

# Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial

Recepción: 2013 - 01 - 30 | Aceptación: 2013 - 03 - 23

## Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo.

Caro, C., Carlos, A., & Castellet, I., Ernest, B. (2013). Correlación de parámetros geotécnicos con parámetros de un modelo hidrológico superficial. *Ingenio Magno*. Vol 4, pp. 76-86.

**Resumen** — Este artículo presenta la relación entre parámetros geotécnicos básicos y parámetros del modelo hidrológico de Thomas para balance hídrico de cuencas hidrográficas rurales. Esta relación funciona como una aplicación metodológica de calibración, herramienta útil en modelos distribuidos como es el caso de IBER, que representa un sistema distribuido de simulación numérica para flujo no permanente en lámina libre. Se realizó una exploración en 25 puntos (en 15 subcuencas) de la cuenca de Río de Piedras (Boyacá), obteniendo muestras de suelo a las cuales se les realizó caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio.

**Palabras Clave** — Calibración hidrológica, caracterización geotécnica, correlación hidrogeológica.

## Carlos Andrés Caro Camargo

Magister en Ingeniería Civil, Candidato a Doctor en Ingeniería Civil, Instituto Flumen, Dept. d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental E.T.S. d'Enginyers de Camins Canal i Ports de Barcelona UPC - Campus Nord. c/Jordi Girona 1-3 Edifici D1 - 2a planta 08034 Barcelona.  
Decano Facultad de Ingeniería Civil-Universidad Santo Tomás Tunja, Colombia.  
carlosandrescaro@gmail.com

## Ernest Bladé i Castellet

Doctor en Ingeniería Civil, Instituto Flumen, Dept. d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental E.T.S. d'Enginyers de Camins Canal i Ports de Barcelona, UPC - Campus Nord, c/Jordi Girona 1-3 Edifici D1 - 2a planta 08034 Barcelona.  
ernest.blade@upc.edu

## Néstor Iván Rojas Gamba

Candidato a Magister en Geotecnia Facultad de Ingeniería Civil, Profesor U. Santo Tomás Tunja, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia, estudiante de maestría, UPTC, Tunja, Colombia.  
nrojas@ustatunja.edu.co

**Abstract** — This paper presents the relationship between basic geotechnical parameters and parameters of the hydrological model by Thomas for the water balance in rural watersheds. This relation works as a methodological calibration application, a useful tool in distributed models like IBER, which represents a distributed system of numerical simulation for the unsteady flow in a free surface. An exploration was performed in 25 points in 15 sub-basins of the Río Piedras watershed in Boyacá, in which soil samples were obtained for the geotechnical characterization in the laboratory.

**Keywords** — Geotechnical characterization, Hydrogeological correlation, hydrologic calibration.

## 1. INTRODUCCIÓN

El modelo de Thomas presenta una caracterización física de la zona de aportación a través de sólo 4 parámetros (a, b, c, d). Lograr una relación entre parámetros medibles geotécnicos y estos 4 parámetros hidrológicos ayuda a determinar valores de caudal subsuperficial, subterráneo y superficial de manera más ágil (Caro, C., 2012). Se pretende de esta manera, llegar a algunas soluciones en cuanto a límites iniciales de los parámetros del modelo de Thomas teniendo como base caracterización geotécnica.

En modelos hidrogeológicos de cuencas rurales, la calibración es una parte importante en el proceso de caracterización de la zona de estudio. Este paso puede requerir de un costo computacional y temporal importante, especialmente si los valores o parámetros iniciales antes de comenzar la calibración son ajenos a la realidad geotécnica. Una mejor aproximación en estos valores iniciales significa optimización de estos procesos a través de un estudio geotécnico de los materiales de la zona, donde se logra un acercamiento importante en cuanto al rango de inicio en la variación de parámetros para la calibración.

## 2. MARCO TEÓRICO

Recientemente se ha observado que en el estudio de cuencas hídricas, los modelos bidimensionales representan las condiciones de una forma más cercana a la realidad que los modelos unidimensionales (Bladé, 2009), especialmente cuando además de un estudio hidrológico de determinación de caudales, se realiza un estudio hidráulico de caracterización del flujo (Bladé, E, Et Al, 2014). En estos procesos de modelización se estudian fenómenos como la escorrentía, evapotranspiración, infiltración y recarga, todos ellos directamente relacionados con las características del suelo, sin embargo no es común encontrar modelos agregados que incluyan caracterización geotécnica de los materiales, por lo que se deben asumir valores iniciales de parámetros relacionados con el suelo y determinarlos a través de calibración, y en menor grado modelos agregados aplicados a modelos distribuidos como el caso de IBER. En cuanto al submodelo hidrológico, el transporte superficial se maneja mediante la aplicación de las ecuaciones completas de Saint Venant 2D en un esquema de volúmenes finitos, evaluando celda a celda el caudal después de descontar las pérdidas dadas por los parámetros calibrados.

En primera instancia se realizó una caracterización geotécnica básica, para posterior determinación de parámetros de entrada al modelo de Thomas, más precisos en función de características geotécnicas de los suelos, lo cual no solamente aplicaría en cuencas con presencia de formaciones geológicas similares a la del caso estudio, sino que se podrían establecer expresiones de correlación (Coeficiente de Correlación estadística R2 debido a la importancia de las magnitudes y no de las tendencias) entre algunos parámetros geotécnicos comunes y fáciles de establecer, con los parámetros a, b, c, d, del modelo hidrológico.

El modelo de Thomas Es un modelo no lineal de cuenca que acepta la precipitación y la evapotranspiración como entradas. Internamente el modelo representa el almacenamiento del suelo, el almacenamiento subterráneo, la escorrentía, el flujo subterráneo y la evapotranspiración real. Es el modelo más recomendado (W, Fernández, et al, 2009) de cuenca a nivel mensual en comparación con otros modelos de cuenca, referenciado por Alley (1984, 1985). En este caso, este modelo se une al modelo hidrodinámico IBER, a través de una adaptación por medio de modelización basada en esquemas de volúmenes finitos, sin embargo la significancia física de sus parámetros se hace realmente relevante a través del tipo de calibración que se genere en el modelo.

El modelo de Thomas define dos Variables de estado. Wt, que indica el agua disponible. Y Yt que indica la oportunidad de evapotranspiración.

Éstas parten de la ecuación básica de continuidad a un volumen de control.

$$P_t - E_t - I_t - R_{ot} = S_t - S_{(t-1)} \quad (1)$$

$$I_t = R_{gt} \quad (2)$$

Reagrupando lo anterior:

$$(P_t + S_{(t-1)}) - (E_t + S_t) = R_{ot} + I_t \quad (3)$$

$$I_t = R_{gt} \quad (4)$$

El agua disponible es definida como

$$W_t = P_t + S_{(t-1)} \quad (5)$$

Donde Pt representa la precipitación durante el periodo t. Además St-1 es el contenido de humedad en el inicio del periodo t.

La oportunidad de evapotranspiración, eventualmente será evapotranspiración, y es definida como:

$$Y_t = E_t + S_t \quad (6)$$

Donde Et representa la evapotranspiración actual durante el periodo t y St representa la humedad del suelo al final del periodo t.

La oportunidad de evapotranspiración se postula como una como una función no lineal del agua disponible (wt):

$$Y_t(w)t = \frac{Wt + "b"}{2 \cdot "a"} - \sqrt{\frac{(Wt + "b")^2}{2 \cdot "a"} - \frac{Wt \cdot "b"}{"a"}} \quad (7)$$

Esta función asegura que  $Y_t \leq W_t$ . El límite superior de Wt es b. Aparte de esto, la función Y(W) no tiene otra significancia. La localización del agua disponible Yt entre Et y St se logra al asumir que la tasa de pérdida de la humedad del suelo debida a evapotranspiración es proporcional a la cantidad de humedad en el suelo mismo. De esta forma se tiene:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-ETP.S}{"b"} \quad (8)$$

Donde ETP es la evapotranspiración Potencial

Resolviendo la ecuación diferencial y asumiendo  $S_t - 1 = Y_t$  :

$$S_t = Y_t \cdot e^{-\frac{ETP_t}{"b"}} \quad (9)$$

La diferencia entre el agua disponible y la oportunidad de evapotranspiración es también la suma de la recarga subterránea y la escorrentía superficial ( $W_t - Y_t = R_o + I_t$ ). El parámetro "c" determina la cantidad ( $W_t - Y_t$ ) entre la recarga subterránea c.( $W_t - Y_t$ ) y la escorrentía directa  $(1 - c) \cdot (W_t - Y_t)$ .

$$I_t = c \cdot (W_t - Y_t) \quad (10)$$

$$R_o = (1 - "c") \cdot (W_t - Y_t) \quad (11)$$

Finalmente la parte destinada a flujo subterráneo es  $d \cdot G_t$ , donde d es el cuarto parámetro del modelo y  $G_t$  es el almacenamiento subterráneo al final del periodo t.  $G_t$  es modelado usando la ecuación de continuidad.  $G_t$  al final del periodo t es igual al almacenamiento subterráneo anterior  $G_{t-1}$  más la recarga actual, y menos el flujo subterráneo.

$$G_t = G_{(t-1)} + c \cdot (W_t - Y_t) - "d" \cdot G_t \quad (12)$$

Si se empleara este modelo, como se ha hecho hasta el momento a nivel de modelo agregado de cuenca, para evaluar el caudal total que llega al río, se debería tener en cuenta:

$$Q_t = (1 - "c") \cdot (W_t - Y_t) + d \cdot G_t \quad (13)$$

El modelo tiene cuatro parámetros con significancia física. El parámetro a ( $0 < a < 1$ ) refleja la tendencia de la escorrentía a producirse antes de que el suelo esté totalmente saturado (R.M. Vogel, et al, 2009). Alley en 1984 comenta que este parámetro se encuentra en el rango de 0.95 y 0.99 en amplias regiones de los Estados Unidos. La escorrentía se espera que decrezca con el aumento de la permeabilidad, por lo tanto el parámetro "a" se modela realizando un modelo de regresión lineal:  $\alpha - \beta \cdot \rho$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de regresión regional y  $\rho$  es la permeabilidad.

El parámetro "b" es el límite superior de la suma de la evapotranspiración real  $E_t$  y el almacenamiento de humedad en el suelo. Presumiblemente este parámetro depende de la habilidad de la cuenca de mantener agua en el horizonte o layer superior del volumen de control. Se modela mediante la relación física:  $\alpha + \beta \cdot \rho$

El parámetro "c" es igual a la fracción de flujo que surge de la descarga subterránea, y se mantiene de la siguiente manera  $c = \alpha + \beta \cdot BFI$ , donde BFI es el flujo base, que puede estimarse de diferentes maneras teóricas. El parámetro d indica la fracción del almacenamiento subterráneo que se incluye como flujo base. Puede aproximarse como  $d = \alpha - \beta$ .

$\ln(k)$ . Donde k indica la constante de recesión del flujo base (Vogel, 1996).

Lograr acercarnos a la calibración más conveniente del modelo hidrológico nos ayuda a evaluar caudales hidrológicos de manera más precisa, y para ello acercarnos a rangos de variación más exactos de cada parámetro significó en este estudio unir la geotecnia y sus parámetros representativos a la hidrología superficial a través del modelo de Thomas (Rojas, N, 2013), (Caro, et al, 2014).

Los parámetros geotécnicos analizados para comparación con los parámetros del modelo teórico fueron: N (porosidad), S (saturación), W (humedad), Gs (gravedad específica), E (relación de vacíos), y seco (peso unitario seco) (gr/cm<sup>3</sup>), y (peso unitario en estado natural) (gr/cm<sup>3</sup>), y sat (peso unitario saturado) (gr/cm<sup>3</sup>), Ll (límite líquido), Lp (límite plástico), Ip (índice de plasticidad), Ic (índice de consistencia), Il (índice de liquidez), k insitu (permeabilidad insitu) (m/s), k lab (permeabilidad de laboratorio) (m/s)

### 3. METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

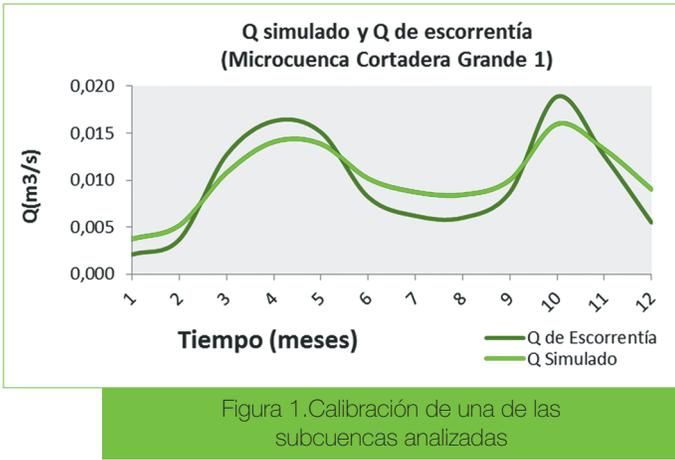
Para una adecuada comparación de los parámetros descritos del modelo Teórico anteriormente y los parámetros geotécnicos se realizó una búsqueda de información cartográfica y descriptiva de la zona de estudio y de su entorno regional (Boyacá, Colombia, Río de Piedras), con el fin de obtener la información necesaria para el diseño de la exploración geotécnica. La base fundamental provino del POMCA de la cuenca del río Chicamocha (CORPOBOYACÁ) y de los planes de ordenamiento territorial de los municipios de Cómbita, Sotaquirá y Tuta.

La información cartográfica obtenida se consolidó en una base de datos geográfica, en la cual se unificó la georreferenciación de las diferentes capas vectoriales y se generaron otras capas a partir de la información obtenida, cada capa cuenta con atributos o información descriptiva asociada a la información geográfica.

Se diseñó la exploración geotécnica de tal forma que las muestras de suelo fueran representativas de la formación geológica, aunque el estudio se enfocó en el nivel superior del perfil estratigráfico, así mismo se tuvo en cuenta el patrón de drenaje con el fin de abarcar las 15 microcuencas que hacen parte de la subcuenca de Río de Piedras. La exploración consideró 25 puntos con profundidades de hasta 6 m, recuperación de muestras alteradas e inalteradas y pruebas de permeabilidad in situ por el método de las curvas de infiltración.

La obtención de muestras y ensayos de laboratorio se llevaron a cabo por el método de exploración directa, mediante apiques con barreno helicoidal y posteadora, se recuperó material alterado para humedad, límites, permeabilidad en laboratorio y gravedad específica; y material inalterado de los tubos Shelby y cuchara partida para diagramas de fase. Los parámetros geotécnicos se analizaron espacialmente dividiendo la zona de estudio en 15 microcuencas, al final de las cuales se calculó el caudal de escorrentía con método de número de curva.

Para cada cuenca, se graficaron los caudales de escorrentía (métodos SCS) y los simulados (Thomas), obteniendo una calibración importante, teniendo como función objetivo el coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, que para el caso específico de la microcuenca –cortadera Grande1 fue de 0.92.

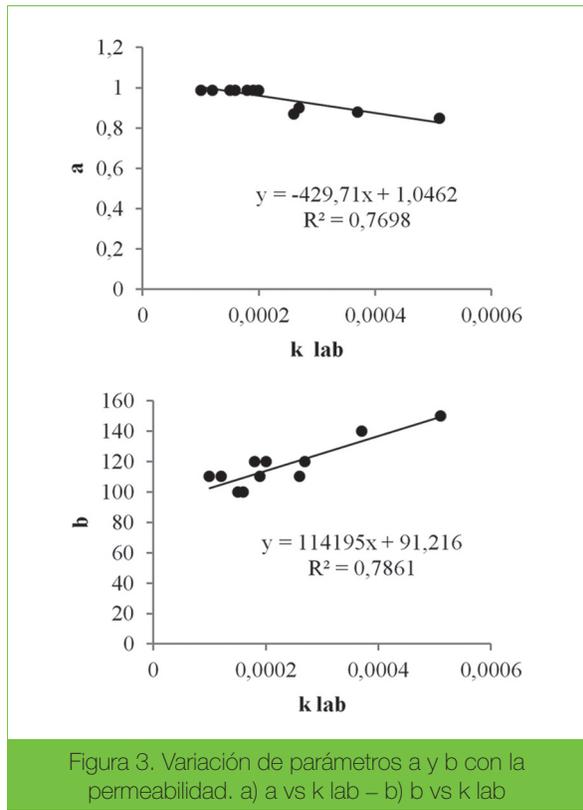
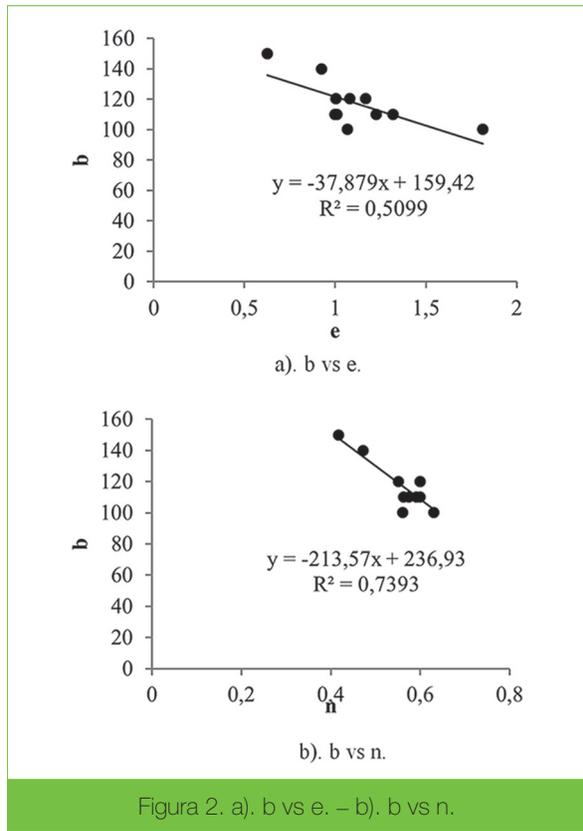


De igual manera se lograron correlaciones importantes en el resto de las 15 microcuencas. El fin de lograr buenas calibraciones obedeció a la necesidad de encontrar los parámetros del modelo de Thomas, óptimos, de tal manera que los pudiéramos comparar posteriormente con los parámetros geotécnicos medidos.

#### 4. CONCLUSIÓN Y COMPARACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS

En 23 de 25 puntos explorados, la relación de vacíos (e) obtuvo valores de 0,24 hasta 1,8 lo cual se puede considerar relativamente baja y típica de materiales arcillosos o de arenas compactas con finos para los valores más bajos (Juárez, E, et al, 2005) ; sin embargo, en dos puntos se encontraron valores altos de relación de vacíos por encima de dos y hasta 3,3 con presencia de material orgánico muy compresible. Lo anterior dio como consecuencia un buen índice de infiltración que permite garantizar flujo subsuperficial y subterráneo y con ello valores no nulos en los parámetros del modelo hidrológico empleado. La porosidad (n) arrojó valores entre 20% y 77%, lo que corresponde a valores típicos. Las anteriores relaciones de fase pueden indicar una tendencia a permeabilidades importantes pero no elevadas en la mayoría de puntos. La saturación (S) y la humedad (ω), son valores cambiantes en un suelo que dependen de las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesto, especialmente la lluvia, para la zona de estudio fueron encontrados valores de S desde 20% hasta 99% con suelos saturados y niveles freáticos muy cercanos a la superficie, algo similar se encontró para la humedad con valores desde 3% hasta 85%.

Se determinó que el parámetro b de Thomas presenta una de las mayores correlaciones con respecto a la relación de vacíos y a la porosidad del suelo. En las figuras 2a) y 2b) se observa la relación entre los parámetros y la expresión de correlación.



También se aprecia que al aumentar la permeabilidad del suelo, se incrementa el parámetro b de Thomas, ya que un suelo permeable aumentaría la cantidad de agua presente en el mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bladé. Ernest, L. Ceab, Coresteina. G, E. Escolanoc, J. Puertasb, Vázquez-Cendónd E., J. Dolzay A. Coll. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería.
2. Rojas, Néstor, (2014). Tesis de Maestría "Caracterización geotécnica de una cuenca para correlación con parámetros del modelo hidrológico de Thomas".
3. Caro, Carlos, Bladé, Ernest, Rojas, Néstor. (2014). "Caracterización Física de una Cuenca para correlación con parámetros del Método Hidrológico de Thomas y su Aplicación en el Modelo Hidrodinámico Iber", Resumen en Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
4. Caro, Carlos, (2012). Modelo de transferencia vertical dentro de un modelo hidrológico continuo en un esquema de volúmenes finitos, Revista Lespirit Ingenieur, 03, ISSN: 2145 9214, pág 145.
5. Bladé. Ernest, Sánchez. M, Sánchez. H, Niñerola. D, Gómez. M. (2009). Modelación Numérica en ríos en Régimen permanente y variable, Edicions UPC.
6. Fernandez, W.; Vogel, R.M. y Sankarasubramanian. (2009). A. Regional calibration of a watershed model. En: Hydrological Sciences Journal. Diciembre, p. 689-707.
7. Aiassa, Gonzalo. (2008). Caracterización de procesos de infiltración en estado no saturado sobre suelos limosos compactados. Tesis. Doctor en ciencias de la ingeniería. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, p. 399.
8. Juárez, Eulalio y Rico, Alfonso. (2005). Mecánica de suelos, Fundamentos de la mecánica de suelos. México, D.F., Tomo 1. 629 p. ISBN 968-18-0069-9.
9. Robredo, José. (2000). Cálculo de caudales de avenida. Madrid, p. 55.
10. Alley W. M. (1984). On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. Water Resources Research, 20 (8), 1137-1149.