

Aplicación de la simulación al diseño de los sistemas de riego por aspersión: el modelo SIRIAS

Pedro Carrión

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática
Universidad de Castilla-La Mancha
Avenida de España s/n, Campus Universitario
02071 Albacete, España
Tel.: 34-967-59 92 00 Ext. 2486, Fax: 34-967-59 92 24
e-mail: carrion@iele-ab.uclm.es

Jesús Montero y José María Tarjuelo

Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agroforestal
Universidad de Castilla-La Mancha
Avenida de España s/n, Campus Universitario
02071 Albacete, España

Resumen

En el diseño de instalaciones de riego se busca fundamentalmente la mayor uniformidad en el reparto de agua, ya que ésta afecta a la producción del cultivo y a la eficiencia en la utilización del agua y la energía. Se presenta una metodología para la distribución del agua de un aspersor teniendo en cuenta la acción del viento. Para ello se formula un modelo numérico (SIRIAS) que simula la trayectoria de las gotas de agua mediante la aplicación de la teoría balística con una nueva formulación del coeficiente de resistencia aerodinámico. Este modelo, implementado en una aplicación informática, adopta una forma amigable y se ha calibrado con numerosos ensayos de campo. Se trata de un trabajo de claro interés tecnológico que facilita la toma de decisiones para el correcto uso del agua de riego.

APPLYING SIMULATION ON SPRINKLING IRRIGATION SYSTEMS DESIGN: SIRIAS MODEL

Summary

In the design of irrigation installations, the fundamental objective is obtaining the major uniformity in the water distribution, due to the fact that water affects the crop production and the efficiency of the water and energy utilisation. A methodology to show the water distribution of a sprinkler is presented, taking into account the wind. Therefore, a numeric model (SIRIAS) is generated. This model simulates the trajectory of the drops by means of the ballistics theory, with a new formulation of the drag coefficient. SIRIAS is implemented in a software, presents a friendly structure and has been calibrated with numerous field tests. It is a work with a technologic interest and helps in the decision making for the correct usage of the water for irrigation.

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de la agricultura actual se centra en la optimización de los medios, sistemas y cadenas de producción primaria que permiten la orientación progresiva hacia una agricultura cada vez menos intensiva y compatible con la protección del medio ambiente y los recursos naturales.

Con el riego se pretende suministrar a los cultivos, de forma eficiente y sin alterar la fertilidad del suelo, el agua complementaria a la recibida de las precipitaciones que precisan para su adecuado desarrollo. La utilización correcta del agua (un bien cada día más escaso) y de la energía son factores primordiales para por un lado rentabilizar las explotaciones agrícolas y por otro garantizar la sostenibilidad de los regadíos.²⁰

Los pilares fundamentales para una óptima utilización del agua de riego son sin duda la uniformidad de su distribución y la adecuada programación de riegos que, junto a la función de producción de los cultivos con el agua, permitan alcanzar los más altos rendimientos. Para ello, es necesario tener un profundo conocimiento de los factores que influyen en la distribución del agua, según el sistema de riego utilizado. Este conocimiento se adquiere, de forma tradicional, mediante ensayos de campo en los que se modifican los parámetros que intervienen en el riego (presión de trabajo, tipo de emisores, distancias entre emisores, etc.) hasta conseguir la mejor combinación, siendo esta solución muy costosa y precisando de unos medios técnicos con los que no siempre se cuenta.

Como alternativa a esos ensayos, se han desarrollado, principalmente en la última década, modelos de simulación de los diferentes sistemas de riego, que constituyen una potente herramienta en manos de los técnicos que proyectan o explotan este tipo de instalaciones.

En este trabajo se presenta el modelo de simulación de riego por aspersión estacionario, SIRIAS (SIMulación de RIEgo por ASPersión), que permite obtener la distribución de agua de un aspersor, distorsionada por la acción del viento. La trayectoria de las gotas emitidas por el aspersor se calcula mediante la aplicación de la teoría balística, con una nueva formulación del coeficiente de resistencia aerodinámico (C).

A partir del modelo de simulación indicado, se ha desarrollado una aplicación informática en el entorno Delphi (programación orientada a objetos) para los sistemas operativos Windows 95, 98 ó NT, donde, de una forma fácil y amigable, el usuario puede simular diferentes situaciones de riego en distintas condiciones, según sus necesidades.

El modelo de simulación SIRIAS se ha calibrado y validado con más de 200 ensayos de campo realizados en diferentes condiciones de trabajo, pudiendo comprobarse el alto grado de concordancia entre los resultados de la simulación y la realidad.

LA DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO POR ASPERSIÓN

El viento es un factor muy importante que puede alterar el comportamiento de un sistema de riego por aspersión, distorsionando la uniformidad de la distribución del agua, además de jugar un papel muy importante en las pérdidas por evaporación y arrastre. La evaluación de sus efectos se complica notablemente, ya que rara vez es constante en intensidad y dirección. Por ello, los esfuerzos encaminados al desarrollo de modelos que contemplen sus efectos están plenamente justificados y, en su caso, recompensados pues sirven de ayuda para el diseño de nuevas instalaciones, y para el análisis y mejora las condiciones de trabajo de las ya existentes.²²

Para describir el comportamiento del riego a nivel de parcela se utilizan, habitualmente, los términos de *eficiencia* y *uniformidad*. La uniformidad da idea de la homogeneidad con la que se ha repartido el agua por la parcela mientras que la eficiencia se entiende como el porcentaje del agua total aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del

cultivo y las de lavado ya que el resto se pierde por evaporación, escorrentía y percolación profunda.

Existen dos procesos principales de formación de gotas en un aspersor de impacto: el propio *chorro a presión* mediante el rozamiento con el aire circundante y la acción del *brazo o pala* que interrumpe el chorro, provocando el movimiento rotatorio de aquel.

El proceso de rotura en gotas del chorro emitido es muy complejo pudiendo distinguirse, al menos, una zona inicial (normalmente de no más de 1 ó 2 m) donde el chorro es bastante compacto y otra donde ya está casi totalmente desintegrado, existiendo entre ellas una zona de transición. La alta velocidad de salida del chorro (normalmente por encima de 20 m/s) es suficiente para provocar su desintegración en gotas (interviniendo fuerzas de inercia, viscosas y de tensión superficial). El proceso comienza en la superficie lateral y continúa hasta llegar al centro del chorro.^{27,15} Teniendo en cuenta que el diámetro de gota formado en la rotura del chorro es inversamente proporcional a la velocidad del aire circundante,¹¹ el agua de la periferia del chorro produce gotas pequeñas, mientras que la de las proximidades del eje del chorro produce gotas gruesas por la menor velocidad relativa del aire que ya está encauzado.

Los aspersores de impacto transfieren parte de la energía del chorro a la pala. Von Bernuth y Gilley²⁷ comprobaron que entre el 8,5 % y el 11,5 % del agua total arrojada por un aspersor es desviada por la pala, a una distancia máxima de 6 a 7 metros, adquiriendo una velocidad del 70 % de la velocidad media del chorro.⁷

Los datos más completos sobre distribución de tamaño de gotas en aspersores, son los publicados por Kohl,⁷ que analizó el efecto de la presión y el tamaño de boquilla sobre dicha distribución.

Por la complejidad del proceso de rotura del chorro es difícil su modelación, salvo que se realicen aproximaciones o simplificaciones del mismo. Para este trabajo, se ha considerado al chorro ya desintegrado, como un conjunto de gotas esféricas que se mueven aisladas en el aire, resultando necesaria la introducción de correcciones del coeficiente de resistencia aerodinámica C que ajusten mejor la simulación a la realidad.¹⁴ Todos aquellos factores que afectan a la desintegración del chorro en gotas podrán tener algún tipo de influencia en dicho coeficiente corrector. Estos factores serán fundamentalmente: (1) la acción del viento y la presión, por su efecto en la formación del tamaño de gota, conduciendo a gotas más pequeñas cuanto mayor sea la diferencia entre la velocidad del segmento de chorro y el aire que lo circunda y (2) el diseño interno de las boquillas y la presencia o no de vaina prolongadora, al determinar el grado de entrecruzamiento o turbulencia de las líneas de corriente del chorro a la salida, lo que condiciona también el alcance y la forma de la curva radial de distribución pluviométrica.

También se ha considerado que el coeficiente de resistencia es independiente de la altura del aspersor sobre el suelo, de la inclinación del chorro, de la velocidad del viento, del diámetro de boquilla, etc. Asimismo, se ha supuesto que las gotas de diferentes tamaños caen a distintas distancias.

Aunque un sistema de riego por aspersión puede llegar a modificar la temperatura y humedad del aire en su entorno, se ha supuesto que no modifica significativamente las condiciones de viento.¹⁴

Como la probabilidad de colisión entre gotas emitidas por aspersores colindantes puede considerarse despreciable, sus trayectorias, en una primera aproximación, no se ven afectadas por la disposición de los aspersores en el campo. Como consecuencia de ello, la superposición de la distribución de agua obtenida por un aspersor aislado es una buena aproximación para simular la del conjunto de ellos a escala de campo.

Es importante realizar un buen ajuste de la distribución del agua teniendo en cuenta las pérdidas de evaporación y arrastre. Estas pérdidas han sido estudiadas en numerosos trabajos de campo, laboratorio y estudios analíticos, pero al no estar definidos en iguales términos y trabajar con distinta precisión, los valores obtenidos son muy disparares. En este trabajo se propone un método de evaluación que ha ofrecido excelentes resultados.

MODELO DE SIMULACIÓN DE RIEGO POR ASPERSIÓN

El dato de partida fundamental para la aplicación del modelo de simulación propuesto es la denominada curva de distribución radial del aspersor que, o bien puede obtenerse experimentalmente o ser proporcionada por el fabricante del aspersor. Dicha curva representa la distribución de agua en función de la distancia al aspersor, que éste produce un en determinadas condiciones de ensayo (boquilla-presión) y en ausencia de viento (Figura 1).

Cada aspersor, y para éste, cada combinación presión-boquilla, presenta un modelo radial de reparto de agua característico.^{24,18} Existen tres tipos de modelos radiales de reparto de agua:

- Modelo “rectangular” o “elíptico”, que se obtiene con aspersores trabajando con una sola boquilla y a presiones medias-altas,
- Modelo “rosquilla”, trabajando con aspersores a baja presión y con una sola boquilla; este modelo de reparto de agua consigue los Coeficientes de Uniformidad más bajos,
- Modelo “triangular”, trabajando con dos boquillas y alcanzándose los mayores CU en condiciones sin viento.

Figura 1. Ejemplo de curva radial de reparto de agua (pluviometría/distancia)

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y METODOLOGÍA DEL MODELO SIRIAS

Este modelo de simulación se basa, como ya se ha indicado, en la utilización de la teoría balística para determinar la trayectoria de las gotas y, como consecuencia de ello, la distribución de agua que se produce. Con ello obtenemos un modelo de distribución de agua de un aspersor aislado distorsionado por la acción del viento sobre una red cuadrada y continua de pluviómetros. A partir de este resultado conseguimos, mediante técnicas de solapamiento, determinar el reparto de agua que se produce cuando disponemos de una red de aspersores con un determinado espaciamiento como ocurre en la realidad.

La metodología y secuencia de pasos utilizada para en el modelo SIRIAS es la siguiente:

1. Partimos de la curva radial de reparto de agua de la combinación aspersor-boquillas-presión que se quiere simular,^{24,21} dicha curva, como ya se ha indicado, relaciona la pluviometría de descarga P_i a una determinada distancia r_i desde el aspersor, en condiciones sin viento (Figura 1)

$$P_i = f(r_i) \quad (1)$$

2. A partir de los datos de la curva anterior, se considera un conjunto discreto de tamaños de gotas que van, desde uno inicial D_i (normalmente 0,2 mm) hasta otro final D_f (que en principio se desconoce) con un incremento entre gotas ΔD ajustable según la precisión deseada. Aplicando cálculo balístico a cada tamaño de gota de diámetro D en ausencia de viento, se obtiene la distancia r que alcanzaría desde el aspersor. Con esta distancia, se asigna a cada tamaño de gota, la pluviometría que le corresponde según la curva radial $P_i - r_i$. El volumen de agua asociado a cada gota se calcula como el producto de la pluviometría existente a esa distancia P_i por el área de la corona circular asignada a esa pluviometría (Figura 2)

Figura 2. Esquema de la asignación de pluviometría a cada diámetro de gota

Este proceso se repite incrementando cada tamaño de gota en ΔD , hasta que obtengamos el último valor de tamaño de gota (diámetro máximo) para el cual la distancia r no supere el radio de alcance del aspersor. Lógicamente, por coherencia del modelo, tamaños mayores de gotas no se podrían producir, ya que alcanzarían distancias no contempladas en la curva de pluviometría. Finalizado este proceso cada tamaño de gota, en el intervalo indicado, tiene asignada una pluviometría de manera que, la suma de todas será la pluviometría total representada por la curva radial.

3. Para cada uno de los tamaños de gota con su correspondiente pluviometría asociada, se vuelve aplicar el cálculo balístico considerando ahora, por un lado, el efecto del viento sobre la trayectoria de la gota y por otro diferentes direcciones de lanzamiento o salida de dicha gota del aspersor con relación a la dirección del viento. El número direcciones de lanzamiento de cada tamaño de gota, es ajustable hasta un máximo de 360 (un lanzamiento cada grado) y, evidentemente, la pluviometría asignada a un determinado tamaño de gota se reparte, en tantas partes iguales, como direcciones de lanzamiento se han establecido (si se fijan n direcciones, para el modelo se supone que existen n gotas de cada tamaño y, por tanto, se reparten la pluviometría). Con este procedimiento se obtiene una malla o conjunto de puntos donde caen las diferentes gotas, distribuidos en el plano (suelo), cada uno con su pluviometría asociada.

El plano de cobertura del aspersor aislado se considera como una red continua de pluviómetros cuadrados de tamaño ajustable (normalmente de 2×2 m) de manera que, cuando una gota cae sobre cualquiera de dichos cuadros, incrementa su pluviometría acumulada. Cuando una gota cae entre dos pluviómetros se distribuye la mitad del volumen asociado a ese tamaño de gota entre los dos pluviómetros, y cuando cae justo en un vértice común a cuatro pluviómetros se reparte en partes iguales en cada uno de ellos.

Al finalizar el proceso, la pluviometría total (correspondiente a la curva de distribución radial) se ha repartido entre los diferentes pluviómetros de la red continua, según la trayec-

toria descrita por las gotas en función de la dirección de lanzamiento y de la dirección y velocidad del viento.

4. Con los resultados obtenidos, que tienen la misma estructura de datos que los que se obtendrían mediante los correspondientes ensayos de campo en los que se sitúan en el suelo una malla cuadrada de pluviómetros espaciados una cierta distancia (normalmente 2 m), se aplican las mismas técnicas de análisis que las utilizadas en los ensayos reales.
5. La validez del modelo se demuestra comparando los resultados obtenidos con el modelo de simulación y los realmente medidos en condiciones de campo.

APLICACIÓN DE LA TEORÍA BALÍSTICA SOBRE UNA GOTA DE AGUA EN EL AIRE

Se supone que cada gota comienza su trayectoria como un elemento discreto dentro un chorro continuo y que rápidamente se separa¹⁵ e independiza de aquel. De esta forma, es posible aplicar la teoría balística para estudiar el movimiento de cada una de las gotas, que se consideran esféricas de diámetro D , que componen el flujo de agua del aspersor.

Aplicando la teoría balística a una gota aislada, se calcula la distancia r_i a la que cae cada tamaño de gota D_i (Figura 3)

$$D_i = f(r_i) \quad (2)$$

Este procedimiento se realiza dos veces, primero en condiciones sin viento para asignar una pluviometría a cada tamaño de gota (punto 2 de la metodología), y después contemplando la acción del viento para determinar donde caería cada una de ellas.

Figura 3. Ejemplo de curva que relaciona el diámetro de gota con la distancia

La velocidad de salida del agua por la boquilla U_0 se calcula con la expresión de la ecuación de descarga

$$U_0 = c\sqrt{2gH} \quad (3)$$

donde c es coeficiente de descarga, que toma valores ligeramente menores a 1, g aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$) y H presión en la boquilla (en m.c.a.).

Dos fuerzas actúan sobre una gota en el vuelo: la de la gravedad y la fuerza de resistencia que se opone al movimiento relativo de la gota en el aire.^{28,15} En la Figura 4 se muestra un esquema bidimensional de una gota de agua moviéndose en el aire y las diferentes fuerzas que actúan sobre ella.

Figura 4. Teoría balística sobre una gota de agua en el aire. Fuerzas que actúan sobre ella

En ausencia de viento, la trayectoria de una gota se produce en un plano vertical, pero en general cuando actúa la fuerza del viento, las trayectorias tienen tres dimensiones.

Sin viento, la velocidad de una gota respecto al suelo U es igual a la velocidad de la gota respecto al aire V , pero actuando el viento (Figura 4a) se cumple que¹⁵

$$\vec{U} = \vec{V} + \vec{W} \quad (4)$$

donde W es la velocidad del viento (relativa al suelo), actuando siempre en un plano horizontal. Por tanto, la velocidad V y la fuerza de resistencia F_r no son tangentes al segmento del chorro del agua.

Así, el vector velocidad V será igual a la suma de sus componentes, de la siguiente manera

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (5)$$

donde

$$\begin{aligned} V_x &= U_x - W_x \\ V_y &= U_y - W_y \\ V_z &= U_z \end{aligned} \quad (6)$$

Seginer¹³ propuso que la fuerza de resistencia que actúa sobre una gota en movimiento en el aire es

$$F_r = mC_n V^n \quad (7)$$

donde F_r es fuerza de resistencia de la gota en el aire, m masa de la gota de agua, C_n coeficiente de resistencia, V velocidad de la gota de agua en el aire y n exponente numérico, basándose en datos de Laws (1941). Seginer¹³ afirmó que un valor razonable podía ser $n = 2$.

De esta forma la ecuación anterior se transforma en la siguiente:

$$F_r = mC_2 V^2 = \rho_w \frac{4}{3} \pi r^3 C_2 V^2 = \rho_w \frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} C_2 V^2 \quad (8)$$

siendo ρ_w densidad del agua y D diámetro nominal de la gota de agua.

Fukui *et al.*⁴ propusieron que para calcular la fuerza de resistencia del aire sobre el movimiento de la gota se podría utilizar la siguiente expresión

$$F_r = \frac{1}{8} \rho_a C \pi D^2 V^2 \quad (9)$$

siendo ρ_a densidad del aire.

El coeficiente de resistencia aerodinámica C , definido para una gota aislada en función del número de Reynold^{4,15} se puede expresar como

$$\text{si } R_e \leq 128 \rightarrow C = \frac{33,3}{R_e} - 0,0033R_e + 1,2 \quad (10)$$

$$\text{si } 128 \leq R_e \leq 1440 \rightarrow C = \frac{72,2}{R_e} - 0,0000556R_e + 0,48 \quad (11)$$

$$\text{si } 1440 \leq R_e \rightarrow C = 0,45 \quad (12)$$

siendo $R_e = \frac{VD}{\nu}$ el número de Reynolds y ν la viscosidad cinemática del aire.

La relación que existe entre C y C_2 es, por tanto, la siguiente

$$C_2 = \frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} \quad (13)$$

El modelo de reparto de agua de un solo aspersor que se obtiene utilizando los coeficientes de resistencia indicados, es prácticamente circular, no reproduciendo fielmente la deformación provocada por el viento. Ésta consiste básicamente en un estrechamiento en la dirección perpendicular al viento, así como un acortamiento a barlovento y un alargamiento a sotavento.¹⁶ Para conseguir esta deformación, Tarjuelo *et al.*¹⁹ propusieron una corrección del coeficiente de resistencia aerodinámico C , en función de unos coeficientes correctores K_1 y K_2 , de la siguiente forma

$$C' = C(1 + K_1 \sin \beta - K_2 \cos \alpha) \quad (14)$$

siendo α el ángulo que forman los vectores V y W (Figura 4), β el ángulo que forman los vectores V y U . K_1 y K_2 son dos constantes que resultan fundamentales para conseguir un buen ajuste entre los resultados obtenidos por simulación y los medidos en campo. Con $(K_1 \sin \beta)$ se produce un estrechamiento del modelo, sobre todo en la dirección perpendicular al viento, y en menor medida en la propia dirección del viento. Con $(K_2 \cos \alpha)$ se produce un acortamiento adicional a barlovento y un alargamiento a sotavento de mayor cuantía, sin efecto sobre la dirección perpendicular al viento.

En la expresión (14), en ausencia de viento en la que $\alpha = 1$ y $\beta = 0$ en todos los puntos a lo largo de su trayectoria, se verifica que $C = C'$, y por ello, el modelo de distribución de agua tiene una forma casi circular.

ECUACIONES DEL MOVIMIENTO DE UNA GOTA EN EL AIRE

Las ecuaciones que definen el movimiento de una gota se obtienen a partir de las condiciones de su equilibrio dinámico, tal y como se refleja en la Figura 4 son las siguientes

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} \quad (15)$$

Las componentes de la aceleración, teniendo en cuenta las expresiones anteriores indicadas, las podemos expresar como

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \left(\frac{dx}{dt} - W_x \right) = -C_2 V (U_x - W_x) \\ A_y &= \frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \left(\frac{dy}{dt} - W_y \right) = -C_2 V (U_y - W_y) \\ A_z &= \frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{3}{4} \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{C}{D} V \frac{dz}{dt} - g = -C_2 V U_z - g \end{aligned} \quad (16)$$

donde x , y y z son las coordenadas cartesianas referidas al suelo, con origen en el aspersor $\frac{dx}{dt}$, $\frac{dy}{dt}$ y $\frac{dz}{dt}$ son las componentes de la velocidad de la gota U , t el tiempo de vuelo y A la aceleración de la gota en el aire.

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO A DISTINTAS ALTURAS

La variación de la velocidad del viento sobre un plano infinito según la vertical se considera que se ajusta a una función logarítmica de la altura sobre la superficie de contacto (suelo desnudo o con vegetación), según Vories *et al.*²⁸

$$W_z = W_a \frac{\ln \left(\frac{(z-d)}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{(z_a-d)}{z_0} \right)} \quad (17)$$

siendo W_z velocidad del viento a una altura z (en valor absoluto) (m/s), W_a velocidad del viento medida a una altura de referencia z_a (normalmente $z_a = 2$ m) (m/s) y d altura de la aspereza (por el cultivo) (cm), según la expresión¹⁶

$$\log d = 0,9793 \log h - 0,1536 \quad (18)$$

h altura del cultivo (cm), variable según su crecimiento y z_0 parámetro de la rugosidad (cm), según la expresión¹⁷

$$\log z_0 = 0,997 \log h - 0,883 \quad (19)$$

RESOLUCIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES MEDIANTE EL MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4° ORDEN

Para resolver las ecuaciones diferenciales que definen las trayectorias de las gotas se utiliza el procedimiento de Runge-Kutta de 4° orden. Los métodos de Runge-Kutta tienen la exactitud del esquema de la serie de Taylor sin necesitar el cálculo de derivadas superiores. La solución de sistemas de n ecuaciones diferenciales como el que aquí nos ocupa, requiere que las n condiciones iniciales se conozcan para un valor inicial, en nuestro caso, la variable t . Este procedimiento de resolución precisa la aplicación de un paso a cada una de las ecuaciones antes de continuar el siguiente paso. Cuanto más pequeño sea el paso, mayor será la precisión en la solución, pero a costa de aumentar el tiempo de resolución.

Así, con el procedimiento indicado, se calcula el tiempo de vuelo, las coordenadas instantáneas (en cada paso) x , y y z que determinan la posición de la gota, las componentes

de la velocidad y , sobre todo, el punto de impacto de la gota o bien con el cultivo o con el terreno, según los casos.

Las componentes de la velocidad, en el paso i , se expresan como

$$\begin{aligned} U_{x(i)} &= U_{x(i-1)} + A_{x(i-1)}\Delta t \\ U_{y(i)} &= U_{y(i-1)} + A_{y(i-1)}\Delta t \\ U_{z(i)} &= U_{z(i-1)} + A_{z(i-1)}\Delta t \end{aligned} \quad (20)$$

donde Δt representa el Incremento de tiempo para cada intervalo, en segundos. Un incremento de tiempo razonable puede ser $0,01 \sim 0,02$ segundos.

Del mismo modo se calcula la posición de la gota de agua en el paso i , mediante las expresiones

$$\begin{aligned} X_{(i)} &= X_{(i-1)} + U_{x(i-1)}\Delta t \\ Y_{(i)} &= Y_{(i-1)} + U_{y(i-1)}\Delta t \\ Z_{(i)} &= Z_{(i-1)} + U_{z(i-1)}\Delta t \end{aligned} \quad (21)$$

Este proceso se repite para cada paso (determinado por el intervalo de tiempo) hasta que la gota finaliza su recorrido cuando golpea el suelo o el plano cero definido por la rugosidad.

CORRECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEBIDO A LAS PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN Y ARRASTRE

Es muy difícil llegar a conocer las pérdidas por evaporación y arrastre provocadas por el viento durante el proceso de riego.¹⁴ No obstante, para su consideración, se ha establecido un proceso de corrección que, implementado en el modelo de simulación, ha ofrecido buenos resultados. La estimación de estas pérdidas se ha realizado en los siguientes pasos:

1. Mediante la cuantificación de las pérdidas por evaporación y arrastre en diferentes ensayos reales de campo, con distintas condiciones climáticas, se ha obtenido la expresión que las representa^{12,23} de la forma

$$Per = 7,63(e_s - e_a)^{0,5} + 1,62W \quad (22)$$

siendo Per pérdidas por evaporación y arrastre (en porcentaje) que representan la diferencia entre el agua descargada por los aspersores y la recogida por los pluviómetros, $(e_s - e_a)$ déficit de presión de vapor del aire (kPa) y W velocidad del viento (m/s).

2. Corregir la curva radial de distribución pluviométrica (Figura 1), restándole las pérdidas por evaporación y arrastre estimadas. Edling,³ Kohl *et al.*⁸ y Kincaid y Longley⁶ deducen de sus ensayos que la evaporación de las gotas en riego por aspersión es prácticamente despreciable a partir de un diámetro de gota de 1,5 a 2 mm.

Para tener en cuenta esta estimación de las pérdidas en la simulación, se han contemplado tres opciones el modelo SIRIAS para su reparto:

- A. Repartir, tanto las pérdidas por evaporación como la de arrastre por el viento, de forma proporcional a la pluviometría recogida en cada punto de la curva radial.
- B. Repartir las pérdidas por arrastre como en la opción A y las pérdidas por evaporación en proporción inversa al tamaño de gota.
- C. Repartir las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento en proporción inversa al tamaño de gota como en la opción B.

La relación entre las pérdidas por evaporación y el diámetro de gota, se ha obtenido utilizando los datos de las referencias,^{3,6} así se ha llegado a la siguiente ecuación que liga el diámetro de gota con el porcentaje de evaporación del caudal descargado

$$E_i = 1,8271D_i^{-1,5379} \quad (23)$$

siendo E_i el porcentaje de pérdidas asignadas al diámetro de gota D_i (en mm), válido para gotas a partir de 0,2 mm, pues en la simulación no se consideran diámetros de gota inferiores. En la Figura 5 se representa gráficamente esta ecuación.

Figura 5. Representación pérdidas por evaporación - diámetro de gota

Una vez cuantificadas las pérdidas por evaporación y arrastre, el reparto en función del diámetro de gota se realiza según el siguiente proceso:

- En primer lugar hay que tener en cuenta que a cada diámetro de gota D_i , que al volar en ausencia de viento tiene un alcance inferior al radio mojado por el aspersor, se le ha asignado en la simulación un volumen de agua igual al producto de la pluviometría existente a esa distancia en el modelo radial (P_i , en $l\ m^{-2}\ h^{-1}$) y el área de la corona circular (A_i en m^2) que tiene como límites la mitad de la distancia entre el lugar de impacto de la gota D_i , la D_{i-1} y la D_{i+1} (Figura 2).
- En segundo lugar ha de cumplir la ecuación que iguala el total de pérdidas existentes con las repartidas

$$\frac{(E + D_r)}{100} Q'_s = K \sum_{i=0,2}^2 E_i Q_i = K \sum_{i=0,2}^2 [1,8271D_i^{-1,5379}] Q_i \quad (24)$$

siendo Q'_s el caudal descargado (l/h), $Q_i = \pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)P_i$ el caudal descargado con el diámetro de gota D_i (en l/h), E porcentaje del caudal descargado que se pierde por evaporación (%), D_r porcentaje del caudal descargado que se pierde por arrastre (%) y K constante por la que hay que multiplicar la ley de distribución de pérdidas según el diámetro de gotas para que se cumpla la restricción. Esta constante se calcula despejándola de la ecuación (23) al ser ésta la única incógnita.

Una vez conocido K , se calculan los nuevos caudales corregidos Q_{ci} por pérdidas por evaporación y arrastre que se asignan a cada tamaño de gota mediante la ecuación

$$Q_{ci} = Q_i - Q_i[K(1,8271)D_i^{-1,5379}] = Q_i[1 - K(1,8271)D_i^{-1,5379}] \quad (25)$$

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO SIRIAS

El modelo de simulación y todos sus procesos, se han implementado en un programa informático que recibe el nombre de SIRIAS (igual que el modelo).

La aplicación SIRIAS (SIMulación de Riego por ASPersión) se ha programado en lenguaje Delphi 4.0 para Windows'98. Está registrado por los autores Pedro Carrión, José María Tarjuelo y Jesús Montero. La última versión disponible para los usuarios es la v.3 (2001).

Queda fuera de los objetivos de este artículo profundizar en las características y opciones del programa SIRIAS, por ello únicamente se resumen éstas en los diagramas de las Figuras 6 y 7.

Figura 6. Diagrama de flujo de la simulación del modelo de distribución de agua de un aspersor

Figura 7. Diagrama de flujo de la simulación de gotas aisladas

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN SIRIAS

Para la validación y calibración del modelo propuesto, se han realizado mas de 200 ensayos de campo para, de esta forma, poder comparar los resultados obtenidos mediante simulación con los medidos experimentalmente.

La comparación se ha realizado a partir de la distribución de agua de un aspersor aislado bajo la acción del viento, incidiendo en dos aspectos fundamentales:

- Determinación de los mejores parámetros operativos internos del programa SIRIAS (tamaño de gota inicial, número de direcciones de lanzamiento, etc.) que minimizan el tiempo de ejecución de la simulación sin perder precisión.
- Determinación de las constantes K_1 y K_2 correctoras del coeficiente de resistencia aerodinámica C a utilizar en cada caso, calculando el error que se produce.

Se han realizado diferentes tipos de ensayos de campo con aspersores de tamaño medio, que podemos agrupar en:

1. Ensayos para caracterizar el modelo radial de reparto de agua de un aspersor en ausencia de viento y con alta humedad relativa. Cada combinación aspersor-boquilla-presión-altura presenta una curva pluviométrica característica.
2. Ensayos de un solo aspersor al aire libre para diferentes direcciones y velocidades de viento. Con ellos se obtiene la distribución de agua descargada por un aspersor distorsionada por el viento, pudiendo de esta forma calcular la uniformidad en la distribución de agua para cualquier marco de riego.
3. Ensayos de riego en bloque en el marco 18×18 m, mediante los cuales se obtiene la uniformidad y la eficiencia en la aplicación de agua en dicho marco.

Para la realización de todos ellos, se han seguido las normas ASAE.S.330.1,¹ ASAE.S.398.1,² ISO 7749-2,⁵ UNE 68-072-86,²⁵ así como la metodología propuesta por Merriam y Keller⁹ y Merriam *et al.*¹⁰

En Montero¹² y Tarjuelo *et al.*²¹ aparece una descripción exhaustiva del proceso experimental seguido para la realización de estos ensayos.

Las condiciones climáticas producidas durante los ensayos al aire libre han sido recogidas mediante una estación meteorológica automatizada con registro permanente de la velocidad y dirección del viento, la humedad relativa y la temperatura del aire.

La calibración se ha basado principalmente en la utilización tres parámetros de similitud: un parámetro *unidimensional* ε , un parámetro *bidimensional* ϕ , y un parámetro *tridimensional* σ .

Se han realizado más de 50 000 simulaciones de la distribución de agua de varias combinaciones de aspersor-boquillas-presión, en distintas condiciones de viento y con diferentes valores de las constantes K_1 y K_2 . Se han comparado los resultados simulados con los obtenidos mediante ensayos, llegándose a las siguientes conclusiones principales:

- Los parámetros internos de funcionamiento del modelo de simulación SIRIAS considerados como óptimos, buscando un equilibrio entre el tiempo de simulación y la precisión conseguida, han sido:
 - número de direcciones de lanzamiento: 120
 - incremento en los diámetros de gotas: 0,05 mm
 - número de iteraciones por segundo: 50
 - disposición de los pluviómetros: 2×2 m
- Es muy importante la elección de los coeficientes correctores K_1 y K_2 del coeficiente de resistencia aerodinámico, para que se reproduzca mejor el modelo de distribución de agua simulado en condiciones de viento. La influencia de K_1 es mucho mayor que la de K_2 .
- Los coeficientes correctores que producen el mejor ajuste de la simulación, a la presión de trabajo de 350 kPa, han sido: $K_1 = 2,85$ y $K_2 = 0,05$ para los ensayos de un solo aspersor y $K_1 = 1,85$ y $K_2 = 0,15$ para los ensayos de riego en bloque. Con estos coeficientes, el error medio en los ensayos de un aspersor ha sido de 0,50 mm/h respecto a la pluviometría media, con un coeficiente de variación es del 32 %. Para los ensayos de riego en bloque, el error medio ha sido de 0,80 mm/h, con un coeficiente de variación del 24 %. Se consigue mayor precisión, por tanto, con los ensayos de riego en bloque que con los ensayos de un aspersor al aire libre.
- A la presión de 300 kPa, y con ensayos de un solo aspersor, puede considerarse como idóneo utilizar los siguientes coeficientes correctores: $K_1 = 2,50$ y $K_2 = 0,15$. Con estos coeficientes, el error medio en estos ensayos es de 0,43 mm/h respecto a la pluviometría media, mientras que el coeficiente de variación es del 25 %.
- Con ensayos de un aspersor a la presión de 200 kPa, los mejores coeficientes correctores han sido: $K_1 = 3,0$ y $K_2 = 0,25$, pero con peor grado de ajuste.
- De las tres opciones que contempla SIRIAS para considerar las pérdidas por evaporación y arrastre, se ha obtenido la misma precisión en los ensayos de riego en bloque al utilizar las opciones A o B y menor al utilizar la C.
- En riego en bloque los errores cometidos en los coeficientes de uniformidad no superan, generalmente, el 5 % en la media de cada combinación; sin embargo con ensayos de un aspersor el error cometido es algo mayor. Estos valores dan muestra de la buena precisión que se consigue con el modelo de simulación SIRIAS en los ensayos de riego en bloque.

CONCLUSIONES

El modelo SIRIAS ha sido desarrollado para simular la distribución de agua de un aspersor de riego bajo la acción del viento. La uniformidad en la distribución de agua puede ser simulada con gran precisión, proporcionando una herramienta esencial para el diseño de nuevas instalaciones de riego o para la mejora de las ya existentes, optimizando el uso del agua. También permite a los fabricantes de aspersores mejorar el diseño de sus productos buscando un buen comportamiento en campo ante la gran competitividad que existe en el mercado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación ha sido posible gracias al Proyecto Europeo FAIR CT 950088 (NIWASAVE) y los proyectos nacionales de la CICYT (HID96-1373) y PTR94-0107.

REFERENCIAS

- 1 ASAE Standard S330.1, "Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes", en *ASAE Standards*. ASAE, St. Joseph, MI, (1985).
- 2 ASAE Standard S398.1, "Procedure for sprinkler testing and performance reporting", en *ASAE Standards*. ASAE, St. Joseph, MI, (1985).
- 3 R. Edling, "Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles", *Trans. ASAE*, Vol. **28**, N°5, pp. 1543-1550, (1985).
- 4 Y. Fukui, K. Nakanishi y S. Okamura, "Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity", *Irrig. Science*, Vol. **2**, pp. 23-32, (1980).
- 5 ISO 7749/2, "Norme internationale. Matériel d'irrigation. Asperseurs rotatifs. Partie 2: Uniformité de la distribution et méthodes d'essai", (1990).
- 6 D.C. Kincaid y T.S. Longley, "A water droplet evaporation and temperature model", *Trans. ASAE*, Vol. **32**, N° 2, pp. 457-463, (1989).
- 7 R.A. Kohl, "Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers", *Trans. ASAE*, Vol. **17**, N° 4, pp. 690-693, (1974).
- 8 K.D. Kohl, R.A. Kohl y D.W. DeBoer, "Measurement of low pressure sprinkler evaporation loss", *Trans. ASAE*, Vol. **30**, N° 4, pp. 1071-1074, (1987).
- 9 J.L. Merriam y J. Keller, "Farm irrigation system evaluation: a guide for management", Utah State University, Logan, Utah, (1978).
- 10 J.L. Merriam, M.N. Shearer y C.M. Burt, "Evaluating irrigation systems and practices", en *Design and operation of farm irrigation systems*, M.E. Jensen (ed.), *ASAE Monograph*, N° 3, pp. 721-760, (1980).
- 11 A.C. Merrington y E.G. Richardson, "The breakup of liquid jets", *Proc. Phy. Soc.*, London, Vol. **59**, N° 2, pp. 1-13, (1947).
- 12 J. Montero, "Análisis de la distribución de agua en riego por aspersión estacionario. Desarrollo del modelo de simulación de riego por aspersión SIRIAS", tesis doctoral, ETSIA-Universidad de Castilla-La Mancha, (1999).

- 13 I. Seginer, "Tangential velocity of sprinkler drops", *Trans. ASAE*, Vol. **8**, N° 1, pp. 90–93, (1965).
- 14 I. Seginer, D. Kantz y D. Nir, "The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers", *Agric. Water Manage.*, Vol. **19**, pp. 341–359, (1991a).
- 15 I. Seginer, D. Nir y R.D. von Bernuth, "Simulation of wind-distorted sprinkler patterns", *J. Irrig. Drain. Engng.*, Vol. **117**, N° 2, pp. 285–305, (1991b).
- 16 B. Stanhill, "A simple instrument for the field measurements of turbulent diffusion flux", *J. Appl. Meteorol.*, Vol. **8**, N° 4, pp. 509–513, (1969).
- 17 C.B. Tanner y W.L. Pelton, "Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman", *J. Geophys. Res.*, Vol. **65**, N° 10, pp. 3391–3413, (1960).
- 18 J.M. Tarjuelo, "*El riego por aspersión y su tecnología*", Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España, (1999).
- 19 J.M. Tarjuelo, P. Carrión y M. Valiente, "Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento", *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetales*, Vol. **9**, N° 2, pp. 255–272, (1994).
- 20 J.M. Tarjuelo, J.A. de Juan, M. Valiente y P. García, "Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II: A case study of irrigation scheduling in Albacete", *Spain. Agr. Water Mngt.*, Vol. **31**, pp. 145–163, (1996).
- 21 J.M. Tarjuelo, J. Montero, P.A. Carrión, F.T. Honrubia y M.A. Calvo, "Irrigation uniformity with medium size sprinklers. Part II. Influence of wind and other factors on water distribution", *Transactions of the ASAE*, Vol. **42**, N° 3, pp. 677–689, (1999).
- 22 J.M. Tarjuelo, J. Montero, F.T. Honrubia, J.J. Ortiz y J.F. Ortega, "Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area", *Agric. Water Manage.*, Vol. **40**, pp. 315–331, (1999b).
- 23 J.M. Tarjuelo, J.F. Ortega, J. Montero, J.A. de Juan, "Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions, *Agric. Water Manage.*, en prensa, (2000).
- 24 J.M. Tarjuelo, M. Valiente y J. Lozoya, "Working conditions of sprinkler to optimize application of water, *J. Irrig. Drain. Engng.*, Vol. **118**, N° 6, pp. 895–913, (1992).
- 25 UNE. 68-072-86, "*Norma española. Aspersores rotativos. Requisitos generales y métodos de ensayo*", AENOR, España, (1986).
- 26 R.D. von Bernuth y I. Seginer, "Wind considerations in sprinkler system design. Visions of the future", *ASAE. Third National Irrigation Symposium*, pp. 334–339, (1990).
- 27 R.D. von Bernuth y J.R. Gilley, "Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data", *Trans. ASAE*, Vol. **27**, N° 5, pp. 1435–1441, (1984).
- 28 E.D. Vories, R.D. von Bernuth y R.H. Mickelson, "Simulating sprinkler performance in wind", *J. Irrig. Drain. Engng.*, Vol. **113**, n° 1, pp. 119–130, (1987).