esto hace que para el cálculo del caudal de diseño por línea se pueda considerar en una primera aproximación la solución que se obtiene con la hipótesis de tomar como representativo de cada intervalo de superficie su valor medio, y utilizar el caudal resultante para su dimensionamiento. De todas formas, disponiendo de ordenador es preferible el cálculo exacto.

En general la fórmula de Clement sólo se aplica cuando $N > 10$, y no hay que olvidar que en ella se han realizado una serie de simplificaciones como que:

- El caudal ficticio continuo (q) se deduce para una alternativa media de cultivos de la zona regable.
- Se supone que la probabilidad de que se esté regando es igual a todas las horas del día, o durante todos los días de la semana, y esto no es realmente cierto, sobre todo en riego por aspersión, donde resulta más interesante regar de noche, al disminuir las pérdidas por evaporación, existir normalmente menor viento y disponer de energía eléctrica más barata (como también ocurre los fines de semana con ciertos tipos de tarifas).
- Algunos autores proponen, en cola de la red, utilizar el caudal ficticio continuo para las necesidades del cultivo más exigente (q_{max}), para después ir reduciéndolo gradualmente de cola a cabecera hasta llegar a ésta con el caudal correspondiente a la alternativa (Granados 1990). Una propuesta en este sentido puede ser tomar q_{max} cuando la superficie (S) aguas abajo de la línea cuyo caudal de diseño se está calculando es inferior a 20 ha, $(q_{max}+q)/2$ para $20 < S < 80$ ha, y q para $S > 80$ ha.

Normalmente, en la mayoría de las zonas regables es suficiente con aplicar la fórmula de Clement sin intro-

ducir medidas correctoras (Granados 1990) ya que las distorsiones que se produzcan quedan compensadas por efectos tales como que:

- En el cálculo se ha introducido lo que se podría entender como un coeficiente de seguridad, que es el rendimiento ($r = JER/24$, normalmente no mayor de $18/24 = 0,75$), y en periodo punta podría aumentarse la JER si la red se mostrara insuficiente para atender la demanda.
- En la zona regable siempre suele haber una cierta proporción de tierra no cultivada (en torno al 10-20%).
- Siempre puede articularse alguna medida correctora durante el período punta. Así, si el regante tiene poca presión a ciertas horas por un exceso de demanda, se buscará otro horario de riego, y si el problema es más grave, puede pasarse a riego a turnos o demanda restringida un cierto tiempo.

EJEMPLO DE APLICACIÓN A UNA RED COLECTIVA DE RIEGO POR ASPERSIÓN A LA DEMANDA

Seleccionamos una alternativa de cultivos, entre las posibles para una zona como Albacete, a la que le pondremos la restricción de no superar un consumo medio anual de $6000 \text{ m}^3/\text{ha}$, situación que parece muy probable para el futuro de la zona según la planificación hidrológica acordada para la Cuenca Hidrográfica del Júcar. La alternativa de cultivos podría ser la de las *Tablas 3 y 4*.

De esta alternativa de cultivos obtenemos unas necesidades netas de riego medias anuales de $Nna = 478,2 \text{ mm}$ y unas necesidades brutas de $Nba = 5977,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ donde se ha supuesto una eficiencia $Ea = 0,8$. Esta eficiencia se define como (Tarjuelo, 1995):

$$Ea = EDa Pe Pd = 0,842 \cdot 0,95 = 0,8 \quad (17)$$

donde: Ea = eficiencia general de aplicación para un determinado porcentaje de área bien regada (a) (como decimal); EDa = eficiencia de distribución para el porcentaje "a" de área bien regada (como decimal) (en este caso se ha fijado $a = 0,8$ y un Coeficiente de Uniformidad de Christiansen para el sistema de riego del 85%); Pe = la proporción de agua que llega al suelo (en este caso $Pe = 0,95$); y Pd = proporción del agua bombeada que distribuye el sistema de riego (en este caso $Pd = 1$). El caudal ficticio continuo de la alternativa se ha calculado como:

$$q = 0,23 \cdot 0,06 + 0,94 \cdot 0,25 + 1,09 \cdot 0,4 = 0,68 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$$

Las necesidades netas de riego de la alternativa de cultivos para el mes de máximas necesidades (julio) son de $Nn = 4,73 \text{ mm/día}$.

Fijando un intervalo entre riegos $I_r = 6$ días, perfectamente válido para las condiciones de la zona, resultan una dosis neta de riego $Dn = 6,4,73 = 28,38 \text{ mm}$, y bruta $Db = 28,38/0,8 = 35,5 \text{ mm}$, con lo que las necesidades brutas de riego serán $Nr = 35,5/6 = 5,9 \text{ l m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

	Necesidades netas (mm/mes)			
	Ajo	Cebada	Girasol	Maíz
Enero	0.2			
Febrero	3.6			
Marzo	25.3			
Abril	53.1	24.0		0.9
Mayo	113.2	122.9	9.0	19.6
Junio	151.3	58.2	68	95.7
Julio	50.4		200.5	233.4
Agosto			199.7	206.3
Septiembre			38.9	92.1
Octubre				9.1
Annual	397.1	205.1	516.1	657.1

Tabla 3. Necesidades netas de riego de la alternativa de cultivos correspondiente a un año medio

Para poder realizar 3 posiciones de riego al día, con una JER = 18 h/día, deberían hacerse posturas de riego de $t_r = 6$ h. La pluviosidad media del sistema en este caso sería: $P_{ms} = 35,5/6 \approx 6$ mm/h. A partir de este dato puede fijarse el caudal del aspersor según el marco de riego, pudiendo coexistir diferentes marcos de riego en la misma zona regable, pero garantizando en todas las parcelas la misma pluviosidad. Las boquillas del aspersor deben entonces elegirse para descargar el caudal correspondiente según el marco de riego, teniendo en cuenta que la presión de trabajo debe ser la misma en todos los aspersores (en torno a 350 kPa adecuada para varios marcos) (Tarjuelo et al. 1992).

Según la distribución de la propiedad en la zona regable se fijarán los intervalos de superficie, con el mismo esquema de manejo. Un ejemplo para la zona regable del Salobral en Albacete se muestra en el histograma de fre-

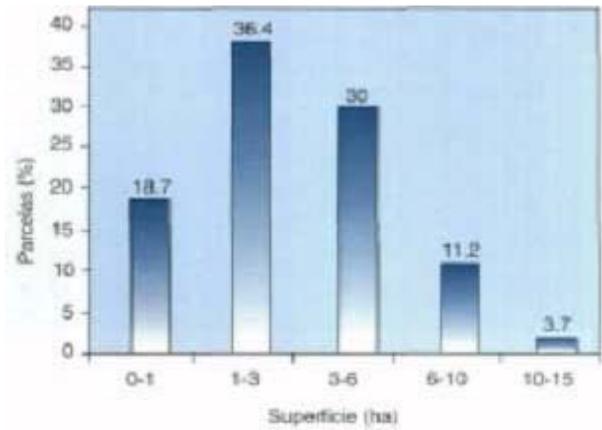


Figura 6. Distribución de superficies de parcela en la lona regable de El Salobral (Albacete)

cuencias de la Figura 6. En una primera opción se ha adoptado la distribución de superficies de la Tabla 5, que corresponde a la solución mostrada en la Figura 2. En ella se ha buscado:

- Una dotación en las tomas creciente con el tamaño de las parcelas,
- Un tamaño de subunidad adecuado al sistema de riego (entre 0,5 y 1,8 ha en este caso)
- Mantener constante el número de subunidades dentro de cada intervalo de superficie.

Las dotaciones (d), así como los valores de GL y p correspondientes a la superficie media dentro de cada intervalo para este caso se recogen en la Tabla 5. La dotación real que se ha de dar a cada toma será la que se deduzca de la ecuación (6) según la superficie realmente abastecida.

De los resultados obtenidos (Tabla 5) hay que hacer notar que si se fijara la misma dotación para todos los tamaños de parcela dentro del mismo intervalo se estarían asignando diferentes GL y t_r a cada parcela. Por ejemplo, a una parcela de 1 ha le correspondería una toma tipo B, con una dotación de 16,661/s. El tamaño de cada una de las dos subunidades sería de 0,5 ha. De la ecuación (4) se tendría:

Cultivo	Nna (mm/año)	Ocupación (%)	Nna ponderadas (mm/año)	Nba ponderadas (m ³ /ha ⁻¹ /año ⁻¹)	Nn (julio) (mm/mes) (mm/día)		q = 0.116 Nr = 0.116 Nn/Ea (l ⁻¹ ha)
Cebada	205.1	15	30.7	383.7	0	0	0
Trigo	319.2	10	31.9	398.7	0	0	0
Ajo	397.1	6	23.8	297.5	50.4	1.62	0.23
Girasol	516.1	25	129	1612.5	200.5	6.47	0.94
Maíz	657.1	40	262.8	3285.5	233.4	7.53	1.09
Barbecho		4					
		100%	Total = 478	Total = 5980	Alter-nativa 4.73		0.68

Tabla 4. Alternativa de cultivos propuesta para zona regable

Tipo de toma	Intervalo de superficies (ha)	Nº de sectores por parcela	d _i calculado por (6) (l/s)	GL _i calculado por (9)	P _i =1/GL	Nº de tomas de cada tipo
A	S<1	1	8.33	18.3	0.05	12
B	1≤S≤3	2	16.66	9.1	0.11	8
C	3≤S<6	4	18.74	4.6	0.22	10
D	6≤S<10	6	22.22	3	0.33	5
E	10≤S<15	8	26.04	2.3	0.44	5

Tabla 5. Resultados del cálculo de la dotación en los diferentes tipos de tomas

$$GL = \frac{d}{q_r \cdot S} = \frac{16.66}{\frac{0.68}{18/24} \cdot 1} = 18.3$$

y de la ecuación (5) se tendría

$$t_r = \frac{JER \cdot I_r}{GL \cdot N_s} = \frac{18.6}{18.3 \cdot 1} \approx 3.0h$$

En la última columna de la *Tabla 5* se indica un supuesto de número de tomas de diferentes tipos aguas abajo de la línea de la red de riego cuyo caudal de diseño se quiere calcular, para una calidad de funcionamiento $CF = 99\%$, (lo que implica un valor de $U = 2,33$). Utilizando las dotaciones correspondientes a la superficie media del intervalo para poder hacer el cálculo manualmente, resultaría:

$$Q_r = \sum_{i=1}^n N_i \cdot Q_{r_i} = \sum_{i=1}^n N_i \cdot p_i \cdot d_i = 154.84 \text{ l/s}$$

$$p = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i} = \frac{154.84}{662} = 0.23$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i = 662 \text{ l/s}$$

$$Q = Q_r + U \cdot \sqrt{p \cdot (1 - p) \sum_{i=1}^n N_i \cdot d_i^2} = 154.84 + 2.33 \cdot \sqrt{0.23 \cdot (1 - 0.23) \cdot 12424} = 264.1 \text{ l/s}$$

Utilizando 40 tamaños de parcela de diferente superficie distribuidos al azar, e introduciendo en la ecuación (12) las dotaciones resultantes de la ecuación (6) para cada una de las superficies, se obtiene que $Q = 265,8 \text{ l/s}$, por lo que la diferencia es muy pequeña respecto a la utilización de los valores medios de superficie para cada intervalo.

Esta línea tendría un coeficiente de simultaneidad $CS = Q/Q_t = 264,1/662 = 0,40$.

Si a la hora de fijar los intervalos de superficie se hubiera utilizado como criterio, a diferencia del caso anterior, mantener una dotación parecida en las tomas independientemente del tamaño de las parcelas, con tamaño de subunidades parecidos, se hubiera obtenido la solución que se muestra en la *Figura 3*, con los resultados para los diferentes parámetros que se recogen en la *Tabla 6*.

Para esta opción resulta un tamaño de subunidad entre 0,5 y 1,5 ha. Para el mismo supuesto de número de tomas aguas debajo de la línea en cuestión los resultados serían ahora:

$$Q_r = 161,45 \text{ l/s} ; p = 0,25 ; Q_t = 640, \text{ l/s} ; Q = 264,8 \text{ l/s} ; CS = 0,41$$

Está claro pues que si se quiere mantener el GL y el t_r constante dentro de cada uno de los intervalos de superficie en que se han agrupado las diferentes parcelas de la zona regable, lo que parece la solución más razonable desde el punto de vista de manejo de la zona regable, es necesario utilizar en cada una de las tomas, válvulas hidráulicas equipadas con pilotos de control que tengan la capacidad de regulación continua del caudal derivado.

Tipo de toma	Intervalo de superficies (ha)	Nº de sectores por parcela	d _i calculado por (6) (l/s)	GL _i calculado por (9)	P =1/GL	Nº de tomas de cada tipo
A	S<1.5	1	12.5	18.3	0.05	12
B	1.5≤S<3	2	16.66	9.1	0.11	8
C	3≤S<6	4	18.74	4.6	0.22	10
D	6≤S<12	8	16.66	2.3	0.44	5
E	12≤S<15	13	17.3	1.4	0.71	5

Tabla 6. Resultados del cálculo de la dotación en los diferentes tipos de tomas para la segunda opción

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A la hora de calcular los caudales de diseño por línea para una determinada calidad de funcionamiento en una red de riego colectivo a la demanda por el método de Clement es preciso tener en cuenta la repercusión de los diferentes parámetros en la solución final, sin olvidar que el sistema de riego colectivo resultante debe ser fácil de manejar por los agricultores.

En el planteamiento general caben al menos dos situaciones:

- Colocar, como se ha venido haciendo cuando no existía posibilidad de regulación continua de caudal en las válvulas, un número reducido de tipos de toma (normalmente no más de 6) en la zona regable. Esto quiere decir que todas las parcelas cuya superficie se encuentra dentro del mismo intervalo tienen el mismo tipo de toma, con la posibilidad de derivar el mismo caudal, pero con un GL , un t_r y una P_{ms} distintos según el tamaño de la parcela.
- Utilizar en las tomas válvulas hidráulicas con pilotos que permitan la regulación continua de caudal para que, aún instalando el mismo tipo de toma en todas las parcelas del mismo intervalo de superficie, se pueda dar a cada parcela una dotación distinta según su tamaño para mantener constante la P_{ms} en toda la zona regable y el mismo GL dentro del intervalo de superficie. Esto permite dar la misma dosis horaria de riego a todas las parcelas, lo que facilita el control del consumo de agua y el manejo del riego sencillamente controlando el tiempo, sobre todo si se tiene que utilizar riego a turnos en periodo punta de necesidades de riego (julio y agosto). Otra gran ventaja de este planteamiento es la disminución de la inversión que conlleva, al desaparecer las holguras de caudal por línea que se originan al utilizar un número reducido de valores de caudal limitado por toma.

Con este segundo planteamiento, los agricultores pueden aplicar cómodamente las recomendaciones de Servicios de Asesoramiento de Riego (SAR), como el existente en estos momentos en la provincia de Albacete, que proporciona, entre otra información, el consumo diario de los principales cultivos de la zona con periodicidad semanal.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	porcentaje de área adecuadamente regada, (como decimal)
CF	calidad de funcionamiento o garantía de suministro, (en porcentaje)
CS	coeficiente de simultaneidad (Q/Q_t), (como decimal)
d	dotación de parcela, (l/s)
dl	días libres de riego durante el intervalo entre riegos I_r , (días)
Db	necesidades brutas de riego, (mm)
Dn	necesidades netas de riego, (mm)

Ea	eficiencia general de aplicación, (como decimal)
EDa	eficiencia de distribución para el porcentaje "a" de área bien regada, (como decimal)
GL	grado de libertad
I_r	intervalo entre riegos, (días)
JER	Jornada Efectiva de Riego, (horas/día)
n	número de grupos homogéneos de tomas
N	número de tomas
N_i	número de tomas iguales dentro de cada uno de los n tipos de tomas existentes aguas abajo de la línea en cuestión (i variable entre 1 y n)
N_{ba}	necesidades estacionales brutas de riego para la alternativa de cultivos, ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$)
N_{na}	necesidades estacionales netas de riego para la alternativa de cultivos, (mm/año)
N_r	necesidades brutas de riego diarias, (mm/día)
N_s	número de sectores o subunidades de riego
$N_{s\text{máx}}$	Número máximo de sectores que pueden regarse dentro del intervalo entre riegos
P	probabilidad de funcionamiento de una toma
$(1-p)$	probabilidad de no funcionamiento de una toma
Pd	proporción de agua bombeada que distribuye el sistema, (como decimal)
Pe	proporción de agua que llega al suelo, (como decimal)
P_{ms}	pluviosidad media del sistema, (mm/h)
q	caudal ficticio continuo para las necesidades de la alternativa en periodo punta, ($l s^{-1} ha^{-1}$)
$q_{máx}$	caudal ficticio continuo para las necesidades del cultivo más exigente, ($l s^{-1} ha^{-1}$)
Q	caudal de línea, (l/s)
Q_o	caudal en cabecera con todas las tomas abiertas, (l/s)
q_r	caudal ficticio continuo en la Jornada Efectiva de Riego (q/r), ($l s^{-1} ha^{-1}$)
Q_r	caudal continuo por línea en función de las tomas existentes aguas abajo, (l/s)
Q_t	caudal total acumulado al estar todas las tomas aguas abajo abiertas, (l/s)
r	rendimiento de la red ($JER/24$), (como decimal)
S	superficie de la parcela, (ha)
td	tiempo diario de riego de una toma para satisfacer las necesidades de riego diarias del cultivo, (h)
t_p	tiempo de riego de una parcela, (h)
t_r	tiempo de riego para cada sector, (h)
U	percentil de la función de distribución normal asociado a una calidad de funcionamiento CF

REFERENCIAS

- Arviza, J. (1993) Curso de redes hidráulicas de riego a presión. Colegio Oficial de Ingenieros Agrónomos de Aragón, La Rioja, Navarra y País Vasco.

- Bonnal, C. (1983). Manual de riego colectivo por aspersión. M.O.P.U. Servicio de Publicaciones.
- Clement, R. (1966) *Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande*. La Houille Blanche, 5.
- Clement, R. y Galand, A. (1986). El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión. Editores Técnicos Asociados.
- Granados, A. (1990). Redes colectivas de riego a presión. E.T.S.I.C.C. y P., U. Politécnica de Madrid.
- IRYDA, (1985). Normas para proyectos de riego por aspersión. Series de Ingeniería Rural y Desarrollo Agrario. Manual Técnico N° 3. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- Montserrat, J., Barragán, J. y Cots, LL. (1997). *Cálculo de caudales en parcela en el diseño de redes de distribución a presión a la demanda*. XV Congreso Nacional de Riegos. Lleida, Junio 1997.
- Tarjuelo, J.M., Valiente, M. y Lozoya, J. (1992). *Working conditions of a sprinkler to optimize the application of water*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol 118, N°. 6,895-913.
- Tarjuelo, J.M. (1995). El riego por aspersión y su tecnología. Mundi-Prensa S.A.