

SIPAR_ID: UNA HERRAMIENTA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EL ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE DE LOS PARÁMETROS DEL RIEGO POR SUPERFICIE

J. A. Rodríguez, J. C. Martos

E. Pública Desarrollo Agrario y Pesquero. Área de Regadíos. Bergantín 39, 41012. Sevilla.
E-mail: {jarodriguez, jcmartos}@dap.es

RESUMEN. Se presenta una herramienta informática para la modelización inversa multi-objetivo del riego por superficie con vista a identificar los parámetros de infiltración y resistencia hidráulica. SIPAR_ID incorpora un modelo híbrido que combina una solución de balance de volumen con cuatro redes neuronales artificiales para simular la fase de avance del riego por superficie. Las redes neuronales se entrenaron para estimar la evolución temporal del calado y el volumen del flujo superficial bajo condiciones de estabilidad y fluctuación temporal del caudal de riego. El usuario puede elegir diferentes funciones objetivos como son minimizar las diferencias entre las distancias o las velocidades de avance observadas y simuladas y, simultáneamente, minimizar las diferencias de los calados. SIPAR_ID utiliza un algoritmo de optimización heurístico conocido como Evolución Diferencial. Este método combina la estrategia de generación aleatoria de poblaciones con la mutación auto-adaptable, dando como resultado un algoritmo de optimización extraordinariamente robusto, eficiente y fácil de implementar. SIPAR_ID posee herramientas para analizar la incertidumbre de los parámetros identificados y su sensibilidad a las variables que intervienen en la función objetivo. Se han implementado tres variantes del método Bootstrap que permiten re-muestrear los residuos de las simulaciones bajo las condiciones de homocedasticidad (Bootstrap Estándar), heterocedasticidad (Wild Bootstrap) y auto-correlación temporal (Bootstrap Local Markoviano). SIPAR_ID ha sido programado en Visual Basic y posee una interfaz amigable, intuitiva y muy flexible.

ABSTRACT. SIPAR_ID is a software for estimating field values of infiltration and roughness parameters of a surface irrigation event under both steady and variable inflow conditions. The basic features of this software are: (i) robust multiobjective inverse modeling for surface irrigation parameter identification, (ii) hybrid model that combines a volume-balance approach with four artificial neural networks for simulating the surface irrigation advance phase, (iii) fast and efficient evolutionary optimization algorithm known as Differential Evolution, (iv) advance (distance or rate) and flow depth data which can be used for defining the objective function, (v) assimilation of gradual and sudden inflow variations and (vi) uncertainty and sensitivity analysis of the identified

parameters implemented with three variants of the Bootstrap procedure (Standard, Wild and Markovian Local). SIPAR_ID has been developed in Visual Basic with a flexible and intuitive graphical user interface.

1.- Introducción

La capacidad de infiltración y la resistencia hidráulica del suelo ejercen un profundo efecto sobre el funcionamiento de los sistemas de riego por superficie. Una estimación razonable de estos parámetros es crucial para el buen diseño y manejo de estos sistemas (Strelkoff et al., 2000). Se ha demostrado en las evaluaciones de campo que la implementación de prácticas óptimas de manejo del agua posibilitan mejorar sensiblemente los índices de idoneidad de los sistemas de riego por superficie. Kennedy (1994) y Hanson (1995) encontraron que las eficiencias de los sistemas de riego por superficie bien diseñados y manejados en California se aproximaron o superaron a las conseguidas por los sistemas presurizados.

Para determinar las estrategias óptimas de manejo del riego es necesario reproducir las complejas interacciones que se producen entre el agua y el suelo. Por lo tanto, se puede comprender que uno de los principales obstáculos para mejorar la eficiencia del riego por superficie es la dificultad que supone identificar adecuadamente los parámetros de infiltración y rugosidad del suelo.

Los métodos para estimar la infiltración y la resistencia hidráulica en el riego por superficie deben simular los cambios dinámicos que ocurren en la interfaz suelo-agua y el movimiento de las partículas en suspensión que generan condiciones diferentes a las que ocurren bajo superficie de agua estática (Walker, 1989). Una vía efectiva para reproducir estos fenómenos es identificar los parámetros a partir de las mediciones realizadas durante un evento real de riego (Elliot y Walker, 1982), procedimiento conocido como solución del problema inverso.

Decenas de métodos han sido propuestos para solucionar el problema inverso del riego por superficie (Strelkoff et al., 2000; Clemmens et al., 2001). La mayoría de los métodos intentan identificar los parámetros basados en el principio de conservación de la masa. La idea en que se sustentan estos métodos es simple: si se conoce la variación temporal de los

volúmenes de agua aplicado y almacenado sobre la superficie del campo durante la fase de avance del riego, también será posible identificar el volumen de agua que se infiltra en el suelo. Así, los parámetros de infiltración y rugosidad que satisfacen la ecuación de balance de volumen anterior serán los más representativos.

Sin embargo, varios autores (Renault y Wallender, 1996; Rodríguez, 1996; Walker y Kasilingam, 2004; Gillies et al., 2007) reconocen que algunas soluciones del problema inverso pueden incurrir en serias violaciones del principio de conservación de la masa, tales como: (i) ignorar la variación temporal del caudal de riego, (ii) estimar el área del flujo superficial a través de ecuaciones de régimen uniforme, (iii) asumir formas arbitrarias de los flujos superficial e infiltrado y (iv) forzar la trayectoria de avance del agua a seguir una función matemática predeterminada. Estas violaciones pueden ejercer un efecto nocivo en el proceso de identificación de parámetros del riego por superficie. Algunos autores intentan remediar esta situación incluyendo otras fases del riego (almacenamiento y/o receso) en la ecuación de balance de volumen, a expensas del incremento de esfuerzos que supone estas prácticas en las evaluaciones de campo (Scaloppi et al., 1995; Gillies y Smith, 2005; Walker, 2005).

Idealmente, una herramienta para identificar los parámetros del riego por superficie con los datos de la fase de avance debe sustentarse en los siguientes principios:

1. El motor de simulación del riego debe ser tan preciso como una solución en Inercia Nula de las ecuaciones de Saint-Venant (Strelkoff y Katapodes, 1977), siendo a su vez mucho más eficiente numéricamente como para ser involucrado en un proceso de identificación de parámetros.
2. El procedimiento de optimización debe ser rápido, robusto y global; y al mismo tiempo suficientemente flexible para facilitar la optimización multi-objetivo automática sin intervención del usuario.
3. Se debe prestar especial atención a la incertidumbre involucrada en el proceso de identificación de parámetros. La herramienta debe cuantificar las principales fuentes de errores, propagarlos a través de

todo el proceso, para finalmente reflejarlos en los parámetros identificados.

SIPAR_ID es una herramienta para la modelización inversa multi-objetivo del riego por superficie que ha sido desarrollada tomando en cuenta los principios anteriores. El objetivo de este trabajo es describir las características básicas de SIPAR_ID con especial atención a los procedimientos numéricos utilizados en la simulación de diferentes procesos.

2.- Modelización del riego por superficie

El movimiento del agua sobre un medio poroso puede ser descrito por las ecuaciones de Saint-Venant (1871), bien conocidas y explicadas en textos y artículos de hidráulica de canales. Estas ecuaciones expresan dos principios físicos: la conservación de la masa (ecuación de continuidad) y la conservación del momento (ecuación dinámica). La aproximación de Saint-Venant no tiene solución analítica conocida, sin embargo, si se somete a ciertas simplificaciones válidas en el riego por superficie puede resolverse sin mayores dificultades.

El grado máximo de simplificación que puede aplicarse a la aproximación de Saint-Venant es integrar la ecuación de continuidad sobre todo el perfil de los flujos superficial e infiltrado, y sustituir la ecuación dinámica por un perfil superficial medio (Bassett et al., 1980). De esta manera se obtiene la ecuación de balance de volumen durante la fase de avance del riego por superficie:

$$Q \cdot t_a = A_0(t_a) \cdot r_y(t_a) \cdot x_a + \int_0^{x_a} Z[t_a - t(x)] dx \quad (1)$$

donde Q es el caudal aplicado durante la fase de avance del evento de riego, x_a es la distancia de avance del frente de agua para un tiempo de aplicación t_a , $A_0(t_a)$ es el área de la sección transversal del flujo superficial al inicio del campo, $r_y(t_a)$ es un factor de forma que supone la relación entre el área media del flujo superficial y $A_0(t_a)$, $Z[t_a - t(x)]$ representa la función de la infiltración acumulada y $t(x)$ es la función de la trayectoria de avance del agua.

Tabla 1. Características de las RNA utilizadas para simular la evolución temporal del área y el volumen del flujo superficial.

Proceso	Topología de la RNA	Funciones de Activación Capa Oculta/Salida	Algoritmo de Aprendizaje	Criterio de Parada del Entrenamiento	No. de Casos del Patrón de Entrenamiento	No. de Casos para Validación Cruzada	No. de Casos del Patrón de Verificación
Área del flujo superficial	Perceptron Multicapa 1 Capa Oculta 5 EP ¹	Sigmoidal/Sigmoidal	Levenberg-Marquardt	Validación Cruzada	3320	20% de los patrones de entrenamiento	Serie independiente de 980 patrones
Volumen del Flujo Superficial	Perceptron Multicapa 1 Capa Oculta 7 EP ¹	Sigmoidal/Lineal	Levenberg-Marquardt	Validación Cruzada	3320	20% de los patrones de entrenamiento	Serie independiente de 980 patrones

¹ Elementos de Proceso (Neuronas) en la capa oculta

Varias soluciones del problema inverso utilizan la ecuación de Manning para determinar A_0 , consideran un valor constante de r_y (normalmente entre 0,7 y 0,8), asumen

una función $t(x)$ para resolver la integral definida del miembro derecho de la ecuación (1) y estiman el volumen de agua aplicado al campo con un caudal medio. Estas

suposiciones tan frecuentes, son precisamente las que inducen violaciones del principio de conservación de la masa. Para el desarrollo de SIPAR_ID se ha intentado eludir todas estas suposiciones de la siguiente manera.

Primero, Valiantzas (1997) obtuvo una expresión analítica para estimar la variación temporal del factor de forma sub-superficial correspondiente al modelo de infiltración de Kostiakov (1932). La expresión se obtuvo mediante el análisis dimensional de los resultados de un modelo numérico que no asume función alguna para describir la trayectoria de avance del agua. SIPAR_ID utiliza la aproximación de Valiantzas para calcular el volumen de agua infiltrado en el suelo.

Segundo, se desarrollaron dos redes neuronales artificiales (RNA) para estimar la evolución temporal del área y el volumen del flujo superficial (Tabla 1). Se prepararon dos patrones de datos para el entrenamiento y la verificación de las redes con los resultados de múltiples experimentos numéricos ejecutados con el modelo SRFR (Bautista et al., 2006) para una amplia gama de las variables de entrada. A fin de reducir la dimensionalidad del problema y garantizar la generalización de los resultados de las RNA, las variables originales se expresaron en notación adimensional según el esquema propuesto por Katopodes y Strelkoff (1977). Así, la RNA para estimar el área del flujo superficial se entrenó con $p2$, $a2$, a , X^* , T^* , y K^* como variables de entrada y A^* como variable de salida. Por su parte la RNA para calcular el volumen del flujo superficial utilizó $p2$, a , $\ln(T^*)$, $\ln(X^*)$, K^* y A^* como entrada y $\ln(V^*)$ como salida. Las variables adimensionales que finalmente intervinieron en el entrenamiento de cada RNA se eligieron mediante prueba y error y análisis de sensibilidad. Las variables anteriores se definieron como sigue:

$$X^* = \frac{X}{Xr} \quad T^* = \frac{T}{Tr} \quad A^* = \frac{A}{Ar} \quad K^* = \frac{KTr^a}{Ar} \quad V^* = \frac{Vs}{Vr} \quad (2a-e)$$

$$Ar = An \quad Xr = \frac{Q \cdot Tr}{Ar} \quad Tr = \frac{Yn \cdot An}{So \cdot Q} \quad Vr = Q \cdot Tr \quad (3a-d)$$

donde X y T son la distancia y el tiempo de avance respectivamente, A es el área del flujo superficial, K y a son el coeficiente y el exponente de la ecuación de infiltración

de Kostiakov, Vs es el volumen de agua almacenado sobre la superficie del suelo, An y Yn son el área y el calado normal estimados por la ecuación de Manning, Q es el caudal de riego, So es la pendiente longitudinal del campo y $p2$ y $a2$ son coeficientes que dependen de la geometría del flujo superficial (Walker, 1989).

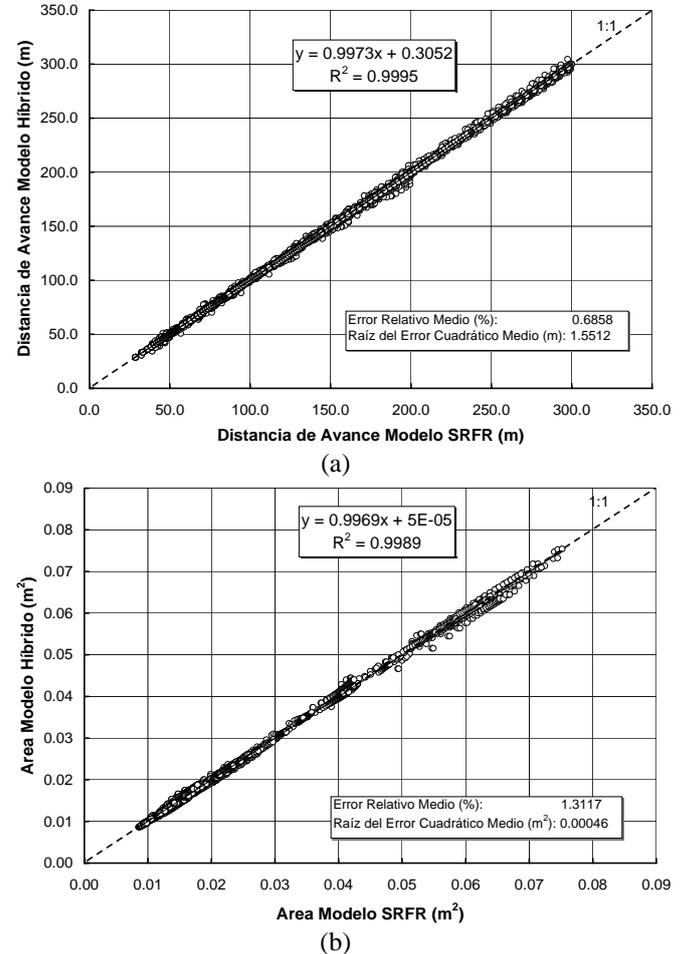


Fig. 1. Comparación de los resultados obtenidos con los modelos híbrido y SRFR (Solución inercia nula). (a) Distancia de avance. (b) Área del flujo superficial.

Tabla 2. Características de las RNA utilizadas para estimar los caudales equivalentes para la simulación de la fase de avance en condiciones de fluctuación temporal del caudal de riego.

Proceso	Topología de la RNA	Funciones de Activación Capa Oculta/Salida	Algoritmo de Aprendizaje	Criterio de Parada del Entrenamiento	No. de Casos del Patrón de Entrenamiento	No. de Casos para Validación Cruzada	No. de Casos del Patrón de Verificación
Q equivalente	Perceptron Multicapa	Tangente	Levenberg-	Validación	29802	30% de los	Serie
Área del flujo superficial	1 Capa Oculta	Hiperbólica/Lineal	Marquardt	Cruzada		patrones de entrenamiento	independiente de 1656 patrones
Q equivalente	Perceptron Multicapa	Tangente	Levenberg-	Validación	29802	30% de los	Serie
Distancia de avance	1 Capa Oculta	Hiperbólica/Lineal	Marquardt	Cruzada		patrones de entrenamiento	independiente de 1656 patrones

¹ Elementos de Proceso (Neuronas) en la capa oculta

El modelo híbrido así desarrollado es capaz de predecir la distancia de avance y el calado del flujo superficial con una precisión similar a la alcanzada con SRFR (Fig. 1). Además, la solución del modelo es explícita en el tiempo y la convergencia de los cálculos se logra en 4 ó 5 iteraciones. Todo esto hace que el modelo híbrido resulte muy atractivo para ser incorporado en un proceso de identificación de parámetros del riego por superficie, en donde el avance y calado deben calcularse repetidamente.

Finalmente, SIPAR_ID ha sido desarrollado para asimilar las fluctuaciones temporales del caudal de riego en el proceso de identificación de parámetros. Para esto, el miembro izquierdo de la ecuación (1), que representa el volumen de agua aplicado al campo, se sustituyó por la

$$\text{expresión } \sum_{t=0}^{t=ta} Q(t) \cdot dt$$

lineal del higrógrafo de riego para calcular el volumen de agua aplicado en cada intervalo de tiempo. Para evitar los errores sustanciales que supone considerar que el volumen superficial y el calado fluctúan en la misma proporción que el caudal instantáneo de riego (Gillies et al., 2007), SIPAR_ID dispone de otras dos RNA que corrigen este efecto transitorio sobre la fase de avance del riego por superficie. Estas RNA se entrenaron para estimar unos caudales equivalentes que permiten utilizar las mismas expresiones desarrolladas en régimen permanente para simular las condiciones de régimen transitorio. Una RNA determina el caudal equivalente para calcular el área del flujo superficial, mientras que la otra red estima el caudal equivalente para calcular la distancia de avance. Las características generales de estas redes se muestran en la Tabla 2.

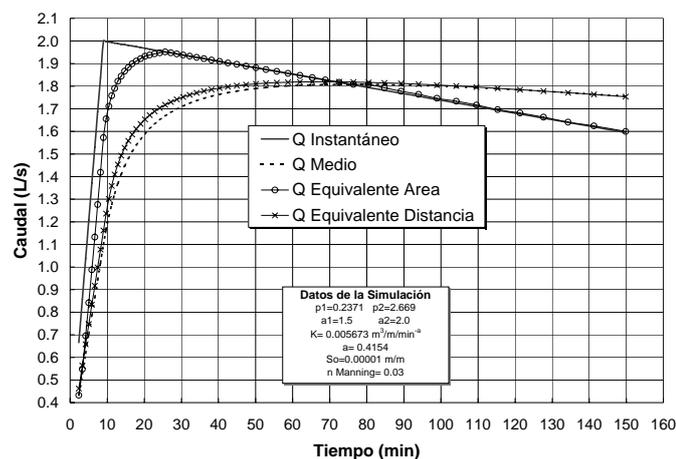


Fig. 2. Ejemplo del comportamiento típico de los caudales equivalentes para simular la fase de avance en condiciones de fluctuación temporal del caudal de riego.

Para entrenar las nuevas RNA se ejecutaron otros experimentos numéricos con SRFR bajo condiciones de fluctuación temporal (repentina y gradual) del caudal de riego. Las variables originales se transformaron acorde con

la notación adimensional reseñada anteriormente. La RNA que estima el caudal equivalente para calcular el área del flujo superficial se entrenó con $p1, p2, a1, a2, a, X^*, T^*, K^*$ y Q^* como variables de entrada y Qa^* como variable de salida. La otra red utilizó las mismas variables de entrada y Qx^* como salida. Q^* se definió como la relación entre el caudal medio y el caudal instantáneo de riego para un tiempo determinado. Asimismo, Qa^* y Qx^* representan la relación entre los caudales equivalentes y el caudal instantáneo de riego.

Del análisis de los experimentos numéricos se pudo constatar que los caudales equivalentes permanecen acotados por los caudales medio e instantáneo. Como regla general, el caudal equivalente para estimar el área del flujo superficial tiende rápidamente al caudal instantáneo, mientras que la evolución del caudal equivalente para estimar la distancia de avance se aproxima a la seguida por el caudal medio de riego. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de este comportamiento típico, que puede variar en función de las características geométricas del flujo superficial, la capacidad de infiltración del suelo y la pendiente longitudinal del campo. En cualquier caso, las RNA predicen acertadamente los valores de los caudales equivalentes (Tabla 3). Consecuentemente, el modelo híbrido es capaz de simular la distancia de avance y el área del flujo superficial en condiciones de régimen transitorio con una precisión similar a la alcanzada en situaciones de estabilidad temporal del caudal de riego.

Tabla 3. Evaluación de la capacidad predictiva de las RNA para simular los caudales equivalentes.

Simulación	Error Relativo Medio (%)	Raíz del Error Cuadrático Medio (L/s)	Coefficiente de Correlación
Q equivalente Área del flujo superficial	1,4677	0,0507	0,9981
Q equivalente Distancia de avance	1,6544	0,0521	0,9979

3.- Identificación de parámetros

SIPAR_ID utiliza técnicas de modelización inversa multi-objetivo para identificar los parámetros de infiltración y resistencia hidráulica correspondientes a las ecuaciones de Kostiakov y Manning respectivamente. En el contexto del riego por superficie se ha demostrado que para garantizar la unicidad de los parámetros estimados a partir de las mediciones de la fase de avance, el procedimiento de identificación debe considerar la evolución temporal del calado y la distancia (o velocidad) de avance simultáneamente (Katopodes et al., 1990). Por otro lado, Scott y Katopodes (1998) concluyeron que el algoritmo de optimización de la función objetivo debe ser global para garantizar la convergencia y la fiabilidad de los resultados.

SIPAR_ID utiliza dos funciones objetivos (FO) y un algoritmo de optimización heurístico para identificar simultáneamente los parámetros de infiltración y rugosidad.

La primera función objetivo evalúa el ajuste del modelo híbrido a las distancias o las velocidades de avance medidas en el campo, mientras que la segunda función valora el ajuste del calado (Fig. 3). Ambas FO utilizan la raíz del error cuadrático medio como medida del ajuste. Las FO así definidas se agregaron en una sola medida. Para compensar las diferencias de magnitudes, las FO se convirtieron a una escala común mediante funciones de transformación (g_i) (Madsen, 2003; Mertens et al., 2006):

$$g_i(F_i) = \frac{FO_i}{\sigma_i} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

donde σ_i es la desviación estándar de la función objetivo i evaluada con la población inicial generada por el algoritmo de optimización, y ε_i es una constante de transformación dada por:

$$\varepsilon_i = \max \left[\min \left(\frac{FO_j}{\sigma_j} \right), j = 1, 2 \right] - \min \left(\frac{FO_i}{\sigma_i} \right) \quad (5)$$

Las funciones objetivos se agregaron como sigue:

$$FO_{agr} = w \cdot g_1 \cdot FO_1 + (1 - w) g_2 \cdot FO_2 \quad (6)$$

donde w es un factor de peso. Se utilizó un valor de w igual a 0,5 para asignar igual peso a ambos objetivos y obtener una optimización balanceada.

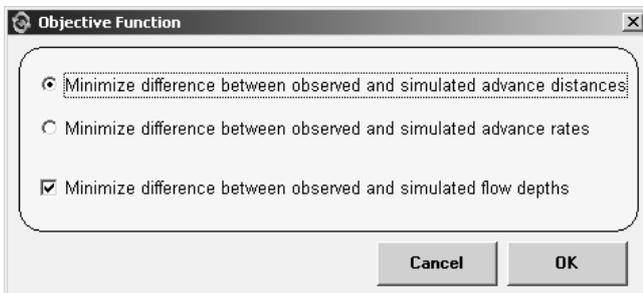


Fig. 3. Definición de las funciones objetivos en SIPAR_ID.

Además de los parámetros de infiltración y rugosidad, SIPAR_ID es capaz de identificar el tiempo inicial de estabilización del hidrógrafo de riego. En el riego por superficie es frecuente que el caudal aplicado tarde unos minutos en estabilizarse al inicio del evento, sin embargo, en muchas ocasiones estas fluctuaciones iniciales del caudal no se miden en las evaluaciones de campo. Renault y Wallender (1996) advirtieron que ignorar la fluctuación inicial del caudal de riego puede ejercer un efecto negativo en la identificación de los parámetros de infiltración. Por otro lado, Katopodes (1990) demostró que el hidrógrafo del caudal de riego es identificable a partir de los datos de la fase de avance. SIPAR_ID asume que el caudal de riego aumenta linealmente desde cero hasta el primer valor definido por el usuario en el hidrógrafo. La duración de este proceso desde el inicio del evento de riego es desconocida.

Así, el tiempo de estabilización del hidrógrafo de riego se incorpora en la modelización inversa como un parámetro más a identificar a partir de las mediciones de la fase de avance (Fig. 4).

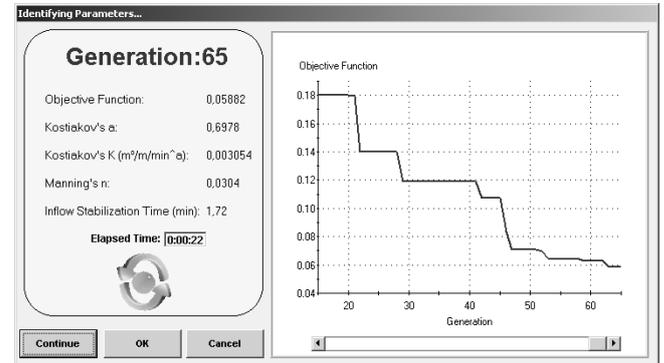


Fig. 4. Pantalla de SIPAR_ID durante el proceso de identificación de parámetros.

Para minimizar las funciones objetivo, SIPAR_ID utiliza un algoritmo de optimización heurístico conocido como Evolución Diferencial (ED) (Storn y Price, 1997; Mayer et al., 2005). ED es un algoritmo híbrido que combina los conceptos de generación de poblaciones de los algoritmos genéticos con la mutación auto-adaptable de las estrategias de evolución. ED se configura fácilmente con tres parámetros (Fig. 5) y puede programarse con solo 20 líneas de código. De acuerdo a la terminología de Storn y Price (1997), SIPAR_ID utiliza la versión estándar del algoritmo denominada DE/rand/1/bin. Estos autores han demostrado que ED es más eficiente y robusto que los algoritmos genéticos, las estrategias de evolución y otros procedimientos heurísticos de optimización.

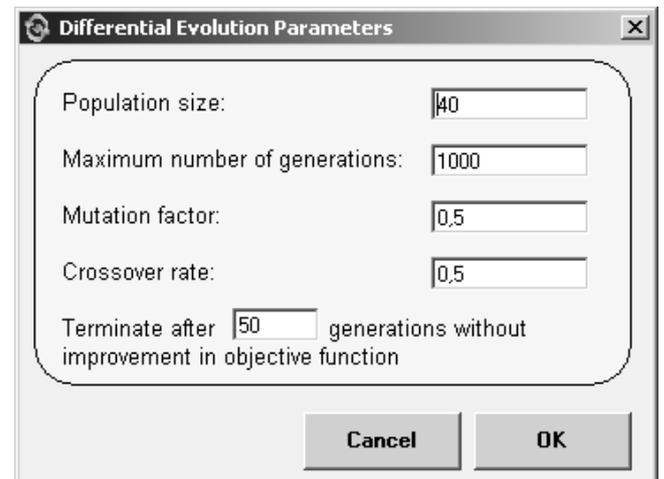


Fig. 5. Configuración de la Evolución Diferencial en SIPAR_ID.

En la Fig. 6 se muestra la interfaz gráfica del usuario de SIPAR_ID. El usuario puede resolver cuatro problemas en función de la combinación de parámetros que desee

identificar: (i) parámetros de infiltración, rugosidad y tiempo de estabilización del higrógrafo de riego, (ii) parámetros de infiltración y rugosidad, (iii) parámetros de infiltración y tiempo de estabilización del hidrógrafo de riego y (iv) parámetros de infiltración. El usuario debe introducir los datos de avance, el higrógrafo de riego y las mediciones del calado, así como las características geométricas de la sección transversal del flujo superficial y la pendiente longitudinal del campo.

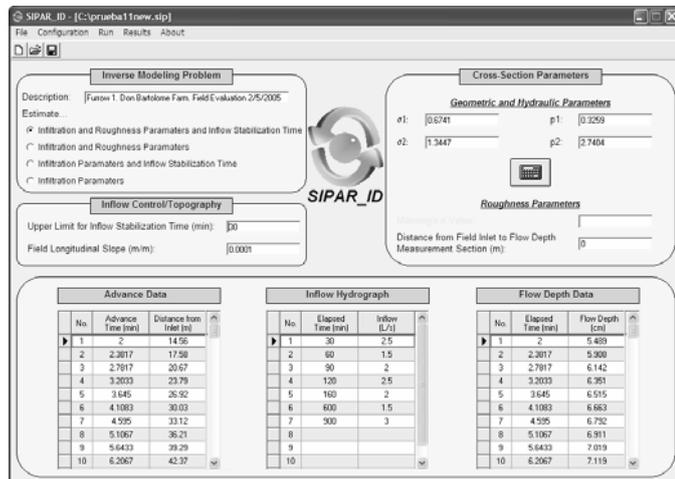


Fig. 6. Interfaz gráfica del usuario de SIPAR_ID.

SIPAR_ID posee una calculadora de parámetros geométricos para facilitar la obtención de $a1$, $a2$, $p1$ y $p2$ (Fig. 7). En el menú Configuración se puede definir los parámetros de la ED, las funciones objetivos a minimizar, el espacio de búsqueda de los parámetros a identificar y la configuración del análisis de incertidumbre y sensibilidad.

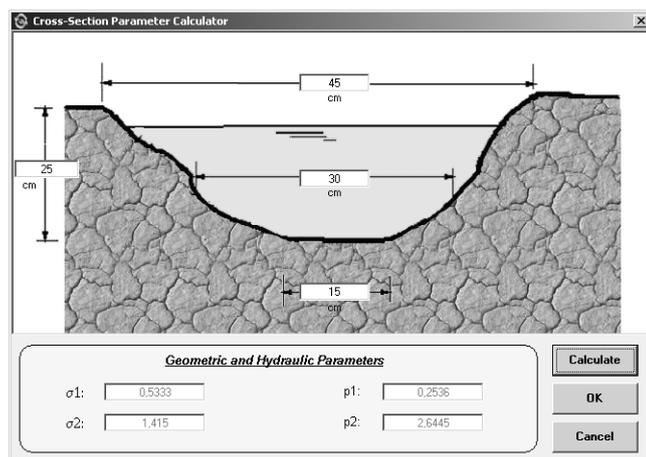


Fig. 7. Calculadora de parámetros de la sección transversal del flujo superficial.

4.- Análisis de incertidumbre y sensibilidad

En un proceso de identificación de parámetros se genera cierta incertidumbre como consecuencia de los errores de

medición de las variables que intervienen en la función objetivo y los errores estructurales del modelo. Usualmente la incertidumbre se expresa como intervalos de confianza de los parámetros identificado. Los métodos estadísticos estándares para estimar los intervalos de confianza asumen que los residuos (diferencia entre los valores medidos y simulados) son independientes y siguen una distribución normal. Estas suposiciones no siempre se cumplen en la realidad.

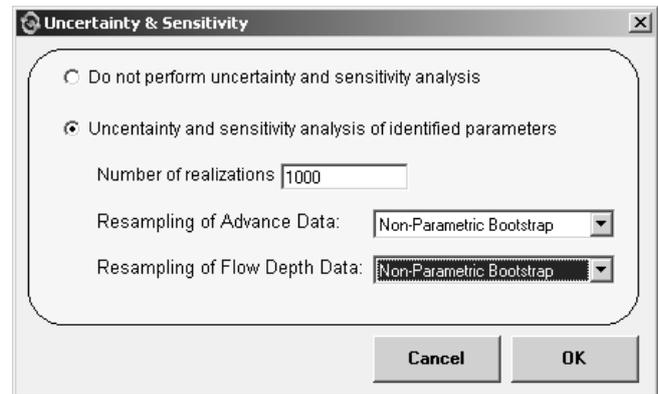


Fig. 8. Definición de las variantes de Bootstrap en SIPAR_ID.

SIPAR_ID utiliza el método de Bootstrap para cuantificar la incertidumbre de los parámetros identificados. Se han implementado tres variantes del método para abordar las situaciones más frecuentes (Fig. 8), siendo: (i) Bootstrap no paramétrico estándar (Efron, 1987) para condiciones de homocedasticidad (residuos idénticos e independientemente distribuidos), (ii) Wild Bootstrap (Liu, 1988) para condiciones de heterocedasticidad (la varianza de los residuos cambia con el tiempo) y (iii) Bootstrap Local Markoviano (Paparoditis y Politis, 2001) para condiciones de auto-correlación temporal de los residuos. La sensibilidad de los parámetros identificados se expresa a través del coeficiente de correlación de Spearman, que se calcula utilizando las realizaciones de datos generadas por el algoritmo Bootstrap.

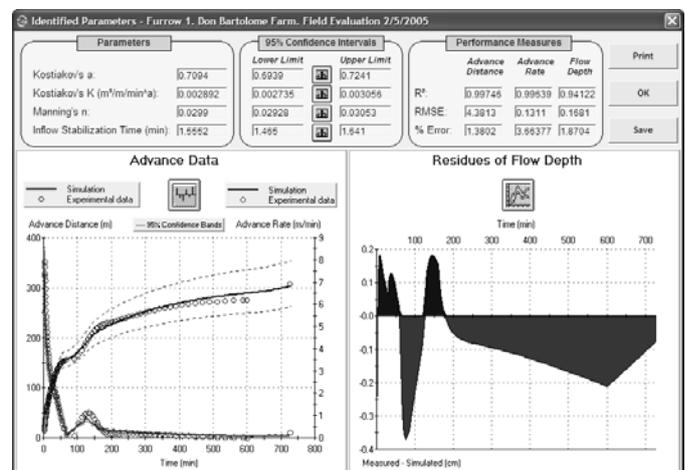


Fig. 9.- Pantalla de resultados de SIPAR_ID.

Finalmente, en la Fig. 9 se muestra la pantalla principal de resultados de SIPAR_ID. Además de los resultados mostrados, también es posible obtener los histogramas de los parámetros identificados y sus gráficos de sensibilidad. SIPAR_ID se distribuye bajo licencia “Freeware” para uso personal, académico o de investigación; y puede descargarse desde: <http://www.siparid.110mb.com/>.

5.- Conclusiones

SIPAR_ID es una herramienta informática para estimar los parámetros de infiltración y rugosidad de un evento de riego por superficie bajo condiciones de estabilidad y fluctuación temporal del caudal de riego. Aunque basado en un modelo de balance de volumen, SIPAR_ID es capaz de simular la fase de avance del riego por superficie con una precisión similar a la alcanzada por la solución en Inercia Nula de las ecuaciones de Saint-Venant. SIPAR_ID posee una serie de características distintivas que permiten eludir todas las simplificaciones que inducen serias violaciones del principio de conservación de la masa y cuantificar la incertidumbre de los parámetros identificados. Entre las principales características destacan:

1. Modelización inversa multi-objetivo para identificar los parámetros del riego por superficie.
2. Modelo híbrido que combina una solución de balance de volumen con redes neuronales artificiales para simular la fase de avance del riego por superficie.
3. Eficiente y robusto algoritmo de optimización heurístico (Evolución Diferencial).
4. Definición de la función objetivo con los datos de avance y de calado.
5. Asimilación de variaciones graduales y repentinas del caudal de riego.
6. Análisis de incertidumbre y sensibilidad de los parámetros identificados.

SIPAR_ID se distribuye bajo licencia “Freeware” para uso personal, académico o de investigación; y puede descargarse desde: <http://www.siparid.110mb.com/>.

Bibliografía

- Bassett, D.L., Frangmeier, D.D. y Strelkoff, T. 1980. Hydraulics of surface irrigation systems. En: *Design and operation of farm irrigation systems. ASAE Monograph No.3*, St. Joseph, Michigan, 829 pp.
- Bautista, E., Schlegel, J.L., Strelkoff, T., Clemmens, A.J. y Strand, R.J. 2006. An integrated software package for simulation, design, and evaluation of surface irrigation systems. *Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress*. 10 pp.
- Clemmens, A.J., Eisenhauer, D.E. y Maheshwari, B.L. 2001. Infiltration and roughness equations for surface irrigation: How form influences estimation. *ASAE Annual International Meeting. Sacramento Convention Center*. Sacramento, California, USA. July 30-August 1.
- Efron, B. 1987. Better bootstrap confidence intervals. *J Am Stat Assoc*, 82: 171-185.
- Elliot, R.L. y Walker, W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans ASAE*, 15(2): 369-400.
- Gillies, M.H. y Smith, R.J. 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrig Sci*, 24(1): 25-35.
- Gillies, M.H., Smith, R.J. y Raine, S.R. 2007. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrig Sci*, 25(2): 87-97.
- Hanson, B., Bowers, W., Davidoff, B., Kasapligil, D., Carvajal, A. y Bendixen, W. 1995. Field performance of microirrigation systems. In: *Microirrigation for a changing world, Proc. of the Fifth International Microirrigation Congress*, ASAE. April 2-6, Orlando, Florida.: 769-774.
- Katopodes, N.D. 1990. Self-Adaptive control of surface irrigation advance. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 116(5): 697-713.
- Katopodes, N.D. y Strelkoff, T. 1977. Dimensionless solutions of border-irrigation advance. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 103(4): 401-417.
- Katopodes, N.D., Tang, J.H. y Clemmens, A.J. 1990. Estimation of surface irrigation parameters. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 116(5):676-696.
- Kennedy, D.N. 1994. California water plan update. *California Department of Water Resources, Sacramento, CA. Vol 1, Bulletin 160-95*. 166 pp.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of coefficient of water-percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans Com Int Soc Soil Sci 6th, Moscú, Part A:267-272*.
- Liu, R.Y. 1988. Bootstrap procedure under some non-i.i.d. models. *Ann Statist*, 16: 1696-1708.
- Madsen, H. 2003. Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Adv Water Resourc*, 26: 205-216.
- Mayer, D.G., Kinghorn, B.P y Archer, A.A. 2005. Differential evolution—an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation. *Agric Syst* 83: 315-328.
- Mertens, J., Stenger, R. y Barkle, G.F. 2006. Multiobjective inverse modeling for soil parameter estimation and model verification. *Vadose Zone J*, 5:917-933 .
- Papadoditis, E. y Politis, D.N. 2001. A Markovian local resampling scheme for nonparametric estimators in time series analysis. *Econom Theory*, 17: 540-566.
- Renault, D. y Wallender, W.W. 1996. Initial-inflow variation impacts on furrow irrigation evaluation. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 122(1):7-14.
- Rodríguez, J.A. 1996. Caracterización del proceso de infiltración en el riego por surcos con flujo continuo. Desarrollo teórico. *Tesis presentada en cumplimiento al grado de Master en Riego y Drenaje*. Universidad Agrícola de la Habana. C. Habana. 114pp.
- Saint-Venant, A.J.C. 1871. Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux des rivières et a l'introduction des marées dans eut lits. *Comptes rendus des séances de l'Académie Sciences*, 73:147-154.
- Scaloppi, E.J., Merkley, G.P. y Willardson, L.S. 1995. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 121(1):57-70.
- Scott, A.Y. y Katopodes, N.D. 1998. Global identification of surface irrigation parameters. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 124(3): 131-139.
- Storn, R. y Price, K. 1997. Differential Evolution—A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J Glob Optim*, 11: 341-359.
- Strelkoff, T., Clemmens, A.J. y Bautista, E. 2000. Field parameter estimation for surface irrigation management and design. In *Watershed Management 2000 Science and Engineering Technology for the New Millennium*, M. Flug and D. Frever (eds.), ASCE (Conf. Fort Collins, CO), Reston, VI, 10 pp.
- Strelkoff, T. y Katopodes, N.D. 1977. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. *J Irrig Drain Div, ASCE*, 103(3): 325-342.
- Valiantzas, J. D. 1997. Surface irrigation advance equation: Variation of subsurface shape factor. *J Irrig Drain Eng, ASCE*. 123(4): 300-306.
- Walker, W.R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation system. *FAO Irrig Drain Paper No. 45*, Rome, 137 pp.
- Walker, W.R. 2005. Multi-level calibration of furrow infiltration and roughness. *J Irrig Drain Eng, ASCE*, 131(2): 129-135.
- Walker W.R. y Kasilingam, B. 2004. Correcting the volume balance equation for shape factors during advance. *World Water and Environmental Resources Congress*. Gerald Sehlke, Donald F. Hayes, David K. Stevens – Editors. Salt Lake City, Utah, USA.

