

Caracterización geotécnica de una cuenca para correlación con parámetros del modelo hidrogeológico de Thomas

Geotechnical characterization of a watershed for correlation with Thomas hydrogeological model parameters

Néstor Iván Rojas Gamba *
Omar Javier Jiménez Jiménez**
Carlos Andrés Caro Camargo***

Resumen

Se realiza la caracterización geotécnica básica de materiales de una cuenca, determinando sus propiedades índice y de permeabilidad in situ y en laboratorio, a partir de la recuperación de muestras de suelo producto de un diseño de exploración, éstas se ensayaron y analizaron, lo que permitió establecer una correlación entre parámetros hidrológicos, establecidos por calibración, y geotécnicos del suelo. El estudio se enfoca en los parámetros del modelo hidrológico que tienen mayor relación con el tipo de suelo y cuya acción no se desarrolla a profundidades considerables, de acuerdo a la metodología y alcance del proyecto. Se toma como caso estudio la subcuenca de Río de Piedras, localizada en los municipios de Cóbbita, Sotaquirá y Tuta en la parte central del departamento de Boyacá, la cual hace parte de la cuenca del Chicamocha

Palabras clave: caracterización geotécnica, modelación, exploración, ensayos, correlación.

Abstract

Geotechnical characterization is made basic materials in a basin, determining index properties and permeability in situ and laboratory recovery from soil samples product design exploration, they were tested and analyzed, allowing establish a correlation between hydrological parameters established by calibration, and geotechnical soil. The study focuses on hydrological model parameters most related to soil type and whose action unfolds considerable depths, according to the methodology and scope of the project. It takes as a case study subbasin Río Piedras, located in the municipalities of Cóbbita, Sotaquirá and Tuta in the central part of the Department of Boyacá, which is part Chicamocha Basin.

Keywords: geotechnical characterization, modeling, exploration, testing, correlation.

* IC, MsC. (c), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, estudiante de maestría, nestorirojasg@gmail.com

** IC, Esp., MsC., Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, docente, omarjjj@gmail.com

*** IC, Ph.D (c), Universidad Santo Tomas Tunja, decano facultad de Ingeniería Civil, deccivil@ustatunja.edu.co

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo busca observar la relación entre parámetros geotécnicos básicos y parámetros del modelo hidrogeológico de *Thomas* para balance hídrico de cuencas hidrográficas rurales. Se realizó una exploración en 25 puntos de la cuenca de Río de Piedras (Boy.) obteniendo muestras de suelo, a las cuales se les realizó caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio.

Los datos de caracterización obtenidos se procesaron espacialmente con el fin de obtener un comportamiento de las características geotécnicas en las 15 microcuencas que conforman la zona de estudio. Posteriormente se calibraron datos de caudal, precipitación y evapotranspiración; para establecer valores de parámetros hidrológicos en las 15 microcuencas; los datos obtenidos se tabularon en una hoja de cálculo y se realizaron gráficas que relacionan datos geotécnicos con hidrológicos.

Algunos modelos hidrológicos tienen en cuenta características del suelo, sin embargo, lo hacen de forma poco detallada, se pretende mostrar la relación entre características geotécnicas y los parámetros del modelo hidrogeológico de *Thomas*.

La caracterización geotécnica de suelos representa una valiosa información de las propiedades que éstos tienen frente a condiciones como la variación de la humedad ante fenómenos hidrológicos, los vacíos en el suelo o la facilidad con que el agua los atraviesa, todos estos fenómenos tienen que ver con el balance hídrico en una cuenca, por lo que el estudio de los suelos y su relación con parámetros hidrológicos es importante en procesos de aplicación de caracterización geotécnica.

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 [1]. En estos procesos de modelamiento 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.

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 iniciar 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.

En Colombia se presentan problemas asociados a fenómenos geo ambientales, los cuales eventualmente afectan directamente el desarrollo de regiones vulnerables a éstos fenómenos. Al realizar una caracterización geotécnica de materiales representativos en una cuenca, se puede conocer más detalladamente las condiciones de los suelos a través de parámetros geotécnicos básicos y fáciles de establecer, para poder tenerlos en cuenta dentro del balance hídrico y generar así un nuevo conocimiento que relacione las características del suelo de una cuenca rural con la variación del agua dentro de la misma.

El proyecto es una integración de la geotecnia y la hidrología como aporte para el estudio de zonas donde se presenta flujo de agua en suelos, lo que puede brindar un mejor criterio en la generación de medidas de protección y recomendaciones para prevenir o mitigar problemas asociados a estabilidad de suelos y variación en los niveles de agua.

Para la realización del proyecto se definen básicamente dos tipos de parámetros:

- De caracterización geotécnica.
 - Propiedades básicas e índice (límites, relaciones de fase: relación de vacíos, porosidad, saturación, humedad, peso unitario, gravedad específica).
 - Hidráulicas (permeabilidad).
- Hidrogeológicos del modelo *Thomas* (Parámetros a, b, c, d, St y Gt).

La realización del proyecto podría ser una aplicación de caracterización geotécnica básica, en la modelación de cuencas hídricas por el método *Thomas*, ya que se tendrían parámetros de entrada 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 entre algunos parámetros geotécnicos comunes y fáciles de establecer, con los parámetros a, b, c, d, St y Gt del modelo hidrogeológico, de esta manera sería posible aplicar las expresiones a la modelación de otras cuencas conociendo los parámetros geotécnicos.

Lo anterior representaría un aporte importante en la investigación de temas relacionados con caracterización de suelos aplicada al estudio de cuencas hidrográficas, en Colombia este es un tema que representa gran importancia si se tiene en cuenta las características fisiográficas, los materiales presentes, la tectónica y en general las consecuencias que generan las severas condiciones ambientales, como por ejemplo las inundaciones producidas por lluvias. Lograr establecer el comportamiento del agua en una cuenca, ofrece directamente información acerca de tratamientos que se pueden realizar a la zona de aportación para regular el comportamiento ante fenómenos como eventos torrenciales fuertes.

II. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

El proyecto se estructura en 5 etapas:

A. *Recopilación de información*

Se realizó una búsqueda de información cartográfica y descriptiva de la zona de estudio y de su entorno regional, 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.

B. *Diseño de la exploración*

Con la información contenida en la base de datos 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.

C. *Obtención de muestras y ensayos de laboratorio*

Se realizó 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.

En la tabla 1 se muestran todos los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para los 25 puntos de exploración, estos hacen parte de los atributos que tiene cada sitio de exploración representado por un punto.

Para una fácil identificación del punto, se le adjudicó un número y el nombre del propietario o del lugar donde se realizó, así mismo se señala el grupo de estudiantes que colaboró en cada uno y si se realizó o no prueba de permeabilidad en el sitio; en siete de los 25 puntos no fue posible realizar el ensayo debido a la imposibilidad de contar con agua para llenar las perforaciones.

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 [2]; 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. 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 bajas 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%. En el

peso específico del suelo (γ) se observaron valores entre 0,94 gr/cm³ y 2,27 gr/cm³ los valores más bajos son típicos de material orgánico y arcillas blandas, en general y teniendo en cuenta los

valores de peso específico seco (γ_d) y saturado (γ_{sat}) se observa que corresponden a materiales arcillosos de consistencia blanda a dura.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de laboratorio

Punto	Propietario	Realizó	k in situ	Fecha	n (%)	S (%)	ω (%)	Gs
01	CARLOS VARGAS	UPTC-VIAS	SI	01/03/2013	52	29	12	2,65
02	CAMPO ELIAS SALAS	UPTC-CIVIL	SI	02/03/2013	56	95	31	2,90
03	HUGO SALAS (1)	NESTOR	NO	02/03/2013	46	92	21	2,64
04	HUGO SALAS (2)	NESTOR	NO	02/03/2013	20	45	3	2,53
05	CARLOS NEIRA	UPTC-CIVIL	SI	04/03/2013	33	98	9	2,80
06	VICTOR SANDOVAL	UPTC-CIVIL	NO	05/03/2013	44	90	30	2,66
07	SANTOS BARON (1)	UPTC-VIAS	SI	08/03/2013	50	51	19	2,70
08	GLADYS HERNANDEZ	UPTC	SI	09/03/2013	68	36	30	2,60
09	JOSE GERARDINO GONZALEZ	UPTC	SI	09/03/2013	77	43	53	2,66
10	SANTOS BARON (2)	TESISTAS USTA	SI	09/03/2013	57	46	85	2,70
11	JUAN MORA	TESISTAS UPTC	SI	09/03/2013	56	71	31	2,90
12	JOSE AVELINO RIAÑO (1)	TESISTAS USTA	SI	09/03/2013	45	20	25	2,60
13	FLA. HERNANDEZ RIAÑO	TESISTAS USTA	NO	09/03/2013	60	58	32	2,30
14	ECEHOMO RUIZ	UPTC-CIVIL	SI	16/03/2013	45	85	26	2,73
15	JOSE AVELINO RIAÑO (2)	TESISTAS UPTC	NO	16/03/2013	65	99	64	2,90
16	EVILACIO BENITEZ (1)	TESISTAS UPTC	SI	16/03/2013	45	85	26	2,73
17	EL ROSAL	TESISTAS UPTC	SI	16/03/2013	45	85	26	1,80
18	HECTOR OTALORA	TESISTAS UPTC	SI	16/03/2013	57	77	36	2,90
19	SEGUNDO LOPEZ	TESISTAS USTA	SI	17/03/2013	60	70	40	2,60
20	PERFIL ROCA "HOSPITAL"	TESISTAS USTA	NO	17/03/2013	27	49	7	2,61
21	EVILACIO BENITEZ 2	TESISTAS USTA	SI	17/03/2013	64	89	73	2,40
22	JULIO HIGUERA	TESISTAS USTA	SI	17/03/2013	33	97	19	2,57
23	HOGAR BUENA VISTA	TESISTAS USTA	NO	17/03/2013	46	86	43	2,60
24	HOGAR (ESCUELA EL CEDRO)	TESISTAS USTA	SI	17/03/2013	54	48	22	2,57
25	FORMACION RUSIA	NESTOR	SI	23/03/2013	41	92	25	2,60

Tabla 1 (continuación). Resultados de los ensayos de laboratorio

Punto	e	γ seco (gr/cm ³)	γ (gr/cm ³)	γ sat (gr/cm ³)	LI (%)	Lp (%)	lp (%)	lc	ll	k insitu (m/s)	k lab (m/s)
01	1,09	1,27	1,42	1,79	47	28	19	1,84	-0,84	2,5E-02	8,5E-04
02	1,29	1,29	1,82	1,85	44	31	13	1,00	0,00	2,4E-02	8,0E-04
03	0,87	1,41	1,84	1,88	38	28	10	1,65	-0,65	-	4,9E-06
04	0,14	2,21	2,27	2,34	-	-	-	-	-	-	3,5E-06
05	0,50	1,80	2,10	2,10	45	22	23	1,57	-0,57	1,1E-01	1,4E-03
06	0,80	1,47	1,80	1,90	33	24	9	0,33	0,67	-	1,7E-08
07	0,99	1,36	1,61	1,86	53	48	5	6,80	-5,80	2,0E-05	2,2E-05
08	2,17	0,82	1,06	1,50	24	11	13	-0,46	1,46	3,5E-04	2,7E-04
09	3,31	0,62	0,94	1,39	86	64	22	1,50	-0,50	3,0E-04	2,0E-04
10	1,31	1,17	1,43	1,74	51	34	17	-2,00	3,00	1,0E-05	2,0E-06
11	1,26	1,28	1,68	1,84	49	34	15	1,20	-0,20	6,0E-05	3,0E-05
12	0,83	1,42	1,51	1,87	26	20	6	0,17	0,83	3,0E-04	2,0E-04
13	1,50	0,92	1,27	1,52	42	34	8	1,25	-0,25	-	9,5E-06
14	0,83	1,48	1,85	1,93	55	34	21	1,38	-0,38	2,0E-05	2,2E-05
15	1,87	1,01	1,65	1,66	73	50	23	0,39	0,61	-	1,6E-06
16	0,83	1,48	1,86	1,92	30	26	4	1,00	0,00	1,0E-05	2,0E-06
17	0,83	1,48	1,86	1,93	54	34	20	1,40	-0,40	2,0E-05	2,3E-05
18	1,35	1,24	1,68	1,81	48	37	11	1,09	-0,09	6,0E-05	3,1E-05
19	1,47	1,05	1,47	1,65	49	39	10	0,90	0,10	2,5E-02	8,7E-04
20	0,37	1,90	2,04	2,17	25	19	6	3,02	-2,02	-	7,6E-07
21	1,76	0,76	2,00	2,30	69	60	9	-0,44	1,44	7,3E-05	4,0E-05
22	0,50	1,71	2,04	2,05	33	25	8	1,75	-0,75	6,7E-03	6,0E-04
23	0,84	1,41	1,80	1,87	45	41	4	0,50	0,50	-	7,7E-07
24	1,19	1,17	1,43	1,72	42	23	19	1,05	-0,05	2,4E-03	4,0E-04
25	0,70	1,51	1,89	1,92	60	49	11	3,18	-2,18	6,0E-06	1,0E-06

Fuente: el autor.

En cuanto a los resultados de plasticidad, el límite líquido (L), establecido por el ensayo de la cazuela de Casagrande, varió desde 24% hasta 86%, para la mayoría de los suelos es menor al 100%, sin embargo se pueden encontrar valores mucho más altos. El índice plasticidad (I_p) está entre 4% y 23%, se puede considerar bajo, con pocos problemas asociados a su uso [2]. El índice de consistencia (I_c) y el índice de liquidez (I_l), fueron calculados para la humedad natural del terreno, se observa que para el primero, la gran mayoría de valores se encuentran por encima de uno, con lo que se espera un comportamiento no plástico del suelo, algo similar ocurre para el índice de liquidez donde predominan los valores negativos lo que indica un rango de humedades del suelo que señalan un comportamiento como semisólido, sin embargo en ambos índices se apreciaron algunos valores que indicarían un comportamiento plástico e incluso como un fluido viscoso del suelo, donde las altas humedades causan esta consistencia del suelo, lo cual se apreció durante la exploración.

Para la gravedad específica, se obtuvieron valores desde 1,8 hasta 2,9 lo que indica la presencia de suelos orgánicos ($G_s < 2$) y de arenas y limos arcillosos ($2,67 < G_s < 2,90$).

La permeabilidad del suelo in situ (k in situ), se estableció por el método de la curva de infiltración[3], realizando pozos cuadrados de 40 cm de lado por 40 cm de profundidad aproximadamente (ver figura 1), los cuales se llenaron con agua hasta observar que el descenso en el nivel fuera constante, es decir hasta cuando se considerara que la zona se había saturado para luego tomar un nivel de referencia y registrar los niveles de descenso de la lámina de agua y los tiempos para cada uno, al graficar la distancia que desciende el agua contra el tiempo que tarda, se puede establecer la permeabilidad del suelo como la pendiente la parte asintótica de la gráfica.



Figura 1. Permeabilidad in situ.

Fuente: el autor.

La permeabilidad en laboratorio (k lab), se realizó mediante el ensayo de cabeza variable para la mayoría de muestras (material fino) y en algunos puntos se estableció a través del ensayo de cabeza constante (material granular). De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que la permeabilidad in situ es notablemente mayor a la permeabilidad en laboratorio, lo cual se puede explicar teniendo en cuenta que en el terreno existe la presencia de grietas y fisuras que favorecen el flujo del agua a través del suelo, así mismo se observó la dificultad de representar las condiciones reales del suelo en el ensayo de permeabilidad en laboratorio, sin embargo en todos los ensayos se procuró generar una compactación de las muestras de suelo que lograra un peso específico muy cercano al del terreno. Los valores de k in situ variaron entre 6×10^{-6} m/s y 0,11 m/s y los de k lab entre 1×10^{-6} m/s y $1,4 \times 10^{-3}$ m/s.

D. Obtención de parámetros

1) Parámetros geotécnicos. Los parámetros geotécnicos obtenidos de la subcuenca de Rio de Piedras, se analizaron espacialmente de acuerdo a las 15 microcuencas en que se divide (ver figura 2). Se determinó un valor ponderado de cada parámetro geotécnico, para cada microcuenca a partir de los datos puntuales obtenidos en los 25 sitios explorados a los cuales se les realizó ensayos.

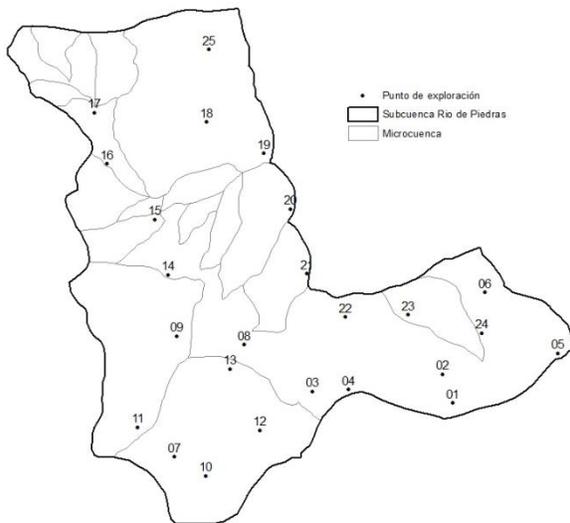


Figura 2. Microcuencas y puntos de exploración.
Fuente: el autor.

Para generar un valor representativo de los parámetros geotécnicos (e, n, s, w, Gs, γ , límites, índices y permeabilidad), para cada microcuenca, en función de los datos de laboratorio, se realizó un análisis espacial, generando líneas de isovalores geotécnicos a partir de las cuales se crearon polígonos con valores que representan la distribución espacial del fenómeno geotécnico. A

partir de éstos se estableció un valor ponderado dentro de cada microcuenca

2) Parámetros hidrológicos. La estimación de los parámetros hidrológicos del modelo de *Thomas* (a, b, c, d, St y Gt), se realiza a partir de los datos de caudal superficial, precipitación y evapotranspiración.

Caudales de escorrentía superficial. Se calculan mediante el método del número de curva (Nc), elaborado por *U.S. Soil Conservation Service* y se basa en la estimación directa de la escorrentía superficial de una lluvia a partir de las características del suelo, uso del mismo, su cubierta vegetal y la precipitación [4].

Se generan los polígonos de *Thiessen* para la subcuenca Rio de Piedras, los cuales representan la zona de influencia de cada estación en la cual se tiene información de precipitación mensual. Del método del número de curva, se generan en el SIG los caudales de escorrentía superficial (Qe) para las 15 microcuencas, en la tabla 2 se resumen los valores de los caudales de escorrentía calculados por el método del número de curva (Nc).

Tabla 2. Caudales de escorrentía.

		CAUDAL TOTAL EN CADA MICROCUENCA (m3/seg)					
COD_MICROC	First_nom_	Sum_Qe _ENE	Sum_Qe _FEB	Sum_Qe _MAR	Sum_Qe _ABR	Sum_Qe _MAY	Sum_Qe _JUN
2403002000	Rio de Piedras A.D	0,02	0,05	0,16	0,29	0,28	0,10
2403002001	RUSIA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2403002002	VIRGEN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2403002003	RUSIA_2	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2403002004	Q. Barronegro	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,01
2403002005	Q. La fiera	0,04	0,03	0,05	0,06	0,06	0,04
2403002006	CORTADERA_G1	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01
2403002007	Q. El Tambor	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01
2403002008	CORTADERA_G2	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
2403002009	Q. La Barada	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
2403002010	Q. Toleda	0,00	0,02	0,07	0,13	0,12	0,04
2403002011	Q. Puente Tierra	0,01	0,01	0,04	0,05	0,04	0,02
2403002012	Q. La Nutria	0,00	0,00	0,02	0,03	0,03	0,01
2403002013	Q. La Villa	0,00	0,02	0,08	0,15	0,14	0,04
2403002014	Zo. Los Perez	0,00	0,01	0,02	0,03	0,03	0,01
	TOTALES	0,10	0,16	0,49	0,81	0,78	0,31

Fuente: el autor.

Tabla 2 (continuación). Caudales de escorrentía.

COD_MICROC	First_nom_	CAUDAL TOTAL EN CADA MICROCUENCA (m3/seg)					
		Sum_Qe _JUL	Sum_Qe _AGO	Sum_Qe _SEP	Sum_Qe _OCT	Sum_Qe _NOV	Sum_Qe _DIC
2403002000	Rio de Piedras A.D	0,08	0,06	0,12	0,31	0,22	0,08
2403002001	RUSIA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2403002002	VIRGEN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2403002003	RUSIA_2	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
2403002004	Q. Barronegro	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01
2403002005	Q. La fiera	0,03	0,03	0,04	0,07	0,05	0,03
2403002006	CORTADERA_G1	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
2403002007	Q. El Tambor	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
2403002008	CORTADERA_G2	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
2403002009	Q. La Barada	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00
2403002010	Q. Toleda	0,03	0,02	0,05	0,14	0,10	0,03
2403002011	Q. Puente Tierra	0,02	0,02	0,02	0,05	0,04	0,02
2403002012	Q. La Nutria	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01
2403002013	Q. La Villa	0,04	0,02	0,06	0,16	0,11	0,04
2403002014	Zo. Los Perez	0,01	0,01	0,01	0,04	0,03	0,01
	TOTALES	0,25	0,21	0,36	0,89	0,62	0,25

Fuente: el autor.

El método del número de curva se utilizó debido a que en el interior de la subcuenca Rio de Piedras, no existen datos de caudal, se observa que los mayores caudales corresponden al mes de octubre con cerca de 0,9 m³/s, comparable con datos del EOT en los cuales se señala un caudal para la cuenca de 1,2 m³/seg.

Precipitación. Se utilizó la información de las tres estaciones del IDEAM, San Antonio, Chuqueque y Sotaquirá. Se emplearon los valores medios mensuales de precipitación. La

intersección de la capa de las 15 microcuencas con los polígonos de *Thiessen*, determinó el área de influencia de cada una de las 3 estaciones en las microcuencas, con lo cual se estableció la precipitación de manera ponderada. Los valores medios de precipitación para cada estación y un ejemplo del cálculo ponderado de precipitación para la microcuenca de la Quebrada La Nutria, con influencia de las estaciones San Antonio y Sotaquirá, aparece en la figura 3.

ESTACIÓN	VALORES MEDIOS DE PRECIPITACIÓN (m.m.)											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
San Antonio	26,60	43,20	79,70	112,70	111,30	62,00	56,20	48,40	68,90	117,70	97,00	56,70
Chuqueque	119,77	131,14	268,02	313,78	278,85	190,53	155,23	161,08	190,95	311,90	262,28	164,90
Sotaquirá	35,36	45,53	89,62	104,91	99,63	69,10	59,31	58,14	71,48	115,73	89,18	55,53
PRECIPIT.	29,5	44,0	83,0	110,1	107,4	64,4	57,2	51,6	69,8	117,0	94,4	56,3

AREAS THIESSEN		
SAN ANTONIO	1,14	Km2
CHUQUEQUE	0,00	Km2
SOTAQUIRA	0,57	Km2
AREA TOTAL	1,71	Km2

Figura 3. Precipitación ponderada microcuenca La Nutria

Fuente: el autor.

Evapotranspiración. Se calcula a partir de los valores totales máximos de temperatura de la estación de la UPTC (Tunja). Se empleó el método *Thomthwaite*, el cual determina la evapotranspiración potencial con los datos de temperatura (ver figura 4).

En cada microcuenca se asignan valores de los parámetros del modelo hidrogeológico de *Thomas* y junto con los datos de precipitación y evapotranspiración, mediante el empleo de una hoja de cálculo formulada se relacionan para calcular un caudal simulado (tablas 3 y 4).

CÁLCULO EVAPOTRANSPIRACIÓN METODO THOMTWAITE												
TEMP. MAX.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	14,30	15,00	15,10	15,30	14,40	13,40	13,10	13,10	13,20	13,90	14,20	14,30
lj	4,91	5,28	5,33	5,44	4,96	4,45	4,30	4,30	4,35	4,70	4,86	4,91
l	57,77											
a	1,40											
Eto	5,68	6,07	6,13	6,24	5,74	5,19	5,03	5,03	5,08	5,46	5,63	5,68

Figura 4. Método *Thomtwaite* para el cálculo de la evapotranspiración.

Fuente: el autor.

Tabla 3. Datos de entrada modelo *Thomas*.

DATOS DE ENTRADA				
Mes	pt(mm)	ETP (mm)	PARAMETROS THOMAS	
Enero	35,4	5,68	a	0,9
Febrero	45,5	6,07	b (mm)	120
Marzo	89,6	6,13	c	0,5
Abril	104,9	6,24	d	0,01
Mayo	99,6	5,74	St-1 (mm)	80
Junio	69,1	5,19	Gt-1 (mm)	10
Julio	59,3	5,03	AREA	0,76
Agosto	58,1	5,03		
Septiembre	71,5	5,08		
Octubre	115,7	5,46		
Noviembre	89,2	5,63		
Diciembre	55,5	5,68		

Fuente: el autor.

Tabla 4. Cálculo de caudales simulados.

Mes	AGUA DISPONIBLE	POSIBILIDAD ETP	ALMAC EN. Z. SATURADA	ESCORRENTIA DIRECTA	ALMAC EN. Z. NO SATURADA	CAUDAL Z. SATURADA	CAUDAL SIMULADO	
	Wt (mm/mes)	Yt (mm/mes)	Gt (mm/mes)	Ro (mm/mes)	St (mm/mes)	Hst (mm/mes)	Q (mm/mes)	Q (m ³ /seg)
1	115,36	89,33	22,78	13,01	85,20	0,23	13,24	0,0038
2	130,73	94,88	40,31	17,92	90,20	0,40	18,33	0,0052
3	179,82	105,18	76,86	37,32	99,94	0,77	38,09	0,0108
4	204,85	107,97	124,06	48,44	102,49	1,24	49,68	0,0141
5	202,12	107,71	169,57	47,21	102,68	1,70	48,90	0,0139
6	171,79	104,03	201,43	33,88	99,63	2,01	35,89	0,0102
7	158,94	101,84	227,71	28,55	97,66	2,28	30,83	0,0087
8	155,81	101,23	252,47	27,29	97,07	2,52	29,81	0,0084
9	168,56	103,52	282,17	32,52	99,23	2,82	35,34	0,0100
10	214,96	108,84	331,91	53,06	104,00	3,32	56,38	0,0160
11	193,18	106,80	371,39	43,19	101,91	3,71	46,90	0,0133
12	157,43	101,55	395,38	27,94	96,85	3,95	31,90	0,0090

Fuente: el autor.

Se grafica el caudal simulado y el calculado (Q_e) contra los meses, se calibran los valores de los parámetros de *Thomas* de tal forma que los dos hidrogramas coincidan lo mejor posible, un ejemplo de esta calibración para una microcuenca,

se muestra en la figura 5. Los valores iniciales de St_1 y Gt_1 , son asignados para el cálculo del modelo en el mes 1, para los demás meses, se utilizan los valores de St y Gt del mes inmediatamente anterior.

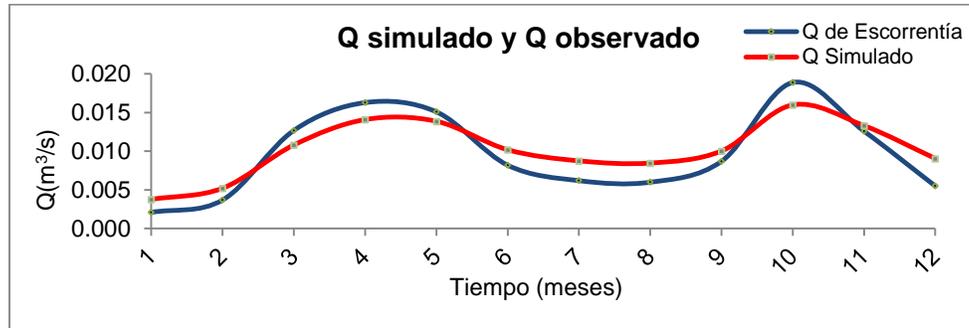


Figura 5. Hidrograma de calibración.

Fuente: el autor.

Una vez se establezca la mejor coincidencia mediante la calibración, se obtienen los parámetros de *Thomas* para la microcuenca, el proceso se realiza de la misma forma en todas las 15 microcuencas.

E. CORRELACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS E HIDROLÓGICOS.

Una vez establecidos los parámetros geotécnicos e hidrológicos, se procede a organizarlos en una hoja de cálculo donde se incluyen los resultados obtenidos las 15 microcuencas que conforman la cuenca de Rio de Piedras (tabla 5).

No son tenidos en cuenta los resultados de los parámetros hidrológicos de las microcuencas Rio de Piedras, Rusia, Rusia_2 y Virgen, ya que no mostraron una calibración donde se observara un comportamiento similar entre los caudales de escorrentía y los caudales simulados, por lo que podrían alterar la correlación con los parámetros

geotécnicos, estas microcuencas tienen en común un número de curva bajo, con alta infiltración y poca probabilidad de generar caudales de escorrentía.

Los resultados obtenidos de los parámetros hidrológicos se grafican en función de los geotécnicos para establecer su correlación. De acuerdo con el modelo, el contenido de agua en la zona no saturada (St) y el de la zona saturada (Gt) se establecen para cada mes, por lo que en las gráficas de correlación se grafican los correspondientes al mes tres en el cual se realizó la exploración geotécnica.

Se aprecia 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 6a) y 6b) se observa la relación entre los parámetros y la expresión de correlación.

Tabla 5. Tabulación de parámetros.

		MICROCUENCA							
		Cortadera_G1	Cortadera_G2	Q. Barroneg.	Q. El Tambor	Q. La Barada	Q. La Fiera	Q. La Nutria	Q. La Villa
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	e	1,08	1,17	1,01	1,22	1,00	1,00	1,32	1,07
	n	0,60	0,60	0,56	0,60	0,59	0,55	0,58	0,56
	S	0,79	0,84	0,90	0,88	0,70	0,83	0,69	0,45
	w	0,40	0,47	0,34	0,51	0,30	0,31	0,46	0,37
	Gs	2,73	2,76	2,66	2,76	2,70	2,58	2,50	2,65
	Yd	1,17	1,14	1,31	1,12	1,22	1,34	1,06	1,26
	Y	1,60	1,61	1,78	1,60	1,69	1,74	1,79	1,47
	Ysat	1,80	1,76	1,86	1,70	1,90	1,87	2,04	1,75
	LI	0,55	0,60	0,45	0,63	0,51	0,51	0,50	0,43
	Lp	0,42	0,43	0,35	0,43	0,40	0,41	0,42	0,35
	lp	0,13	0,17	0,10	0,20	0,11	0,10	0,08	0,08
	lc	1,09	0,77	1,07	0,58	1,91	2,00	0,50	0,75
	ll	-0,09	0,23	-0,07	0,42	-0,91	-1,00	0,50	0,25
	k_lab	2,70E-04	2,00E-04	1,00E-04	1,20E-04	2,60E-04	1,80E-04	1,90E-04	1,50E-04
	k_insitu	1,13E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,10E-02	1,10E-02	1,00E-02	1,00E-02
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	a	0,9	0,99	0,99	0,99	0,87	0,99	0,99	0,99
	b	120	120	110	110	110	120	110	100
	c	0,5	0,55	0,58	0,58	0,55	0,9	0,65	0,6
	d	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	St	112,39	141,39	102,68	102,66	70,80	170,26	102,49	92,76
	Gt	69,65	76,15	79,10	197,12	248,20	430,61	66,65	199,61

		MICROCUENCA						
		Q. Puente Tierra	Q. Toleda	Rio de Piedras	Rusia	Rusia_2	Virgen	Zo. Los Perez
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS	e	0,93	1,81	0,93	1,00	1,00	1,00	0,63
	n	0,47	0,63	0,47	0,50	0,50	0,50	0,42
	S	0,61	0,60	0,72	0,90	0,90	0,90	0,75
	w	0,26	0,37	0,25	0,30	0,30	0,30	0,32
	Gs	2,66	2,73	2,55	2,17	2,12	2,02	2,60
	Yd	1,36	1,07	1,38	1,40	1,40	1,40	1,40
	Y	1,78	1,43	1,72	1,80	1,80	1,80	1,71
	Ysat	1,98	1,67	1,88	1,90	1,90	1,90	1,84
	LI	0,42	0,61	0,43	0,55	0,55	0,55	0,40
	Lp	0,33	0,45	0,30	0,40	0,38	0,33	0,33
	lp	0,09	0,16	0,13	0,15	0,17	0,22	0,07
	lc	1,80	1,47	1,38	1,67	1,47	1,13	1,09
	li	-0,80	-0,47	-0,38	-0,67	-0,47	-0,13	-0,09
	k_lab	3,70E-04	1,60E-04	4,50E-04	1,00E-04	1,00E-04	1,00E-04	5,10E-04
k_in situ	1,33E-02	1,00E-02	1,90E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	
PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	a	0,88	0,99					0,85
	b	140,00	100,00					150,00
	c	0,50	0,55					0,60
	d	0,01	0,02					0,02
	St	83,17	92,65					92,76
	Gt	160,15	95,82					100,48

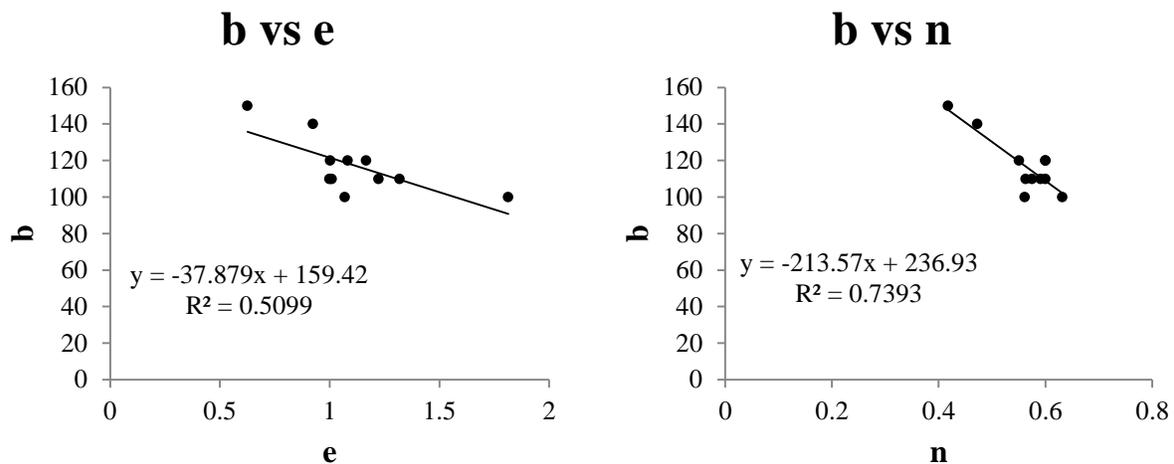


Figura 6. a). b vs e.
Fuente: el autor.

Se observa que el parámetro b de Thomas tiende a decrecer ante el aumento de la relación de vacíos y la porosidad del suelo, teniendo en cuenta que la evapotranspiración es inferior al contenido de agua en la zona no saturada, el parámetro b se puede asumir como la cantidad de agua presente en la zona no saturada. Si bien, valores altos de vacíos y porosidad representan mejor capacidad de almacenamiento de agua, ésta depende del régimen de lluvias presente, para la fecha de la exploración geotécnica, se presentaba una época sin lluvias y los vacíos del suelo facilitarían la evapotranspiración.

Un estudio anterior, encontró que el parámetro a de Thomas decrecía ante el aumento de la

permeabilidad del suelo (ver figura 7), contrario a la relación existente entre el parámetro b y la permeabilidad, donde se observó una relación directamente proporcional [5].

En este estudio, se observó un comportamiento similar entre estas variables (ver figuras 8a y 8b). Teniendo en cuenta que el parámetro a representa la tendencia a presentar escorrentía superficial en un suelo, se puede observar el hecho de que a mayor permeabilidad de un suelo se deben tener menores valores de a, ya que el agua producto de la precipitación se infiltra en el suelo imposibilitando la generación de un caudal de escorrentía superficial considerable, hasta tanto el suelo se sature.

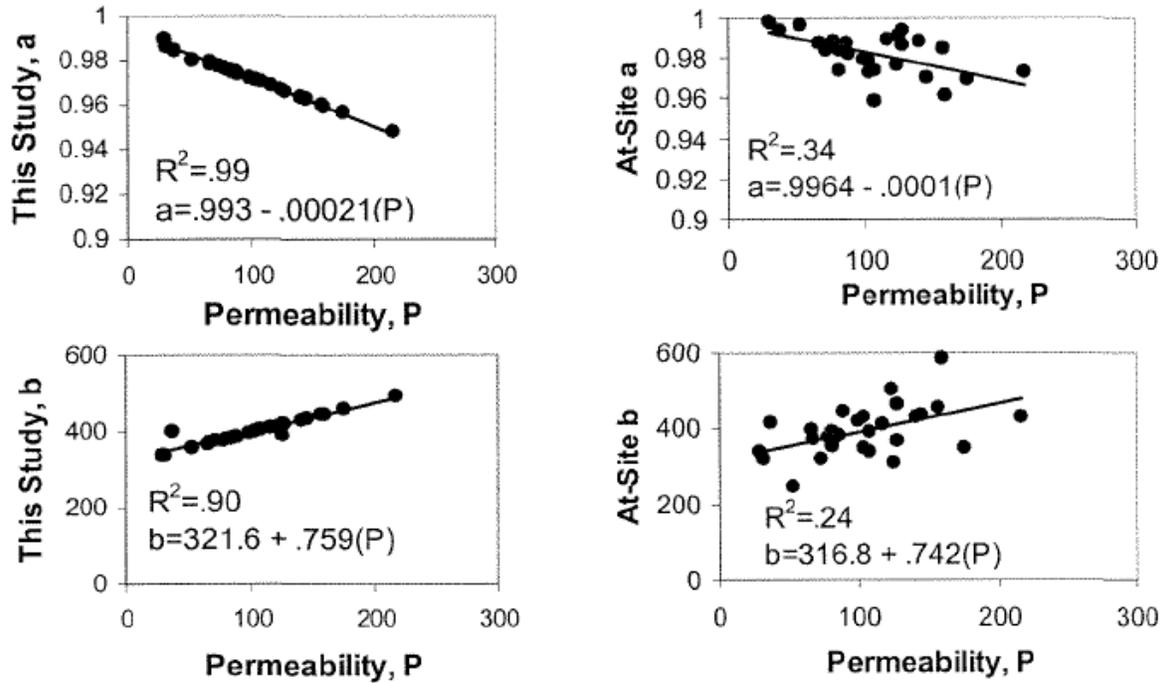


Figura 7. Variación de parámetros a y b en función de la permeabilidad.
Fuente: W. Fernández et al.

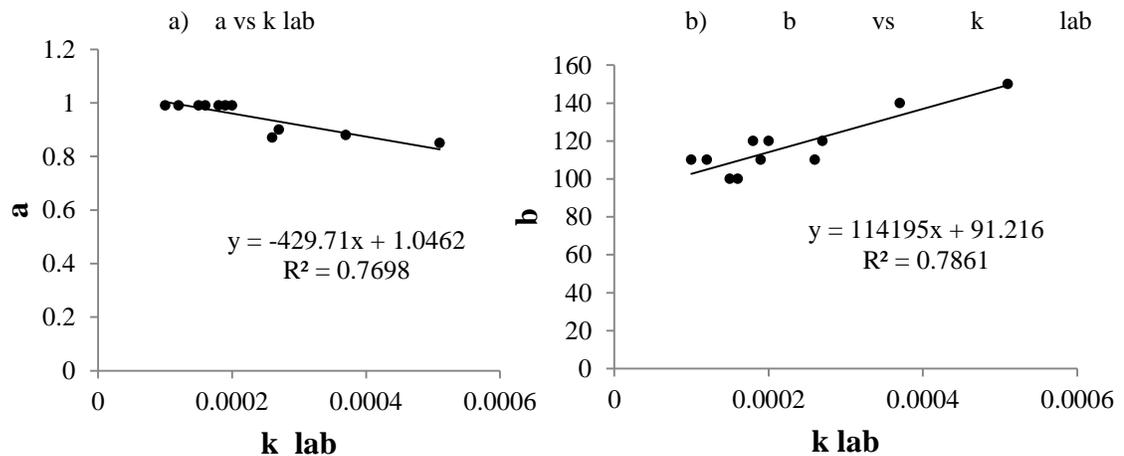


Figura 8. Variación de parámetros a y b con la permeabilidad.
Fuente: el autor.

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.

III. CONCLUSIONES

La exploración de campo y la realización de ensayos de laboratorio, permitieron obtener datos confiables de caracterización geotécnica de la subcuenca de Río de Piedras, sin embargo se debe tener en cuenta que en este tipo de estudios la heterogeneidad de los materiales y las condiciones

variables, pueden incidir en los resultados obtenidos.

Características de los suelos como la saturación y la humedad, varían constantemente para un suelo en función de las condiciones ambientales, se podría afirmar que debido a esto no existe una correlación apreciable entre estos datos y los parámetros de balance hídrico.

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio para la relación existente entre la permeabilidad del suelo y los parámetros a y b del modelo de balance hídrico de *Thomas*, se aprecia que existe una correlación que puede ser validada frente a estudios como el realizado por W. Fernández et al, donde se aprecia un comportamiento semejante y con un orden de magnitud similar teniendo en cuenta que fue realizado en una zona de estudio diferente.

La relación de vacíos y la porosidad de los suelos presentaron un comportamiento correlacionable con el parámetro b del modelo hidrogeológico de *Thomas*, en geotecnia estos valores que caracterizan los vacíos de un suelo, representan gran capacidad de almacenamiento de agua en épocas de lluvia, mientras que en épocas secas facilitarían la pérdida de agua como consecuencia del proceso de evapotranspiración.

Al comparar los resultados obtenidos de permeabilidad de los suelos por medio del método in situ y en laboratorio, se aprecia que a pesar de tener una variación similar en la zona de estudio, el método in situ arrojó resultados notablemente mayores de permeabilidad, esto debido a las grietas, fisuras y oquedades que un suelo presenta en el terreno y que pueden favorecer procesos de flujo del agua a través de ellos. Así mismo se observó en las gráficas de correlación, que los resultados de permeabilidad obtenidos mediante el método in situ presentan un comportamiento más irregular, con picos pronunciados, que el observado en los ensayos en laboratorio, lo que podría explicarse por el hecho de que en laboratorio las pruebas se realizaron con material alterado y procesos de compactación, bajo

condiciones más homogéneas que las que en terreno podría tener el material.

La inclusión de caracterización geotécnica tiene importantes aplicaciones y puede brindar valiosa información adicional en modelos de balance hídrico, si se tiene en cuenta que se trata de procesos que se desarrollan en los suelos, más aun cuando se estudia el comportamiento del agua a través de ellos.

Dentro de los parámetros geotécnicos existen algunos como e , n , G_s , γ_d , γ_{sat} , I_p , que son independientes de la humedad natural del suelo, la cual es determinada principalmente por las condiciones de lluvia en un tiempo determinado. Así mismo, dentro de los parámetros hidrológicos existen algunos que se pueden considerar independientes de las condiciones de lluvia presentes en la zona, mientras que otros si dependen de estas. Se observó que parámetros geotécnicos relacionados directamente con el flujo del agua en medios porosos como la permeabilidad (k), la relación de vacíos (e) y la porosidad (n); arrojaron mejor correlación frente a parámetros del modelo hidrogeológico como (a) y (b).

REFERENCIAS

- [1] BLADÉ, Ernest; GÓMEZ, Valentín y SÁNCHEZ, Juni. Two dimensional model of discharge distribution in vegetated compound channel. 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy, 2007.
- [2] JUÁREZ, Eulalio y RICO, Alfonso. Mecánica de suelos. Fundamentos de la mecánica de suelos. México, D.F., 2005. Tomo 1. 629 p. ISBN 968-18-0069-9.
- [3] AIASSA, Gonzalo. 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, 2008. 399 p.
- [4] ROBREDO, José. Cálculo de caudales de avenida. Madrid, 2000. 55 p.

[5] FERNANDEZ, W.; VOGEL, R.M. y SANKARASUBRAMANIAN, A. Regional calibration of a watershed model. En: Hydrological Sciences Journal. Diciembre, 2009. p. 689-707.