

## INFILTRACIÓN EN LA TERRAZA DE LLANOGRANDE, RIONEGRO (ANTIOQUIA): Aproximación al fenómeno

**Jorge I. Tobón, Marcela Jaramillo, María V. Vélez,**

**Jaime I. Vélez y Daniel E. Arias**

*Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas*

*Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*

*jitobon@unalmed.edu.co*

Recibido para evaluación: 22 de Julio de 2003 / Aceptación: 25 de Septiembre de 2003 / Recibida versión final: 22 de Julio de 2003

### RESUMEN

La zona de Llanogrande es una región fundamental en el desarrollo de Antioquia y es la de más rápido crecimiento poblacional, comercial e industrial del Departamento. Esto hace que se demande grandes cantidades de agua, siendo la subterránea una de las principales fuentes hacia el futuro de acuerdo con varios estudios realizados en la zona en los últimos años. Como es bien sabido la infiltración es un proceso fundamental en el ciclo hidrológico, procesos de erosión y en la recarga y la contaminación de acuíferos, de ahí la importancia de entender el fenómeno.

En esta investigación se establecieron siete puntos de muestreo en toda la zona (18km<sup>2</sup>) para realizar los ensayos de infiltración, con un infiltrómetro de anillo doble, algunas de las pruebas se hicieron dos, tres y hasta cuatro veces tratando de evaluar la variabilidad espacial y temporal del fenómeno. En los sitios donde se realizaron los ensayos también se hicieron perforaciones con un barreno tipo "Auger" para conocer la posición del nivel freático y obtener muestras de los diferentes horizontes del perfil del suelo y determinarles propiedades como: humedad, conductividad hidráulica saturada, textura, gravedad específica, etc.

Se encontró que la Infiltración básica ( $I_b$ ) no es una constante en cada punto del terreno sino que, en suelos estratificados, es dependiente de la conductividad hidráulica saturada del horizonte donde se encuentre el nivel freático. Además, se evidenció que la variabilidad local de la infiltración en la Terraza es mínima. Los modelos empíricos de Kostiakov, Philip dos términos y Horton mostraron una buena representación del fenómeno lográndose los mejores ajustes con los dos primeros.

**PALABRAS CLAVES:** Infiltración, Infiltración Básica, Recarga de Acuíferos, Contaminación de Acuíferos.

### ABSTRACT

The Llanogrande area is an important region in the development of Antioquia and it is growing very fast in population, trade and industry. This means that it demands large quantities of water, being the groundwater one of the main sources in the future according to previous studies. With this study we pretend to contribute to the knowledge of the infiltration phenomena, fundamental process in recharge and contamination of aquifers, determination of erosion, hydrologic cycle and definition of irrigation systems.

Seven points were selected in the area (18km<sup>2</sup>) to make the trials with a double ring infiltrometer. Some of them were made two, three and even four times in order to evaluate the spatial and temporal variability of the phenomena. In these places were also made drillings with an Auger trying to find the position of the water table. The idea was to get samples of the different horizons in the soil profile and to evaluate properties such as: humidity, saturated hydraulic conductivity, texture, specific gravity, etc.

It was found that the Basic Infiltration ( $I_b$ ) is not constant in each point but, in stratified soils, it is a function of the saturated hydraulic conductivity of the horizon where the water table is found. Besides, it became very clear that the local variability in the terrace is minimum. The Kostiakov, Phillip two terms and Horton empirical models shows a good representation of the phenomena, the best adjustments was get whit the two first.

**KEYS WORDS:** Infiltration, Basic Infiltration, Aquifers Recharge, Aquifers Contamination.

## 1. INTRODUCCIÓN

En regiones de tanto desarrollo poblacional, comercial e industrial como la Terraza de Llanogrande en el Altiplano de San Nicolás y donde el agua subterránea se convierte probablemente en la mayor fuente de suministro de agua potable, se hace fundamental el entendimiento del fenómeno de infiltración dada la importancia que éste tiene en procesos como la recarga y la contaminación de acuíferos, determinación de la erosión, estudio del ciclo hidrológico y en el diseño de sistemas de riego (Hillel, 1998)

Se conoce como infiltración al proceso físico mediante el cual el agua penetra a la zona vadosa desde la superficie. Se cuantifica por diversos métodos, balance de masas, medidas de campo o mediante cálculos basados en las propiedades hidráulicas de los suelos (Stephens, 1996). En campo se puede determinar utilizando infiltrómetros y simuladores de lluvia, entre otros.

Para la modelación del fenómeno de infiltración se han desarrollado múltiples ecuaciones, entre ellas se destacan las empíricas, las ecuaciones conceptuales y las fundamentadas en la microfísica del movimiento del agua al interior del suelo, que consideran las propiedades hidráulicas de los suelos. Los modelos empíricos se presentan en forma de ecuaciones simples, desarrolladas para sitios particulares con condiciones específicas, los cuales están bien sintetizados en el trabajo de Arias (2002). En el segundo grupo se encuentran ecuaciones basadas en representaciones conceptuales simples como la de Green-Ampt y otras ecuaciones teóricas que se basan en la ecuación de continuidad y la ecuación de Darcy-Buckingham para el flujo a través de los poros del suelo parcialmente saturado. En el tercer grupo el flujo es representado mediante ecuaciones diferenciales no lineales de las que aún no se tiene solución analítica (Focker – Planck o Richards). En la literatura se encuentran soluciones analíticas o numéricas de diferentes esquemas de simplificación y/o linealización de estas últimas ecuaciones (Ravi y Williams, 1998).

Por la complejidad de la representación y las necesidades de información de condiciones de borde, de frontera y de parámetros, la utilización práctica de los modelos más complejos aún se reduce al análisis de sistemas teóricos, a sistemas simples con suelos homogéneos, o a columnas preparadas en el laboratorio. En la realidad, en el campo se encuentran condiciones de heterogeneidad en el suelo y

muchas veces el predominio del flujo en los macroporos, condiciones que se alejan de los supuestos de los modelos teóricos.

A partir de medidas de campo se ha encontrado que la velocidad de infiltración tiene un comportamiento tipo potencial o exponencial y su variación va disminuyendo paulatinamente hasta que se estabiliza en un valor constante. Cuando el tiempo es suficientemente largo la velocidad comienza a tener un valor aproximadamente constante al que se conoce como velocidad de infiltración básica o simplemente como infiltración básica ( $I_b$ ) (Vergara, 1997). Este valor de infiltración básica es común en la mayoría de los modelos que representan el flujo desde los modelos empíricos, como el de Horton (1940), el de «Kostiakov modificado» de Mezence y Philip (1957), el de Holtan (1961), pasando por modelos conceptuales como el de Green Ampt (1911) y sus distintas modificaciones posteriores hasta en la mayoría de las simplificaciones de la ecuación de Richards donde el flujo es asintótico a un valor que se asocia a la conductividad saturada del suelo Philip (1957), Philip (1969), Knight (1973), Parlange (1975) Collis-George (1977) Brutsaert (1977), Swartzendruber y Clague (1989), Barry y Sander (1991), Warrick et al. (1991), etc. Todos citados y explicados en trabajos como el de Aparicio (2001) y Ravi y Williams (1998).

Con este artículo se pretende aportar al entendimiento del proceso de la infiltración en suelos tropicales de montaña y formados sobre varios eventos de depositación de cenizas volcánicas como los andisoles que son el principal constituyente de los suelos de la Terraza de Llanogrande. Los resultados de esta investigación hacen parte del trabajo de tesis de Maestría de Tobón (2003).

Sobre este tema, existe hasta el momento muy poca literatura técnica en nuestro medio. A cerca de la infiltración en suelos estratificados (aunque no en cenizas volcánicas) está el de Childs *et al.* (1969) citado en Vera (2001) quien extendió el modelo de Green Ampt a suelos estratificados con la condición que la conductividad hidráulica disminuya con la profundidad, lo que no siempre sucede en la Terraza de Llanogrande.

Jury *et al.* (1991) señalan que la información obtenida en las infiltraciones realizadas en campo difieren significativamente de las calculadas con los modelos teóricos, a causa de la heterogeneidad de los suelos con la

profundidad y a la variación en el contenido de humedad cuando la infiltración se inicia. Por esta razón, la tasa de infiltración disminuye más rápidamente de lo que los modelos predicen debido a que todos ellos asumen que los suelos son homogéneos. Esto es corroborado para la zona del Oriente Antioqueño en el trabajo de Arias (2002) donde concluye que modelar la infiltración con programas como el Hydrus-1D, fundamentado en la ecuación de Richards y parametrizado con valores obtenidos de muestras en laboratorio es inadecuado en esta zona porque desconoce el flujo de agua por caminos preferenciales (macroporos), factor clave en el proceso de infiltración en el área.

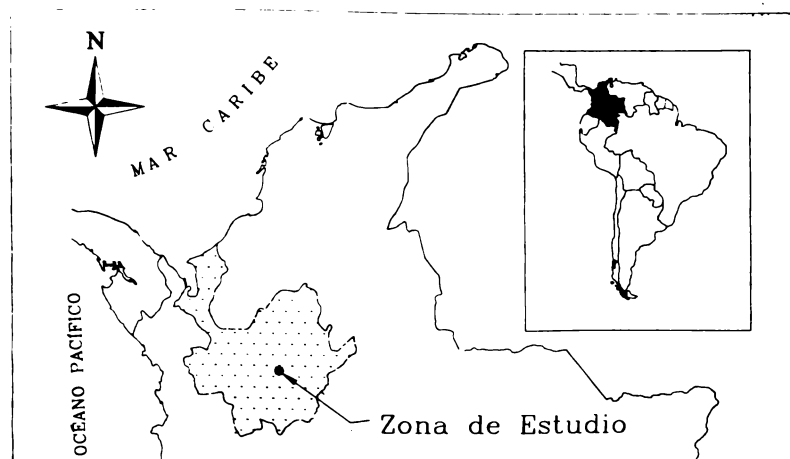
Se realizaron en siete puntos en la zona, con mediciones en diferentes épocas para algunos, un total de 16 ensayos, los cuales constituyen una muestra poblacional demasiado pequeña para hacer análisis estadísticos tradicionales. Por esta razón a los resultados se les hace un análisis cualitativo, tratando de ver la influencia de la heterogeneidad de los suelos en el comportamiento general de la infiltración. Sin embargo, se evalúa la

representatividad del fenómeno con modelos empíricos como kostiakov, Phillip dos términos y Horton.

Conscientes de la variabilidad espacial y temporal que presenta el fenómeno de infiltración, se determinó hacer esta investigación en una pequeña porción de una cuenca hidrográfica de pendiente suave, usos del suelo similares y con características geológicas y geomorfológicas aproximadamente homogéneas en toda su extensión.

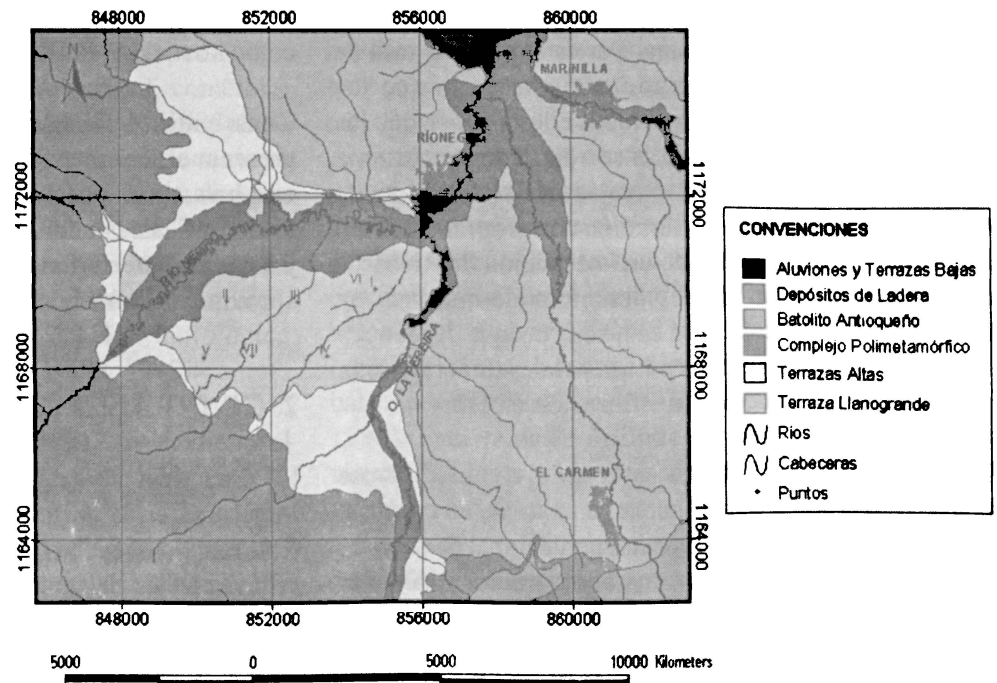
## 2. GENERALIDADES

El área de trabajo (64km<sup>2</sup> aproximadamente) está localizada en la parte norte de la Cordillera Central de Colombia, a unos 55km al oriente de la ciudad de Medellín en jurisdicción del municipio de Rionegro (Figura 1), entre las coordenadas N: 1166000 E: 848000 y N: 1174000 E: 856000, con origen en Bogotá, ubicada en las planchas 147-IV-C-1, 147-IV-A-3, 147-III-D-2 y 147-III-B-4 del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi" IGAC, de 1982, escala 1:10000.



**FIGURA 1.**  
Ubicación zona de estudio

Los 64km<sup>2</sup> considerados inicialmente, se redujeron a 18km<sup>2</sup>, después de hacer la foteointerpretación, pues se encontró que la Terraza está desmembrada (Figura 2) presentando unas pequeñas porciones al norte de la zona, separadas de la masa principal por la vega aluvial del río Negro, las cuales tienen poco interés desde el punto de vista hidrogeológico. El área donde se realizaron los ensayos de infiltración corresponde a la masa principal (zona de color azul clara en la Figura 2).



**FIGURA 2.**  
Geología y localización de  
puntos de ensayos

La temperatura promedio varía entre 17°C y 20°C (HIDRAMSA, 1997) con dos periodos mayores de lluvia entre abril – mayo y septiembre – noviembre, intercalados con dos periodos menos húmedos entre diciembre – marzo y junio – agosto, la precipitación media anual es de 2150mm (MASORA, 1996).

Regionalmente, el área está conformada desde el punto de vista geológico, por rocas metamórficas que afloran esencialmente al occidente y sur de la zona de estudio y corresponden a serpentinitas, granulitas, migmatitas, esquistos y anfibolitas (Restrepo y Toussaint, 1987). El cuerpo ígneo principal en la zona es el Batolito Antioqueño sobre el cual se formó la Terraza de Llanogrande. También, se presentan terrazas aluviales asociadas principalmente al río Negro y a las quebradas La Mosca, La Marinilla y La Cimarrona (Hoyos *et al*, 2001), depósitos de vertiente y de cenizas volcánicas que constituyen la formación superficial más importante de la zona y recubren concordantemente la topografía (Vera, 2001) (Figura 2).

La Terraza de Llanogrande denominada Terraza 6 (Page & James, 1981) es la más extensa de todas las terrazas identificadas, ubicada en la cota 2115, con una ligera pendiente hacia el Este. Los depósitos de esta terraza están formados básicamente por arenas, limos y gravas interestratificados, sobre suelo residual del Batolito Antioqueño cubiertos de ceniza volcánica provenientes de

las distintas erupciones del volcán Nevado del Ruiz (Vera, 2001). Su espesor máximo es de 25m, pero en la mayor parte de su extensión tiene un par de metros y en algunos casos no sobrepasa los 0,5m.

### 3. METODOLOGÍA

Las pruebas de infiltración en campo se llevaron a cabo siguiendo la metodología propuesta por Vergara (1997) en siete puntos con características de uso del suelo similares (zonas de pastos), tratando de cubrir equitativamente la zona de estudio dada la homogeneidad del área (Figura 2), mediante el uso de un infiltrómetro de anillo doble que consiste de dos cilindros huecos de hierro, uno interior y otro exterior de 22 y 39cm de diámetro interior y 35 y 25cm de altura respectivamente, facilitados por el laboratorio de Riegos y Drenajes de la Universidad Nacional de Colombia.

Para evaluar la variabilidad temporal de la infiltración los experimentos se repitieron en diferentes épocas del año, en algunos casos hasta tres veces. Para la determinación de la variabilidad espacial, en varios puntos se realizaron pruebas de infiltración simultáneas separadas 20 m aproximadamente, es decir, con las mismas condiciones de humedad antecedente del suelo y de posición de nivel freático en el perfil. Así, se obtuvo un total de 16 ensayos de infiltración en el área y en distintos momentos.



Debido a que la tasa de infiltración está influenciada, entre otros factores, por las propiedades del suelo (textura, estructura y porosidad) y el gradiente de humedad, en los sitios donde se realizaron ensayos de infiltración se ejecutaron también sondeos con un barreno *Auger* de 3" de diámetro, con el fin de obtener muestras en tubos *Shelby*, de cada uno de los horizontes del suelo, para conocer estas propiedades, la conductividad hidráulica saturada (en el laboratorio) y el estado inicial de humedad.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras tomadas de los diferentes horizontes de suelo en cada punto. Las muestras de los puntos I al V fueron analizadas en el laboratorio de Geotecnia de la Universidad Nacional y las del VI y VII (Ejecutados por Vera, 2001) en el laboratorio de Suelos de la Universidad EAFIT. En el punto VII no se realizó perforación por lo cual no se presentan resultados de laboratorio.

De la Tabla 1 se deduce que la capa de cenizas volcánicas en el área tiene un espesor entre 90 y 250 cm, presentando una variación en la vertical en color (pardo oscuro – oliva pálido - pardo amarillento) y en textura (arcilla a limo-arenoso) principalmente respondiendo a los diferentes eventos volcánicos que les han dado origen. Los cambios texturales se reflejan en la amplitud de valores de la conductividad hidráulica (0.006 a 15 cm/h la cual en general disminuye con la profundidad) y de la porosidad (38 a 80%). Aunque las muestras se tomaron en diferentes fechas casi todas son del año 2002 que fue bastante lluvioso en los ocho primeros meses, por lo cual el grado de saturación de todas es muy elevado (89.5% en promedio). La gravedad específica está entre 2.0 y 2.6 lo que es congruente con la composición dacítica-andesítica propuesta para estas cenizas (Vera, 2001). Otro aspecto a resaltar es que dentro de un mismo horizonte de cenizas volcánicas se presentan variaciones espaciales en textura y color producidas por los cambios laterales de facies, que aunque no son muy grandes tienen incidencia al explicar el fenómeno de la infiltración.

**TABLA 1.**  
Resultados de los análisis de laboratorio

| Punto | Horizonte                | Profundidad (m) | w (%)   | Ks (cm/h) | G     | Sr (%)  | n (%)  |
|-------|--------------------------|-----------------|---------|-----------|-------|---------|--------|
| I     | Orgánico                 | 0.000           | 98.766  | 0.106     | 2.338 | 99.560  | 69.873 |
|       | Café oliva claro         | 0.450           | 23.154  | 0.060     | 2.431 | 91.661  | 38.041 |
|       | Limo arcilloso           |                 |         |           |       |         |        |
| II    | Orgánico                 | 0.000           | 112.095 | 0.185     | 2.259 | 86.692  | 74.494 |
|       | Oliva grisáceo           | 0.150           | 122.837 | 0.006     | 2.495 | 92.947  | 76.726 |
|       | Limo                     |                 |         |           |       |         |        |
|       | Horizonte 3              | 0.730           | 127.788 | 0.021     | 2.568 | 99.825  | 76.677 |
| III   | Orgánico                 | 0.000           |         |           |       |         |        |
|       | Café oliva claro         |                 |         |           |       |         |        |
|       | Arena muy fina           | 0.450           | 124.459 | 0.053     | 2.378 | 90.448  | 76.595 |
|       | Café oliva claro         |                 |         |           |       |         |        |
|       | Arena fina               | 0.880           | 141.373 | 0.046     | 2.531 | 87.500  | 80.348 |
|       | Café oliva claro         |                 |         |           |       |         |        |
|       | Arena fina arcillosa     | 1.100           | 147.760 | 0.062     | 2.466 | 99.924  | 78.482 |
|       | Amarillo sucio           |                 |         |           |       |         |        |
|       | Arena fina               | 1.350           | 43.171  | 0.008     | 2.625 | 99.832  | 53.167 |
|       | Oliva pálido             |                 |         |           |       |         |        |
| IV    | Limo                     | 1.640           | 21.852  | 0.007     | 2.680 | 85.486  | 40.654 |
|       | Gris claro               |                 |         |           |       |         |        |
|       | Arena media a gruesa     | 1.920           | 21.436  | 0.024     | 2.732 | 87.530  | 40.087 |
|       | Aluvial                  |                 |         |           |       |         |        |
|       | Orgánico                 | 0.000           | 104.576 | 0.041     | 2.023 | 72.275  | 74.539 |
|       | Café oliva claro         | 0.470           | 114.765 | 0.007     | 2.267 | 92.791  | 73.715 |
|       | Limo-arcilloso           |                 |         |           |       |         |        |
|       | Oliva claro              | 1.100           | 132.187 | 0.007     | 2.513 | 87.906  | 79.071 |
|       | Arenolimo arcilloso      |                 |         |           |       |         |        |
|       | Amarillo grisáceo        | 1.600           | 56.148  | 0.002     | 2.544 | 94.396  | 60.206 |
| V     | Arcilloso                |                 |         |           |       |         |        |
|       | Orgánico                 | 0.000           | 105.650 | 0.010     | 2.219 | 78.238  | 74.979 |
|       | Amarillo sucio           |                 |         |           |       |         |        |
|       | Limo-arcilloso           | 0.280           | 126.837 | 0.129     | 2.389 | 96.942  | 75.758 |
|       | Amarillo sucio           |                 |         |           |       |         |        |
|       | Limo-arenoso             | 0.750           | 119.054 | 0.864     | 2.546 | 92.746  | 76.568 |
|       | Orgánico                 | 0.000           | 56.300  | 13.349    | 2.000 | 70.640  | 61.390 |
|       | Pardo-amarillento        | 0.120           | 124.900 | 1.268     | 2.090 | 100.000 | 72.180 |
|       | Limo-arcilloso           |                 |         |           |       |         |        |
|       | Pardo oliva claro        | 0.650           | 135.400 | 0.089     | 2.200 | 94.480  | 75.950 |
| VI    | Arcillo-arenoso          |                 |         |           |       |         |        |
|       | Gris oliva a pardo oliva | 1.070           | 138.500 | 15.793    | 2.510 | 95.130  | 78.540 |
|       | Arcillo-arenoso          |                 |         |           |       |         |        |
|       | Gris claro               | 1.340           | 42.000  | 0.006     | 2.590 | 84.190  | 56.370 |
|       | Arena Fina               |                 |         |           |       |         |        |
|       | Horizonte 6              | 1.470           | 48.800  | 0.001     | 2.700 | 66.980  | 66.300 |

W: humedad gravimétrica, Ks: conductividad hidráulica saturada, G: gravedad específica, Sr: grado de saturación y n: porosidad.

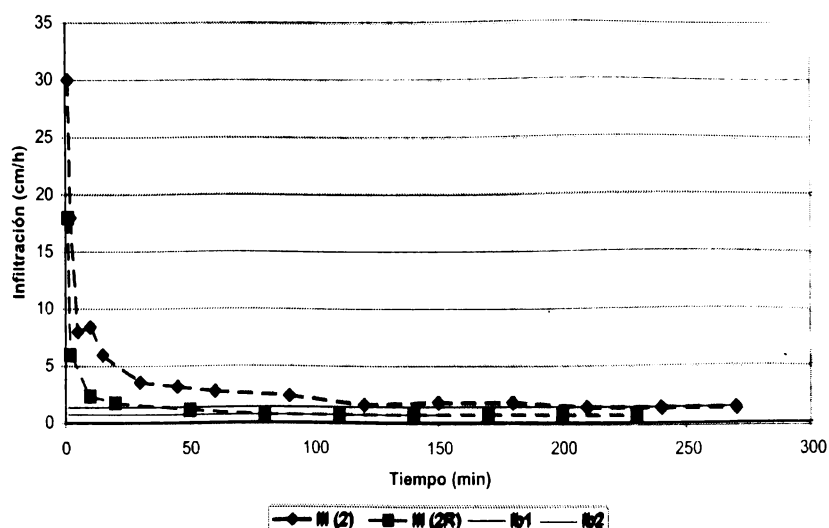
## 4.2 PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

### 4.2.1 Variabilidad Espacial

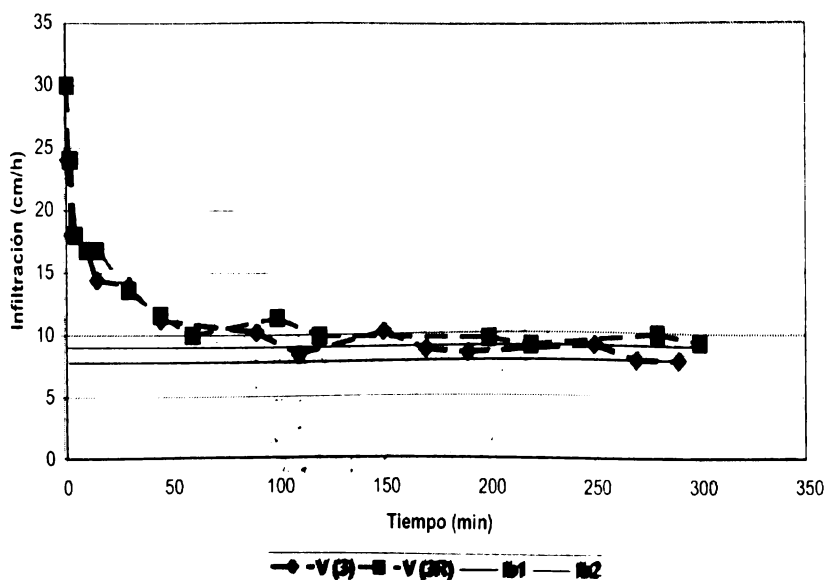
Para la evaluación de la variabilidad espacial de la infiltración se hicieron ensayos simultáneos en el mismo punto de muestreo (a unos 20m aproximadamente el uno del otro) encontrando que el cambio en el valor de la

infiltración básica ( $I_b$ ) es muy bajo. Por ejemplo, en el punto III, donde se repitió el segundo ensayo,  $I_b$  cambió de 1.4cm/h ( $I_{b1}$ ) a 0.8cm/h ( $I_{b2}$ ) (Figura 3) que son datos muy semejantes. En el punto V, donde se repitió el tercer ensayo, el cambio fue de 7.8cm/h ( $I_{b1}$ ) a 9.0cm/h ( $I_{b2}$ ) (Figura 4) que para efectos prácticos son valores iguales. Esto demuestra que los cambios laterales de facies para estas distancias no son muy importantes en estos puntos.

**FIGURA 3.**  
Variación espacial de la infiltración para el punto III.



**FIGURA 4.**  
Variación espacial de la infiltración para el punto V.



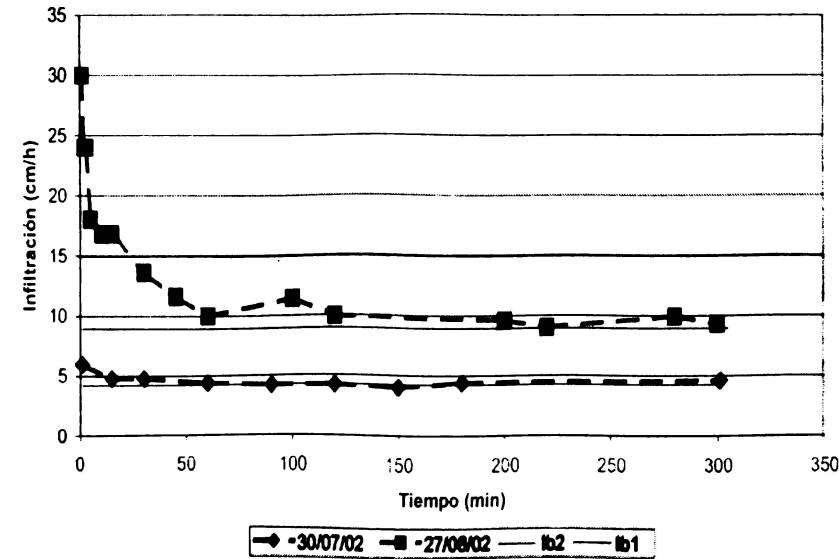
### 4.2.2 Variabilidad Temporal

Para la evaluación de la variabilidad temporal se repitieron los ensayos en un período de cuatro meses, con distintas condiciones climáticas (invierno y verano). En el caso del punto V, para dos ensayos realizados con un mes de separación (Tabla 2), se presentan valores de infiltración

básica ( $I_b$ ) bastante diferentes (Figura 5), cambiando de 4.2cm/h ( $I_{b1}$ ) a 9.0cm/h ( $I_{b2}$ ), por encontrarse el nivel freático, para el ensayo del 30/07/02 en un horizonte de menor conductividad hidráulica (limo-arcilloso) que para el del 27/08/02 (limo-arenoso). Planteándose así lo que parecería ser una dependencia de la infiltración básica ( $I_b$ )

**TABLA 2.**  
Parámetros encontrados para el punto V

| Fecha    | N. Freático (m) | Horizonte                     | K <sub>s</sub> (cm/h) | I <sub>b</sub> (cm/h) |
|----------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 30/07/02 | 0.5             | Amarillo sucio limo-arcilloso | 0.1287                | 4.2                   |
| 27/08/02 | 1.0             | Amarillo sucio limo-arenoso   | 0.8638                | 9.0                   |

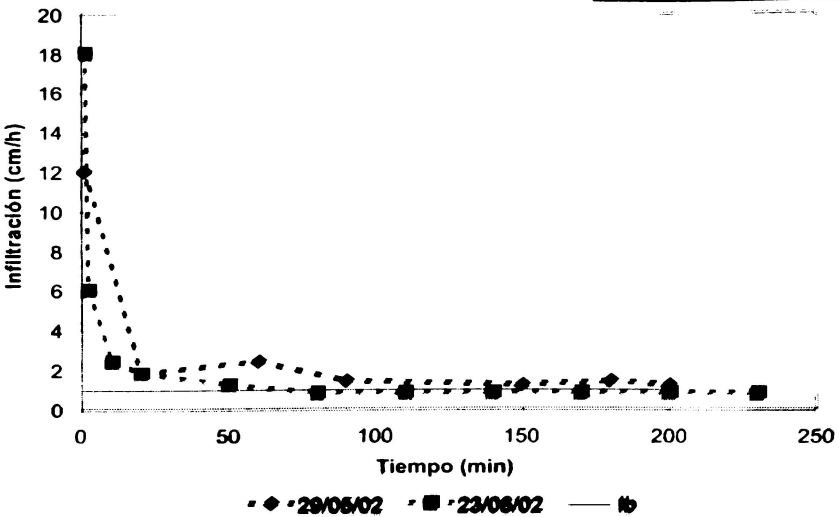


**FIGURA 5.**  
Cambio en la infiltración con el tiempo en el punto V

En el caso del punto III, para ensayos repetidos con tres meses de separación (Tabla 3), se encontró que aunque el nivel freático está en horizontes diferentes las infiltraciones básicas son casi iguales (Figura 6) ya que las conductividades hidráulicas de dichos horizontes son similares (arenas).

**TABLA 3.**  
Parámetros encontrados para el punto III

| Fecha    | N. Freático (m) | Horizonte                       | K <sub>s</sub> (cm/h) | I <sub>b</sub> (cm/h) |
|----------|-----------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 29/05/02 | 1.6             | Amarillo sucio Arena fina       | 0.008                 | 1.2                   |
| 23/08/02 | 2.4             | Gris claro Arena media a gruesa | 0.024                 | 0.8                   |

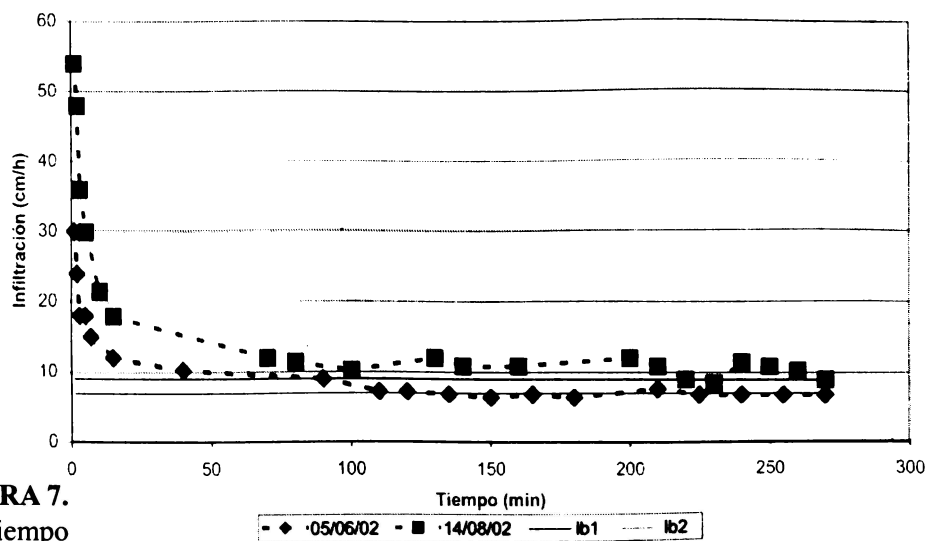


**FIGURA 6.**  
Cambio en la infiltración con el tiempo para el punto III

En el caso del punto I, en dos fechas distintas separadas por dos meses (Tabla 4), el nivel freático se encontró en el mismo horizonte, produciendo como resultado dos curvas de infiltración con  $I_b$  semejantes (Figura 7).

| Fecha    | N. Freático (m) | Horizonte                          | $K_s$ (cm/h) | $I_b$ (cm/h) |
|----------|-----------------|------------------------------------|--------------|--------------|
| 05/06/02 | 0.5             | Café oliva claro<br>Limo-arcilloso | 0.06         | 7.0          |
| 14/08/02 | 1.2             | Café oliva claro<br>Limo-arcilloso | 0.06         | 9.0          |

**TABLA 4.**  
Parámetros encontrados para el punto I



**FIGURA 7.**  
Cambio en la infiltración con el tiempo para el punto I

### 4.3 MODELAMIENTO DE INFILTRACIÓN

Se utilizaron los modelos empíricos de Kostiakov, Phillip dos términos y Horton cuyas ecuaciones se presentan a continuación:

**Kostiakov:**  $i(t) = at - b$  (1)

Donde:

$i$ : tasa de infiltración en el tiempo  $t$ .

$a$  y  $b$ : constantes dependientes de las propiedades del suelo.

**Phillip dos términos:**  $i(t) = (0.5)St^{-1/2} + A$  (2)

Donde:

$i$ : tasa de infiltración en el tiempo  $t$ .

$S$ : sortividad del suelo.

$A$ : estimación de la conductividad saturada de campo.

**Horton:**  $i(t) = i_c + (i_0 - i_c)\exp(-kt)$  (3)

Donde:

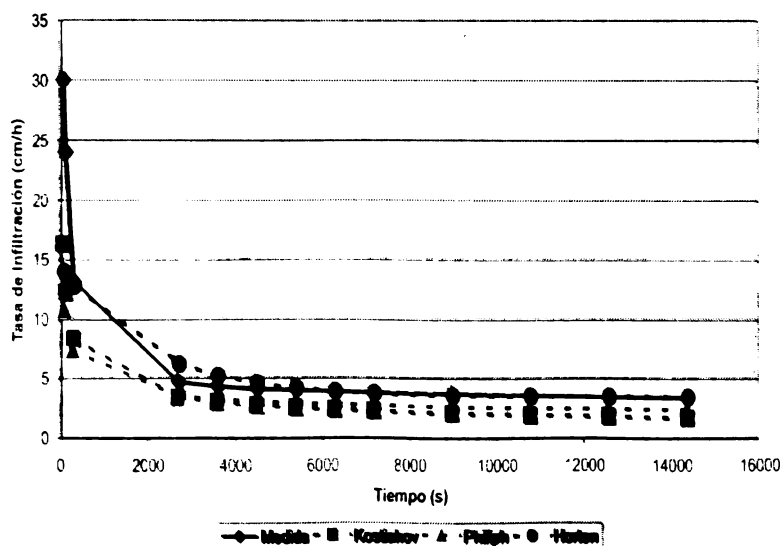
$i$ : tasa de infiltración en el tiempo  $t$ .

$i_c$ : tasa constante de infiltración final o infiltración básica.

$i_0$ : tasa inicial de infiltración.

$K$ : constante que representa la tasa de decrecimiento.

Se encontró que los tres modelos representan bien el fenómeno en la zona (Figuras 8). Sin embargo, los mejores ajustes entre todas las curvas experimentales y las modeladas se obtuvieron con Kostiakov y en segundo lugar con Philip.

**FIGURA 8.**

Tercer ensayo de infiltración en el punto V modelado con Kostiakov

En la Tabla 5 se presentan los estadísticos básicos encontrados para los parámetros utilizados en cada uno de los modelos empíricos analizados. Los rangos de valores hallados para cada una de las variables son muy amplios en algunos casos como reflejo de la variabilidad espacial y temporal del fenómeno de infiltración. Sin embargo, dada

la buena representación del fenómeno por parte de los modelos y las bajas desviaciones estándar encontradas para las constantes se permite su empleo para la estimación de la tasa de infiltración en zonas de características similares y donde no se quiera o se puedan hacer los ensayos.

|        | Kostiakov |       | Philip |       | Horton |
|--------|-----------|-------|--------|-------|--------|
|        | b v       | a     | A h    | S     | n K    |
| Minim  | 0,333     | 0,002 | 0,000  | 0,015 | 0,000  |
| Máxim  | 0,910     | 0,312 | 0,018  | 0,321 | 0,000  |
| Medi   | 0,708     | 0,069 | 0,004  | 0,136 | 0,000  |
| Median | 0,786     | 0,045 | 0,001  | 0,067 | 0,000  |
| Desv   | 0,192     | 0,090 | 0,006  | 0,121 | 0,000  |

**TABLA 5.**

Estadísticos básicos de los parámetros de los métodos empleados

## 6. CONCLUSIONES

- La capa de cenizas volcánicas en el área tiene un espesor entre 90 y 250cm, presentando cambios en la vertical en color (pardo oscuro - oliva pálido - pardo amarillento) y textura (arcilla a limo-arenoso) principalmente, los cuales se reflejan en la variación de la conductividad hidráulica (0.006 a 15cm/h) y la porosidad (38 a 80%) especialmente, respondiendo a los diferentes eventos volcánicos que les han dado origen.
- La conductividad hidráulica, en general, disminuye con la profundidad.
- La porosidad de las cenizas es bastante alta, superior al 40% y la gravedad específica está entre 2.0 y 2.6
- La variación espacial local, alrededor de los 20m, de la infiltración básica en la Terraza de Llanogrande es muy baja, demostrando que los cambios laterales de facies

para estas distancias no son muy importantes.

- La infiltración básica no es una constante para cada punto del terreno en el tiempo. Si no que en un instante dado en el tiempo, en suelos estratificados, está determinada por la posición del nivel freático y la conductividad hidráulica saturada del horizonte donde éste se encuentre.
- Los modelos empíricos de Kostiakov, Phillip dos términos y Horton representan bien el fenómeno de infiltración en la Terraza. No obstante, los mejores ajustes se obtuvieron con Kostiakov y en segundo lugar con Philip.
- Los valores de las constantes, para cada uno de los métodos empleados, presentan desviaciones estándar muy pequeñas, lo que sumado a la buena representación del fenómeno permite la utilización de la media estadística para estimar la tasa de infiltración en cualquier lugar de la terraza de Llanogrande.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- El estudiante Freddy Alexander López de Ingeniería Geológica.
- Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Minas.
- Laboratorio de riegos y drenajes de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia.
- CORPOICA (Estación La Selva).

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahuja, L. R., Naney, J. W. y Nielsen, D. R., 1984. Scaling soil water properties and infiltration modeling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 970 - 973.
- Aparicio, M., F. J., 2001. Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México. 303p.
- Arias, D. E., 2002. Cálculo de la infiltración para el modelamiento de la contaminación de algunos acuíferos del oriente Antioqueño. TDG - Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín. 87p.
- Barry, D. A. y Sander, G. C., 1991. Exact solutions for water infiltration with an arbitrary surface flux or non-linear solute adsorption. *Water Resource Research.* 27 (10): 2667 - 2680.
- Ciollaro, G. y Romano, N., 1995. Spatial variability of the soil hydraulic properties of volcanic soil. *Geoderma.* 65: 263 - 282.
- HIDRAMSA., 1997. Estudio y reglamentación de las llanuras de inundación del río Negro y la quebrada La Pereira. Escala 1:25000.
- Hillel, D., 1998. *Environmental soil physics.* Academia Press. 771 p.
- Hoyos, F., Vélez, M. V., Múnera, J. C. y Arias, D. E., 2001. Investigación de aguas subterráneas Región Valles de San Nicolás, Fase II. Convenio de cooperación en ciencia y tecnología CORNARE - Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 85 p.
- Jury, A. W., Gardner, W. R. y Gardner, W. H., 1991. *Soil Physics.* John Wiley & Sons, Inc. New York. 328 p.
- Masora., 1996. Anuario estadístico subregional, Altiplano de Rionegro. Pp1 - 15.
- Page, W.D. y James, M., 1981. The antiquity of the erosion surfaces and Late Cenozoic Deposits, Memoria del Primer Seminario sobre el Cuaternario de Colombia, Revista CIAF, 6, 1-3, pp 421 453, Bogotá.
- Ravi, V. y Williams, J. R., 1998. Estimation of infiltration rate in vadose zone: Compilation of simple mathematical models. En: [www.epa.gov/ada/download/report/infiltvol.pdf](http://www.epa.gov/ada/download/report/infiltvol.pdf)
- Restrepo, J. J. y Toussaint, J. F., 1987. El grupo Ayurá - Montebello: Tiene todavía validez estratigráfica? Memorias Seminario Gerardo Botero Arango, Geología de la Cordillera Central de Colombia. Medellín. Pp.167 - 173.
- Stephens, D. B., 1996. *Vadose zone hydrology.* Lewis Publishers. 347p.
- Tobón, J. I., 2003. Hidrología de la zona vadosa en la Terraza de Llanogrande, Rionegro, Antioquia. Tesis de Maestría en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Medellín. 160 p.
- Vera, C. A., 2001. Variación en la permeabilidad y en las condiciones de infiltración de las cenizas volcánicas de los valles de San Nicolás. Tesis de Maestría, Universidad EAFIT. 253 p.
- Vergara, J. E., 1997. Curso básico de riegos. Instituto Nacional de Adecuación de Tierras.