

# ***LA CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD INICIAL DEL SUELO EN UN ESTUDIO HIDROLÓGICO DE AVENIDAS***

P. Durán<sup>a</sup>,

J. González<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> *Departamento de Ingeniería Civil y de la Construcción. Universidad de Castilla-La Mancha. ETSI Caminos, Canales y Puertos. Avda. Camilo José Cela s/n, 13071. Ciudad Real, España.*

[Javier.Gonzalez@uclm.es](mailto:Javier.Gonzalez@uclm.es); [Pablo.Duran@uclm.es](mailto:Pablo.Duran@uclm.es)

## **Resumen**

Uno de las primeras disquisiciones que se plantea cuando se lleva a cabo un estudio hidrológico es la caracterización del comportamiento del suelo que va a generar la escorrentía y de la definición de las condiciones iniciales de humedad que puede presentar. La relevancia del contenido de humedad en el suelo se debe a que es la variable que controla la mayoría de los procesos hidrológicos que ocurren en la superficie y cerca de ella, gobernando el proceso de reparto de precipitación en escorrentía superficial, infiltración y percolación. La escorrentía producida ante un evento de lluvia depende no sólo de la precipitación producida sino también de las condiciones previas de humedad en la cuenca. En función de la sensibilidad de resultados a las condiciones de humedad consideradas, puede ser necesario la caracterización estadística, no sólo de la precipitación, como es práctica habitual, sino extender a estas condiciones de humedad antecedente.

Uno de los grandes inconvenientes que presentan los modelos de producción de escorrentía es que se encuentran formulados para eventos en muchos casos, como ocurre con el modelo de infiltración SCS ampliamente utilizado, por lo que su adaptación a un análisis riguroso de la dinámica de humedad, mediante un balance continuo, no es directa.

El objetivo principal de la presente investigación es el estudio de las variables más relevantes en la producción de escorrentía, proponiendo para ello un modelo conceptual similar al del SCS, contrastando para ello con un modelo físicamente basado, con el fin de determinar la capacidad del mismo para su uso en la modelización de un evento de lluvia, al tiempo que permita simular el proceso de balance continuo de humedad para caracterizar estadísticamente las condiciones previas posibles. La investigación permite identificar los factores más influyentes en el proceso, solamente representados de forma adecuada por modelos físicamente basados, poniendo de manifiesto que la generación de escorrentía no sólo depende de las características del suelo.

## **1 Introducción**

La humedad del suelo es una variable de estado en el balance de agua del suelo que resume gran parte de la hidrología superficial de una zona y es una variable clave en la descripción de las interacciones entre la superficie de la tierra y la atmósfera. Sin embargo no ha tenido, hasta la fecha, amplia aplicación en la modelización de estos procesos. Esto se debe principalmente a las dificultades relacionadas con su medición, no sólo en un punto en el espacio o el tiempo, sino a intervalos regulares en todas las dimensiones de este espacio, como ya se está haciendo en el caso de observaciones meteorológicas. La gran variabilidad espacio-temporal de la humedad del suelo se debe principalmente a la gran variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas del suelo y de la ocurrencia de precipitación (Vanderlinden 2001).

La importancia en la correcta caracterización de la humedad radica en que controla la mayoría de los procesos hidrológicos que ocurren en la superficie o en las capas cercanas a ésta, tales como la evapotranspiración o la recarga de acuíferos, y en concreto, en el desarrollo de un evento tormentoso controla la producción de escorrentía.

Uno de los problemas existentes a la hora de trabajar con la humedad es la alta variabilidad que presenta debido a la cantidad de variables que influyen en su determinación como son las condiciones climáticas predominantes y las características del suelo. En (Mohr, Famiglietti et al. 2000) se concluye que el patrón espacial de la humedad del suelo simulada está más controlado por la textura del suelo que las observaciones, y que el error está correlacionado con la precipitación. Esto condiciona las medidas que se puedan hacer in situ ya que solo aportan información de un punto en concreto dentro de una cuenca en un momento preciso, por lo que su uso está indicado para el caso de calibración de un modelo más que de predicción de comportamiento.

Los modelos comúnmente desarrollados en España en los estudios hidrológicos por métodos hidrometeorológicos parten de la premisa de igualdad de periodos de retorno en precipitaciones y caudales de escorrentía, lo cual puede representar un error de concepto, ya que se trata suponer la hipótesis de linealidad a un proceso no necesariamente lineal. Uno de los fenómenos cuyo comportamiento no es lineal es la infiltración. Para su evaluación se suele tomar como referencia el método del número de curva descrito en (SCS 1972) con un alto grado de implantación en España. El modelo es fácilmente parametrizable en función del uso y tipo de suelo, pudiéndose ser modificado para tener en cuenta el estado inicial de la humedad en el suelo (condiciones secas, medias o húmedas). Un gran inconveniente que presenta es que el valor del número de curva que se adopte es constante, sin tener en cuenta el periodo el periodo de retorno de diseño. Esto demuestra que dicho parámetro, que debería representar la capacidad de infiltración de un suelo, es insensible a la torrencialidad de la precipitación, ya que viene definido exclusivamente por las características del terreno con independencia de la cantidad precipitada, cuando es sabido que la intensidad de ésta lo modifica (Cifres 2003).

Debido al alto grado de implantación que representa el método del SCS, no es recomendable proponer una sustitución del método, pero sí una adaptación con el fin de incorporar las condiciones iniciales de humedad en el suelo, que pueden resultar muy sensibles a los resultados.

De forma común, se considera que la probabilidad de la escorrentía calculada se corresponde la probabilidad de la precipitación que ha generado tal evento, lo cual es una hipótesis que no tiene en cuenta las variaciones del contenido de humedad en el suelo en la generación de escorrentía superficial por lo que se considera un comportamiento lineal en la respuesta del suelo. Este planteamiento presenta grandes implicaciones por ejemplo en el diseño de las infraestructuras de drenaje, ya que la relevancia de la correcta estimación del periodo de retorno de la escorrentía es tal que las conclusiones extraídas pueden modificar las dimensiones de la misma o la tipología. La principal consecuencia de la variación de las condiciones de humedad inicial del suelo es que la probabilidad de que se genere un determinado volumen de escorrentía superficial será bivariada al depender de la probabilidad que presenten tanto la precipitación como el grado de saturación del suelo (Yue and Rasmussen 2002; Shaw and Walter 2009).

Una de las limitaciones que presenta el método CN-SCS es que el valor del umbral de escorrentía  $S$  no se debe considerar como constante sino como un parámetro que se ve modificado por la capacidad general de almacenamiento de humedad en la zona estudiada, siendo este factor representado de forma indirecta mediante el volumen de cantidad de precipitación recogida previamente. Diversos estudios han intentado modificar el método con el objetivo de poder evaluar dicha humedad antecedente y así poder integrarlo en modelos de balance continuo (Michel, Andréassian et al. 2005; Geetha, Mishra et al. 2007; Sahu R K 2007; Sahu, Mishra et al. 2007; Durbude, Jain et al. 2011), pero en ninguno de ellos se modifica la respuesta del suelo con las condiciones de humedad por lo que el periodo de retorno considerado será el correspondiente al de la precipitación (Merz, Blöschl et al. 2006)

En dichos modelos, la metodología considerada para la evaluación de las condiciones iniciales de una cuenca se basa en la precipitación recogida en los cinco días previos, mediante la definición de tres condiciones de humedad antecedente (AMC) que caracterizan el grado de saturación en que se encuentre el suelo. Se ha comprobado que el volumen acumulado de precipitación previa no es el factor único que define la variación del CN entre eventos, por lo que la denominación correcta para los tres límites anteriores es condiciones de escorrentía antecedentes ARC (Woodward and Plummer 2004; Hawkins, Van Mullem et al. 2009 )

## 2 Metodología

Con objeto de estudiar las variables tanto climáticas como propias del suelo que influyen en el fenómeno de generación de escorrentía en el método del CN SCS, y la relevancia que presenta la estimación de las condiciones iniciales de humedad en dicho fenómeno, se desarrolla una adaptación de forma conceptual del mismo, describiéndose previamente las particularidades del modelo original, y llevando a cabo un contraste de los errores cometidos frente a un modelo físicamente basado.

## 2.1 Modelo del Número de Curva (CN-SCS)

El método del número de curva del SCS (CN-SCS) es un modelo empírico que fue derivado de diversos estudios basados en las relaciones existentes entre la escorrentía y la precipitación para pequeñas cuencas rurales de Estados Unidos, con la finalidad de transformar la precipitación en volumen de escorrentía directa (Ponce and Hawkins 1996). Sin embargo, en (Rallison 1980) se muestra que dicho método es aplicado a un gran número de problemas hidrológicos para los cuales, en principio, no estaba diseñado. En ningún momento se consideran inválidas dichas aplicaciones aunque no debe olvidarse que los autores del mismo no previeron la extensión a un gran número de problemas hidrológicos localizados en cuencas no aforadas (Martinez 1999). Este modelo asume la existencia de un umbral por debajo del cual las precipitaciones no provocan escorrentía; una vez rebasado este umbral, comienza el encharcamiento y la escorrentía en superficie. A partir de este instante, la relación entre la parte de precipitación que escurre en superficie y la que se infiltra a través de la superficie del terreno se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$\frac{F}{S} = \frac{E}{P - P_0}$$

Donde F (mm) es la infiltración acumulada desde que comienza el encharcamiento en superficie, E (mm) la escorrentía acumulada, S (mm) máxima infiltración acumulada posible, P (mm) la precipitación acumulada y  $P_0$  (mm) el umbral de escorrentía, en mm. Por continuidad, la precipitación acumulada en cada instante debe cumplir:

$$P = P_0 + E + F$$

Sustituyendo esta última ecuación en la anterior, y despejando E, la escorrentía acumulada en cada instante resulta:

$$E = \frac{(P - P_0)^2}{P - P_0 + S}$$

Fruto de numerosas experimentaciones, el SCS propone que el umbral de escorrentía se encuentra vinculado a S mediante,

$$P_0 \approx 0.2S$$

La capacidad de retención está relacionada con el número de curva a través de:

$$CN = \frac{25400}{S + 254}$$

La gran ventaja que presenta este método se fundamenta en el alto grado de implantación que presenta dentro del campo de la ingeniería hidrológica, y en que la producción de escorrentía depende principalmente del número de curva, el cual está tabulado para los distintos tipos y usos de suelo más generales. Este valor de número de curva corresponde con la condición inicial de humedad media en el suelo. En el caso de que se quiera obtener su valor en condiciones iniciales de humedad mojadas o secas, existen múltiples referencias de transformación desde el número de curva en condiciones medias a las mencionadas condiciones extremas en (Hawkins, Van Mullem et al. 2009 )

## 2.2 Adaptación del modelo del número de curva (Modelo Conceptual SCS)

El desarrollo de una adaptación de forma conceptual del modelo CN SCS se basa en la caracterización del volumen total de escorrentía generada a partir del dato de precipitación acumulada durante un evento. Una de las hipótesis de partida consideradas es que el método propuesto deber ser válido no solo al final de la tormenta, sino a lo largo de cualquier instante considerado, con el fin de integrarlo dentro de un modelo de simulación continua, al integrarle una metodología con la cual llevar a cabo un balance de la humedad acumulada en el suelo.

La modelización del comportamiento del suelo se caracteriza mediante dos depósitos conectados (Figura 1), los cuales presentan unas capacidades máximas de almacenamiento fijadas por un umbral de escorrentía ( $F_{min}$ ), que determina el volumen mínimo a partir del cual se produce un excedente de precipitación y por el volumen máximo acumulable ( $S_{max}$ ). Inicialmente, se evalúa el volumen disponible en el primer depósito. La estimación de la capacidad útil se encuentra condicionada por el grado de saturación inicial de humedad, correspondiéndose con la diferencia respecto al valor del grado de saturación asociado al umbral de escorrentía ( $\theta_{min}$ ), representado  $P_{min1}$  y  $\theta_{o1}$  en la figura 1. Si dicho valor es superior a la precipitación, todo el volumen aportado será infiltrado.

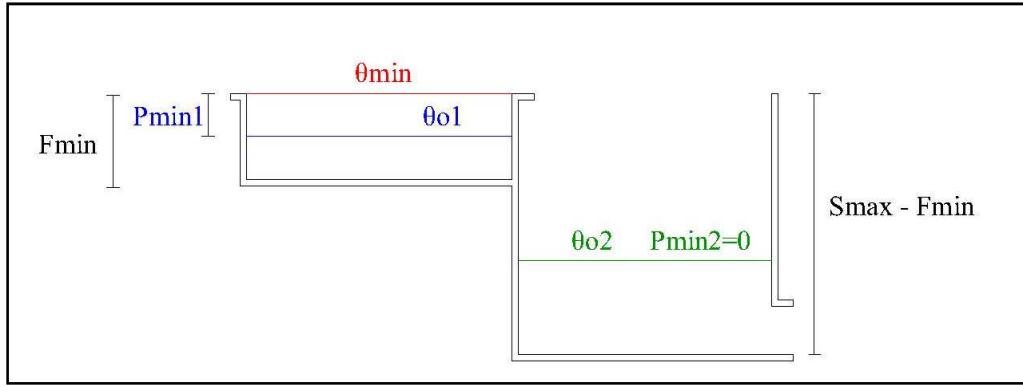


Figura 1. Esquema del modelo conceptual SCS, adaptación del modelo CN-SCS.

En el caso de que la cantidad recogida sea superior a la capacidad disponible en el mismo, una proporción de la misma se transformará en escorrentía, mientras que la parte restante contribuirá a aumentar el contenido de humedad en el suelo al incrementarse el volumen infiltrado, estimándose los volúmenes de escorrentía e infiltración bajo las mismas hipótesis que plantea el método del CN-SCS. Si la humedad antecedente fuera superior al umbral ( $\theta_{o2}$  en la figura 1), el primer depósito se encontraría lleno ( $P_{min2} = 0$ ), siendo necesario extraer de la profundidad de infiltración el volumen correspondiente a la diferencia respecto del valor asociado al umbral de escorrentía  $F_{min}$ . Esto se lleva a cabo restando al valor de escorrentía alcanzado por la precipitación caída más la precipitación asociada al incremento de humedad sobre el umbral, el valor de la escorrentía generada por tal incremento de humedad.

$$F_{min} = \theta_{min} \cdot S_{max}$$

$$P + F_0 < F_{min}$$

$$E = 0,$$

$$P + F_0 > F_{min}$$

$$F_0 < F_{min}$$

$$\frac{P - F_{min} - F_0}{E} = \frac{S_{max}}{F - F_{min}}, \quad E = P - F - P_o,$$

$$E = \frac{(P + F_0 - F_{min})^2}{S_{max} + P + F_0 - F_{min}},$$

$$F_0 \geq F_{min}$$

$$E = E' |_{F_0=F_{min}, P=P+\Delta p} - \Delta E,$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta E} = \frac{S_{max}}{\Delta F},$$

$$\Delta P = \Delta E + \Delta F = \Delta E + (F_0 - F_{min})$$

$$\Delta P = \frac{\Delta F \cdot S_{max}}{S_{max} - \Delta F}$$

$$E = \frac{\left(P + \frac{\Delta F \cdot S_{max}}{S_{max} - \Delta F}\right)^2}{S_{max} + P + \frac{\Delta F \cdot S_{max}}{S_{max} - \Delta F}} - \left(\frac{\Delta F \cdot S_{max}}{S_{max} - \Delta F} - (\Delta F)\right)$$

### 3. Variables consideradas y datos de partida

El modelo propuesto depende de dos parámetros como son  $S_{max}$  y  $\theta_{min}$ , los cuales están vinculados tanto a unas características climáticas como propias del suelo. Es por tanto necesario conocer las variables que influyen en la determinación de ambos, puesto que de esta forma se puede llevar a cabo una generalización del proceso y una adaptación del mismo en base a los factores dominantes en la zona de estudio. Las variables que se consideran influyentes en la determinación de ambos parámetros son el volumen y distribución de la precipitación, la textura del suelo y la distribución de humedad del suelo en función de las características climáticas dominantes. Para cada una de ella se fijan dos valores extremos con el fin de contrastar la notoriedad de cambios en la misma en los resultados de escorrentía obtenidos.

#### 3.1 Precipitación: Volumen y distribución

En el estudio de influencia de la variable de volumen de precipitación sobre los resultados obtenidos, se han considerado dos localizaciones con características climáticas diferentes. El gran inconveniente existente en numerosas situaciones, es que la longitud de la serie observada es demasiado corta como para ser introducida en los modelos de simulación. La solución frente a dicho escenario se basa en la construcción de un modelo de precipitación diaria fundamentado en métodos estocásticos, puesto que la complejidad de los procesos naturales y el desconocimiento de las causas que determinan los fenómenos meteorológicos han obligado a renunciar a estudios analíticos y a usar series cronológicas de sucesos observados de dichos fenómenos. En este caso, se ha implementado un modelo estocástico basado en cadenas de Markov para representar la ocurrencia y distribución de los eventos lluviosos, con la caracterización de la cantidad de precipitación mediante la función de distribución gamma (Tabla 1).

Tabla 1. Precipitación media anual y parámetros de la función gamma para cada una las localizaciones estudiadas. Fuente:AEMET

Localización	Precipitación Media Anual (mm)	Func. Gamma	
		A	B
Santander	1246	0.658	136.25
Ciudad Real	396	0.784	79.14

Con el fin de evaluar la relevancia que presenta la distribución de la intensidad de precipitación, se han seleccionado los hietogramas sintéticos de tormenta tipo I y II para una duración de tormenta igual a 24 horas propuestos en (USDA-SCS 1986), los cuales son estudiados indistintamente para las dos localizaciones anteriores. El motivo por el cual se han escogido estas dos tipologías es su disparidad en el comportamiento a lo largo de una tormenta, la cual se ha de estudiar para ver si presenta relevancia en la estimación de los volúmenes de escorrentía.

#### 3.2 Texturas y distribución de la humedad en el suelo

Para observar la incidencia de las diferentes texturas, se han seleccionado los tipos de suelo marga y arcilla, los cuales se corresponden con las clases B y D según la clasificación propuesta en el método del CN-SCS respectivamente. La elección de los grupos de suelo viene condicionada por la disponibilidad de datos que caractericen la función de distribución de humedad inicial asociada a cada textura o los parámetros que la definan. Dichas funciones se ven condicionadas por las características climáticas dominantes, mostrando un contraste de valores de los parámetros de las funciones establecidos por la localización del emplazamiento analizado.

En este caso se ha considerado la función de distribución beta, con la parametrización para cada una de las texturas anteriores establecida en (Valdés, Díaz-Granados et al. 1990) puesto que las dos localizaciones (Nashua River, New Hampshire y Santa Paula, California) que se estudian muestran volúmenes medios de precipitación anual similares a los de las estaciones pluviométricas anteriores.

### 3.3 Método de Green Ampt – Referencia de contraste de modelos

Para el contraste de los valores de escorrentía diaria generada por los distintos métodos, se ha considerado el uso de un método físicamente basado al ser los modelos que mejor reproducen los cambios de usos de suelo sobre la escorrentía ya que los parámetros de infiltración se hallan vinculados a las características de la cuenca (Wilcox, Rawls et al. 1990), siendo el método elegido el desarrollado por Green-Ampt. Este método de infiltración es derivado de la aplicación de la ley de Darcy al flujo insaturado en suelos con un perfil homogéneo. Se basa en la hipótesis de que el frente de mojado es una frontera brusca que divide el suelo con contenido de humedad ( $\theta_i$ ) debajo del frente de saturación, y un contenido de humedad igual a la porosidad ( $\eta$ ), completamente saturado, por encima del frente de humedad. Se considera que el frente de mojado ha penetrado hasta una profundidad ( $L$ ) desde el momento ( $t$ ) en que la infiltración empieza, encharcándose el agua en la superficie hasta una pequeña profundidad ( $h_0$ ) (Chow, Maidment et al. 1988).

La definición de la infiltración acumulada se obtiene al considerar el suelo como una columna vertical de sección transversal horizontal de área unitaria, y un volumen de control definido alrededor del suelo mojado entre la superficie y la profundidad a la que se encuentra el frente de mojado. La tasa de infiltración y el volumen de infiltración acumulada mediante el método de GA se expresan de la siguiente forma:

$$f(t) = K \left( 1 + \frac{\Psi \cdot \Delta\theta}{F(t)} \right)$$

$$F(t) = K \cdot t + \Psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left( 1 + \frac{F(t)}{\Psi \cdot \Delta\theta} \right)$$

Donde,  $F(t)$  representa la infiltración acumulada,  $k$  es la conductividad hidráulica,  $\Psi$  es la cabeza de succión del suelo en el frente de mojado, y  $\Delta\theta$  es el déficit de humedad (diferencia entre la porosidad y el contenido inicial de humedad).

Un aspecto importante a estudiar en la caracterización de la infiltración es el valor que presenta la cabeza de succión, puesto que presenta dependencia respecto al contenido inicial de humedad (Brooks and Corey 1966; Fredlund, Anqing et al. 1994). Con objeto de analizar la influencia, se ha adoptado el método de Van Genuchten para estimar el valor correspondiente a cada tipo de suelo, el cual se basa en la siguiente relación:

$$S_e = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r}$$

donde  $\alpha$ ,  $n$  y  $m$  son constantes empíricas propias de cada suelo,  $h$  es la cabeza de succión,  $S_e$  representa el grado de saturación del suelo,  $\theta$  es el contenido inicial de humedad,  $\theta_r$  es el contenido residual de humedad y  $\eta$  es la porosidad. La ecuación de Van Genuchten con  $m = 1$  fue usada por (Ahuja and Swartzendruber 1972; Varallyay and Mironenko 1979). La ecuación tiene como límite la expresión de Brooks y Corey con  $\lambda = mn$ . En la tabla 2 se muestran los valores  $\alpha$  y  $n$  para cada una de las texturas de suelo que se analizan.

Tabla 2: Valores medios de los parámetros de los suelos (Rawls, D.L. et al. 1982),  $\alpha$  y  $n$  son los parámetros de Van Genuchten.

Textura	$\theta_e$	K (mm/h)	$\alpha$ (1/cm)	n	C.C. Seco		C.C. Húmedo	
					t	r	r	r
Marga	0.434	3.4	0.09	1.22	18	6	27	10
Arcilla	0.385	0.3	0.027	1.131	7	3	17	10

### 3.4 Generación de valores de escorrentía para el análisis de las variables que definen el modelo conceptual SCS (MC SCS)

Una vez definidos el modelo propuesto (MC SCS), el modelo de contraste (GA) y las variables a estudiar, se procede a la generación de valores de escorrentía para analizar el contraste entre ambos modelos. El primer paso

consiste en la obtención de los valores de precipitación a considerar para cada localización, los cuales se obtienen mediante simulación de Montecarlo con la parametrización de las funciones de distribución propias de cada una de ellas. A continuación, se lleva a cabo la distribución temporal de los valores anteriormente obtenidos mediante los dos hietogramas considerados. El siguiente paso consiste en la generación de los valores de contenido de humedad inicial en el suelo, en función de las texturas y respuesta del suelo condicionada por la localización. Nuevamente, dichos valores son obtenidos a través de simulación de Montecarlo mediante las funciones de distribución de la humedad antecedente descritas anteriormente. Como los valores obtenidos se corresponden con el grado de saturación del suelo, la transformación a contenido de humedad se realiza multiplicando dicho valor por  $S_{max}$ .

Después de establecer los valores de referencia de cada variable considerada, se procede a la generación de la escorrentía producida mediante el método de GA para cada una de las posibles combinaciones de las mismas, quedando los mismo conformados en una matriz tal y como se muestran en la figura 2. Esta matriz se encuentra formada por 16 submatrices, teniendo cada una de ellas distinta parametrización de las 4 variables consideradas.

		P1		P2	
		H1	H2	H1	H2
	DH1	(1)	(5)	(9)	(13)
T1	DH2	(2)	(6)	(10)	(14)
T2	DH1	(3)	(7)	(11)	(15)
	DH2	(4)	(8)	(12)	(16)

Figura 2. Distribución de la matriz y submatrices de combinaciones de variables para la generación de los valores de escorrentía

Para llevar a cabo la comparación del método del MC SCS con el fin de estimar los parámetros que lo definan respecto al método de GA, se utiliza como criterio de cotejo la suma del error cuadrático absoluto (SE) y relativo (RSE) para toda la matriz de combinaciones, obtener un modelo lo más aproximado teniendo en cuenta todas las variables influyentes.

$$SE = \sum_{i=1}^N (Q_{GA} - Q_{sim})_i^2, \quad RSE = \sum_{i=1}^N \frac{(Q_{GA} - Q_{sim})_i^2}{\bar{Q}_{GA}}$$

Donde SE (mm) es el error cuadrático absoluto, RSE (mm) el error cuadrático relativo,  $Q_{GA}$  (mm) la escorrentía generada por el método de GA,  $\bar{Q}_{GA}$  (mm) la escorrentía media generada por el método de GA,  $P_i$  (mm) la precipitación y  $N$  el número total de eventos de escorrentía efectiva (no nula).

En el planteamiento del método del MC SCS se considera como hipótesis que similares condiciones climáticas y del suelo deben estar vinculados a unos valores únicos de los parámetros  $S_{max}$  y  $\theta_{min}$ , conllevando esto la definición una combinación de valores diferentes para cada unas de las submatrices anteriores, e implicando la dependencia de cada uno de los parámetros respecto de las 4 variables consideradas para cada uno de ellos. Con el fin de estudiar la relevancia de cada una variables respecto a los valores de SE y RSE en cada una de las submatrices, se plantea un análisis de la varianza de cada uno de ellos.

En este análisis no se ha tenido en cuenta en el método del CN-SCS la variable del tipo de uso de suelo que hay en superficie, que pueden facilitar en mayor o menor medida la retención de agua sobre la superficie de la cuenca, variando la dificultad del flujo mediante escorrentía superficial y con ello el tiempo en el que hay disponible agua en superficie para que se produzca la infiltración.

## 4. Resultados

El estudio del grado de influencia de cada una de las variables influyentes se inicia con la obtención de la combinación de parámetros óptima de  $S_{\max}$  y  $\theta_{\min}$  para cada una de las 16 diferentes combinaciones de las 4 variables seleccionadas. Para ello, se lleva a cabo la representación de las funciones de optimización para el error absoluto y relativo de cada una de las submatrices, las cuales se corresponden con el valor alcanzado de SE (figura 3) y RSE con distintas combinaciones de los parámetros del modelo. A través de las mismas, se aprecia que todas las combinaciones presentan un valor óptimo, estando los valores más próximos de forma concéntrica a éste, lo que de manifiesto la estabilidad del modelo al corresponderse la combinación óptima con el punto mínimo absoluto.

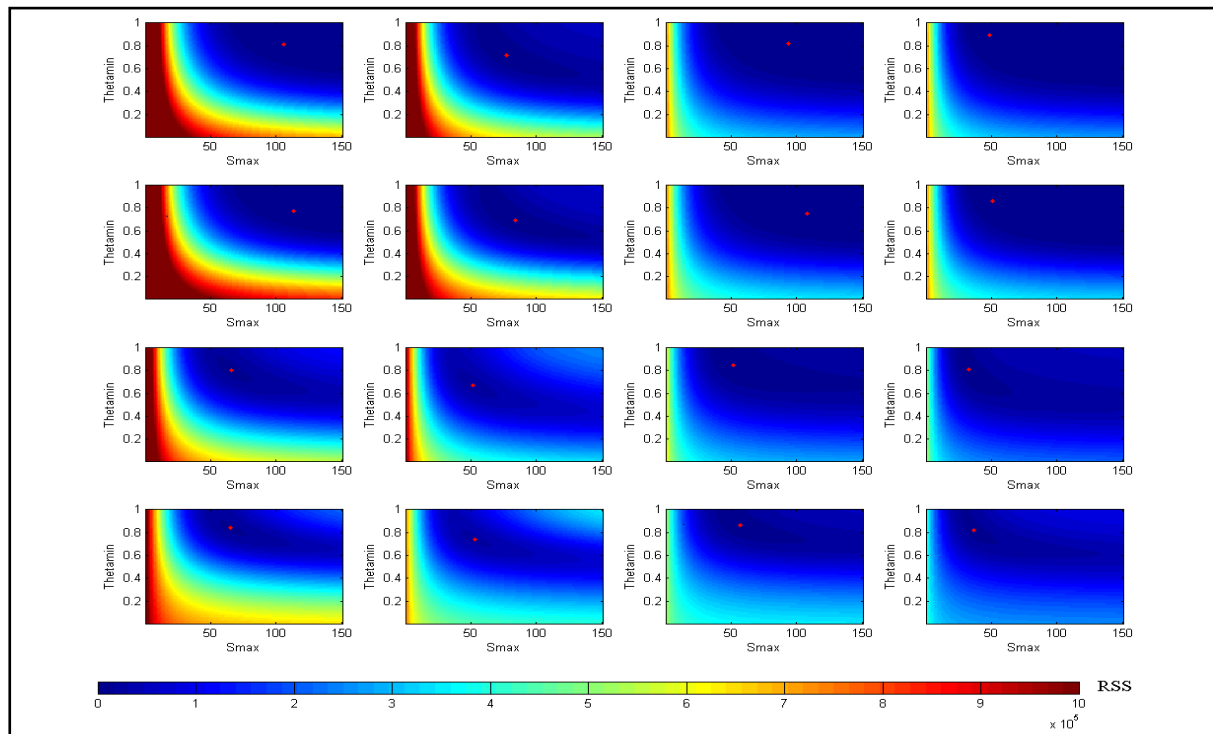


Figura 3. Representación de la función de optimización del Error Absoluto

Una vez fijada la parametrización óptima de cada uno de las combinaciones posibles, se caracteriza la importancia de cada variable mediante el estudio de la varianza producida por el error absoluto y el error relativo asociados a los valores óptimos (tabla 3), en cual se observa el valor del estadístico F y el nivel de significancia asociado a cada variable y combinación de variables. Los resultados del mismo se muestran en la tabla 4, en la que se aprecia que existen varias opciones con un nivel de representatividad bajo (inferior a  $p=0.05$ , valor asociado al nivel del significancia del 5%), lo cual indica que no se deberían de excluir en la modelización al aportar influencia en los valores finales. Dentro del grupo formado por estas variables representativas, no sólo se encuentra la textura, que es la variable considerada por el método del CN-SCS, sino también el volumen y la distribución de la intensidad de precipitación y las distintas combinaciones entre las mismas. Esto pone de manifiesto la incertidumbre que plantea el método del CN-SCS al no considerar más variables que la textura en la estimación del volumen a infiltrar.



Tabla 3. Valores del test de Fisher y del nivel de significancia observado en cada variable y para cada combinación de variables.

Variable	SE		RSE	
	F ratio	P valor	F ratio	P valor
A:Precipitación	22.19	0.005	0.03	0.872
B:Hietograma	2.76	0.157	6.11	0.056
C:Distr. Humedad	0.00	0.958	0.24	0.648
D:Textura	31.29	0.002	2.62	0.166
AB	1.46	0.281	3.38	0.125
AC	0.52	0.502	0.17	0.697
AD	3.41	0.124	0.78	0.416
BC	1.02	0.358	0.00	0.955
BD	2.46	0.178	4.05	0.100
CD	0.19	0.681	0.15	0.718

Por último, merece destacarse la diferencia existente en cuanto al orden del grado de influencia de las variables en función de si se considera el error absoluto o el error relativo, observada en la gráfica de representación del estadístico F (figura 4), evidenciándose que la textura muestra una menor influencia que algunas de las restantes variables consideradas al analizar el error relativo observado. Los resultados aportados por el error relativo presentan un grado de notoriedad mayor, ya que son afectados por el valor medio de escorrentía generada, por lo que ofrecen una mayor ponderación respecto a las variables consideradas.

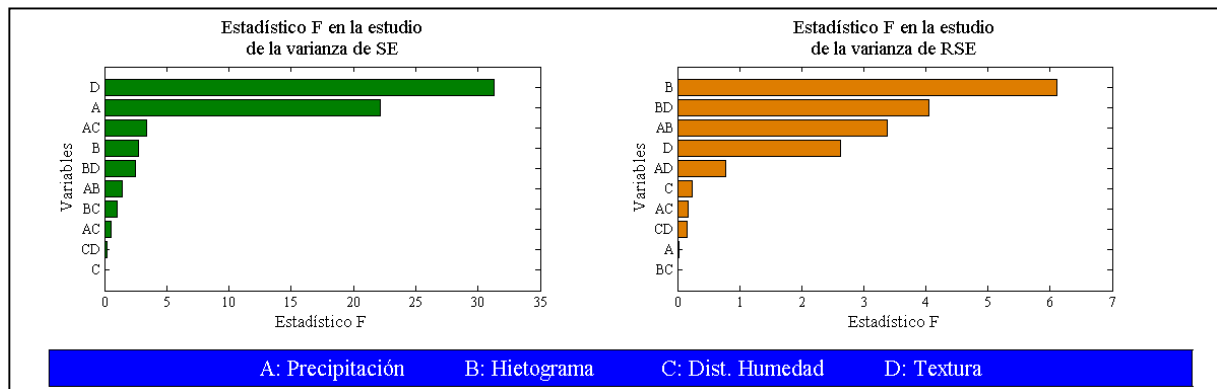


Figura 4. Estadístico F en el estudio de la varianza del error absoluto y relativo

## 5. Conclusiones

Se propone una adaptación del método del CN-SCS que tiene en cuenta las condiciones iniciales de humedad existentes al llevar a cabo una evaluación del contenido antecedente, lo cual conlleva a la consideración de la generación de escorrentía como un proceso de bivariado, dependiente no sólo del volumen de precipitación. Como se muestra anteriormente, los parámetros que determinan dicho modelo no se hallan influidos exclusivamente por la textura de la suelo, sino también por variables que dependen de las características climáticas, por lo que el no considerar la relevancia de las mismas en la producción de escorrentía ocasiona la falta de adaptación del método del CN-SCS a las particularidades climáticas predominantes. Esta influencia de la variabilidad climática se muestra destacable tanto cualitativa como cuantitativamente, incrementándose las diferencias respecto a la textura al considerar en cada caso el volumen medio de escorrentía producido por las mismas. Los futuros avances se basarán en la selección de las variables representativas, en la comparación con otros métodos basados en el del CN-SCS, y la inclusión de las características de los distintos usos del suelo con el fin de completar la adaptación respecto del método original.

## 6. Bibliografía

- Ahuja, L. R. and D. Swartzendruber (1972). "An improved form of soil-water diffusivity function." Soil of Science Society of America **36**: 9-14.
- Brooks, R. H. and A. T. Corey (1966). "Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow." Journal of the Irrigation and Drainage Division **92**(2): 61-90.
- Cifres, E. (2003). Tesis Doctoral: Transposición Estocástica y Orográfica de Tormentas para la estimación de Caudales de Avenida con Alto Periodo de Recurrencia. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, et al. (1988). Applied Hydrology. New York, McGraw-Hill.
- Durbude, D. G., M. K. Jain, et al. (2011). "Long-term hydrologic simulation using SCS-CN-based improved soil moisture accounting procedure." Hydrological processes **25**(4): 561-579.
- Fredlund, D. G., X. Anqing, et al. (1994). "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." Canadian Geotechnical Journal **31**(4): 533-546.
- Geetha, K., S. K. Mishra, et al. (2007). "Modifications to SCS-CN method for long-term hydrologic simulation." Journal of Irrigation and Drainage Engineering **133**(5): 475-486.
- Hawkins, R. H., J. A. Van Mullem, et al. (2009 ). Curve Number Hydrology: State of the Practice Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers.
- Martinez, V. (1999). Tesis Doctoral: Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en cuencas pequeñas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG. Madrid, Departamento de construcción y vías rurales. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Merz, R., G. Blöschl, et al. (2006). "Spatio-temporal variability of event runoff coefficients." Journal of Hydrology **331**(3-4): 591-604.
- Michel, C., V. Andréassian, et al. (2005). "Soil Conservation Service Curve Number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?" Water Resources Research **41**(2): 1-6.
- Mohr, K. I., J. S. Famiglietti, et al. (2000). "Modeling soil moisture and surface flux variability with an untuned land surface scheme: A case study from the southern great plains 1997 hydrology experiment." Journal of Hydrometeorology **1**(2): 154-169.
- Ponce, V. M. and R. H. Hawkins (1996). "Runoff curve number: Has it reached maturity?" Journal of Hydrologic Engineering **1**(1): 11-18.
- Rallison, R. E. (1980). "Origin and evolution of the SCS runoff equation." IN: SYMP. ON WATERSHED MANAGEMENT 1980, (BOISE, U.S.A.: JUL. 21-23, 1980) 2 , New York, U.S.A., Am. Soc. Civ. Engrs., 1980, Session E2, p.912-924.: ISBN 0-87262-87250-87269/-.
- Rawls, W. J., B. D.L., et al. (1982). "Estimation of soil water properties." Trans. Amer. Soc. of Agric. Engin **25**(5): 1316-1328.
- Sahu R K, S. K. M., T. I. Eldho and M. K. Jain (2007). "An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method." Hydrological Processes **21**: 2872-2881.
- Sahu, R. K., S. K. Mishra, et al. (2007). "An advanced soil moisture accounting procedure for SCS curve number method." HYDROLOGICAL PROCESSES **21**(21): 2872-2881.
- SCS (1972). Hydrology, section 4.. National Engineering Handbook. Washington, DC, Engineering Division. US. Department of Agriculture.
- Shaw, S. B. and M. T. Walter (2009). "Improving runoff risk estimates: Formulating runoff as a bivariate process using the scs curve number method." Water Resources Research **45**(3).
- USDA-SCS (1986). Technial Release 55. Urban hydrology for small watersheds. Washington, DC, Engineering Division. US. Department of Agriculture.
- Valdés, J. B., M. Díaz-Granados, et al. (1990). "A derived PDF for the initial soil moisture in a catchment." Journal of Hydrology **113**(1-4): 163-176.
- Vanderlinden, K. (2001). Análisis de procesos hidrológicos a diferentes escalas espacio-temporales. Departamento de Agronomía Córdoba, Universidad de Córdoba. **Tesis Doctoral**: 303.
- Varallyay, G. and E. V. Mironenko (1979). Soil – Water Relationships in Saline and Alkali Conditions. Modelling of Salinization and Alkalization. Agrokemia es Talatjan. V. A. K. a. I. Szaboles. USA. **28**: 33-82.
- Wilcox, B. P., W. J. Rawls, et al. (1990). "Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models." Water Resources Research **26**(10): 2401-2410.
- Woodward, D. E. and A. Plummer (2004). Antecedent moisture conditions nrcs view point, Fort Collins, CO.
- Yue, S. and P. Rasmussen (2002). "Bivariate frequency analysis: Discussion of some useful concepts in hydrological application." Hydrological processes **16**(14): 2881-2898.