



## Acuíferos de la Formación Tilatá (Mioceno-Plioceno) en Dos Pozos del Suroeste de la Sabana de Bogotá.

ALBERTO ALVAREZ OSEJO

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado Aéreo 14490, Santafé de Bogotá, D.C.  
e-mail: aalvarez@ciencias.ciencias.unal.edu.co

Alvarez O., A. (1998): Acuíferos de la Formación Tilatá (Mioceno-Plioceno) en Dos Pozos del Suroeste la Sabana de Bogotá.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 23, pgs. - , 8 Figs., 1 Anexo, Santafé de Bogotá.

**Resumen:** Las capas permeables de la Formación Tilatá constituyen, en la Sabana de Bogotá, uno de los acuíferos más productivos y por ser no consolidadas son relativamente fáciles de perforar. Se resume la litología de la Formación, útil para fines hidrogeológicos. Se presentan dos columnas litológicas de dos pozos que aprovechan dichos acuíferos. Su resistividad eléctrica varía entre 20 y 70 Ohm.m. Los pozos que los aprovechan pueden tener capacidades específicas de 6,6 LPS/m. Su transmisividad puede ser mayor a 900 m<sup>2</sup>/día. Los coeficientes de almacenamiento varían de  $2,2 \times 10^{-3}$  a  $5,6 \times 10^{-4}$  en los dos ensayos de acuíferos presentados y realizados con un pozo de observación. Se dan nociones de hidráulica de pozos, con el objeto de educar a los usuarios del agua subterránea, en los principios básicos de la hidrogeología.

**Palabras claves:** Formación Tilatá, Sabana de Bogotá, Niveles u horizontes guía, Acuífero, Cono de depresión, Caudal, Abatimiento, Capacidad específica, Transmisividad, Coeficiente de almacenamiento, Eficiencia de un pozo, Radio de influencia.

**Abstract:** The Tilata Formation, with unconsolidated permeable layers, in the Bogota Sabana, are aquifers with important yields, relatively easy to drill. To know its lithology is useful for hidrogeological purposes. Two lithological columns of two water wells are presented. Its electrical resistivity ranges from 20 to 70 Ohm.m. The wells from the Tilata Formation could have specific capacities of 6.6 LPS/m. The transmissivity could be larger than 900 m<sup>2</sup>/day. The storage coefficient ranges from  $2,2 \times 10^{-3}$  to  $5,6 \times 10^{-4}$  in the two pumping tests, carried out with one observation well. Notions of well hydraulics are given in order to educate the ground water users, about hydrogeologic basic principles.

**Key words:** Tilata Formation, Bogota Sabana, Key beds, Aquifer, Cone of depression, Discharge, Drowdown, Specific capacity, Transmissivity, Storage coefficient, Well efficiency, Radius of influence.

### INTRODUCCION

La Sabana de Bogotá está en la Cordillera Oriental de Colombia, entre los 4°30' y 5°15' de latitud N y 73° 45' y 74° 30' de longitud W (HELMENS & VAN DER HAMMEN 1995 p. 92). La parte plana de la Sabana de Bogotá tiene alturas entre 2540 y 2600 m.s.n.m. Las colinas circundantes entre 2800 y más de 3600 m. Es una cuenca de origen tectónico, rellenada, por lo general, con sedimentos no consolidados de gran espesor, de origen lacustre, principalmente, y de origen fluvial. Su edad va del Mioceno al Pleistoceno. El río Bogotá es su principal corriente perenne; fluye de norte a sur. Bogotá, la capital de Colombia, con unos 6 millones de habitantes, está situada en la parte meridional de la Sabana.

### PROPOSITO DE ESTE TRABAJO

La Formación Tilatá (Mioceno y Plioceno) contiene, junto con el Grupo Guadalupe (Cretáceo Superior), los

acuíferos más productivos de la Sabana. Por lo tanto, es útil divulgar la litología de la misma, según los estudios detallados más recientes. También es útil adoptar métodos de estudio detallados para la elaboración de las columnas litológicas de los pozos para que sean empleadas en los estudios del subsuelo y también en la delimitación de las zonas de recarga. Igualmente es práctico iniciar la publicación de las características hidráulicas de los acuíferos de Tilatá, para su utilización en aplicaciones elementales, en este trabajo y en el futuro para integrar sus valores a los modelos que, se espera, se usen para realizar la gestión del agua subterránea en esta cuenca del país. Adicionalmente, para cumplir este último objetivo, se requiere la estrecha colaboración entre la Administración y los usuarios, a quienes hay que procurar educar adecuadamente en los principios básicos de la hidrogeología (LLAMAS 1992), puesto que, debido a la general carencia de tiempo de los planificadores, legisladores y gerentes, no se puede asumir que con la publicación de artículos en revistas científicas

o en periódicos se logrará que tomen las decisiones correctas (BACK & HERMAN 1997).

A la educación de los usuarios se aplican algunos conceptos de este artículo, que para los especialistas, son conocidos.

## ESTRATIGRAFIA

Los sedimentos no consolidados de la Sabana de Bogotá, han sido estudiados por diferentes autores desde hace varios años. VAN DER HAMMEN *et al* (1973 en HELMENS & VAN DER HAMMEN 1995 p. 97) dividió inicialmente el relleno sedimentario en tres unidades litoestratigráficas: Formación Tilatá, Formación Subachoque y Formación Sabana. Las formaciones Tilatá y Sabana fueron modificadas de autores anteriores y la Formación Subachoque fue descrita por VAN DER HAMMEN *et al.* (1973 *op.cit.*). Posteriormente, con base en estudios más detallados, HELMENS & VAN DER HAMMEN (1995 *op. cit.*) subdividieron las tres formaciones anteriores para la parte plana, para el piedemonte y para la parte montañosa en trece formaciones y tres miembros. Esta subdivisión no se considera práctica para fines hidrogeológicos, pero sí lo es la clasificación de los sedimentos del Terciario-Cuaternario en tres formaciones: Tilatá, Subachoque y Sabana (HELMENS & VAN DER HAMMEN 1995 *op. cit.*), Fig. 1.

## Litología

HELMENS & VAN DER HAMMEN (1995 *op. cit.*) estudiaron detalladamente la secuencia sedimentaria de la Sabana, con base a criterios litológicos, registros palinológicos, dataciones de las cenizas volcánicas mediante huellas de fisión en circones y datación con  $^{14}\text{C}$  de los paleosuelos ricos en materia orgánica, de los últimos 50.000 años. Los estudios los realizaron en testigos de tres pozos estratigráficos, dos de ellos localizados en la parte central de la Sabana: Funza I de 357 y Funza II de 586 m de profundidad, y el tercer pozo localizado al SE, en la Ciudad Universitaria (Universidad Nacional de Colombia en Bogotá D. C.) de 195 m de profundidad. Los autores también midieron columnas litológicas e hicieron control de campo. Los ambientes deposicionales estudiados les permitieron afirmar que en los depósitos de origen fluvial predominan las arenas y gravas; en los depósitos lacustres predominan las arcillas y en los paludales la turba.

HELMENS & VAN DER HAMMEN (1995 *op. cit.*) también presentan un mapa geológico de la Sabana, a escala 1:80.000, que incluye al norte parte de los municipios de Guasca, Sopó, Cajicá y el Páramo de Guerrero. Hasta ese límite se describen las formaciones geológicas en este artículo.

Se resume, a continuación, la litología de las tres

formaciones geológicas de más antigua a más reciente, según la localización geográfica de la Fig. 2.

**Formación Tilatá. (Tt.).** Suprayace generalmente al substrato rocoso. En superficie, de sur a norte, se encuentra en el valle de Usme, donde forma un enorme sistema de abanicos aluviales que descienden en la vertiente oriental desde alturas de 3100 a 2600 m. La superficie de los abanicos es irregular, con gravas y cantos de arenisca redondeados. En el fondo del valle estos depósitos de grano grueso están intercalados con arenas compactas, limos y abundantes arcillolitas de color grisáceo a pardusco.

Al sur y al oeste de Soacha, y al oeste del río Balsillas aflora la Formación Tilatá constituida por arcillas caoliníticas intensamente rojizas, blancas, grises, verdes y azulosas. Al oeste del río Balsillas hay una gran extensión con cerros formados por la meteorización de las areniscas. En las pendientes de los cerros hay arcillas caoliníticas. La oxidación dió a los sedimentos un color rojizo, mientras que los procesos de reducción produjeron colores blancos, grises, verdes y azules. Los estratos arcillosos muestran una pequeña deformación tectónica.

Al oriente de Subachoque y al oriente y sureste de Guasca aflora la Formación Tilatá con sedimentos mal seleccionados que van desde fragmentos de roca subangulares hasta grandes bloques de arenisca intercalados con arcillas, arenas, gravas y paleosuelos húmicos negros. Específicamente, en el valle del río Subachoque existen remanentes de grandes sistemas de abanicos aluviales desde 2750 a 2650 m.s.n.m. A esta última altura se formó un escarpe de unos 30 m sobre el río. Al suroeste de Subachoque aflora la Formación Tilatá con gravas y arenas, y localmente con arenas y arcillas intercaladas con turba y lignito. La turba contiene abundantes restos de plantas. Las secuencias de grano más grueso presentan intensos colores rojos, marrones y violeta. Es notorio el alto grado de meteorización de las gravas. Por otra parte las secuencias de grano fino y arenas son notablemente blancas y frecuentemente están intercaladas con bandas de óxidos de hierro.

En el valle de Guasca, debajo de la Formación Subachoque, la Tilatá muestra sedimentos arenosos con clastos angulares y grandes bloques de arenisca. Intercalados con estos sedimentos de grano grueso hay capas más delgadas de grano fino, arcillas, gravas y paleosuelos húmicos negros.

En Subachoque y Guasca los sistemas de abanicos aluviales están controlados por la tectónica, como se deduce del afloramiento del substrato rocoso deformado y con brechas de falla.

Hacia el noroeste, en el valle del río Frío, la Formación Tilatá presenta sedimentos de grano grueso con alguna estratificación y capas con grandes bloques de arenisca,

<b>Cuaternario</b>	<b>Pleistoceno</b>	<b>Fm. Sabana (Qsa) Espesor, 320 m</b>
		<b>Fm. Subachoque (Qsu) Espesor, 150 m</b>
<b>Terciario</b>	<b>Plioceno</b>	<b>Fm. Tilatá (Tt) Espesor, 260 m</b>
	<b>Mioceno</b>	

**Fig. 1. Columna estratigráfica generalizada del Terciario-Cuaternario de la Sabana de Bogotá.**

que están intercaladas con capas con pequeños fragmentos de roca. Los sedimentos mal seleccionados descritos han sido interpretados como depósitos de flujo gravitacional.

En los valles de Sopó, La Calera, Tabio y Tenjo hay intercalaciones de clastos subangulares dentro de los depósitos arenosos. Los clastos subangulares varían en tamaño desde pequeños fragmentos de roca hasta grandes bloques de arenisca. Esta secuencia ha sido interpretada como depósitos de flujos torrenciales y localmente como depósitos de flujos gravitacionales.

En el relleno aluvial de la Sabana, de la base al techo, la Formación Tilatá puede estar constituida por unas 5 capas u horizontes de diferente litología así: 1) Gravas con clastos que pueden alcanzar el tamaño de cantos, arenas compactas y arcillolitas orgánicas, con intercalaciones de capas con fragmentos de rocas sub-angulares que

pueden llegar a ser grandes bloques de arenisca. Los sedimentos con frecuencia tienen colores rojizos y moteados. El espesor máximo de esta secuencia puede ser de 40 m. Esta capa ha sido interpretada como depósitos de flujos torrenciales y gravitacionales. 2) Sobre los sedimentos anteriores reposan arenas (parcialmente compactas) y gravas con intercalaciones de arcillas con turba de color marrón y hacia la parte superior abundancia de turba y lignito. Su espesor puede llegar a 65 m. Las arenas y gravas indican depósitos fluviales localmente con acumulaciones de turba en lagos y pantanos. 3) A estos últimos sedimentos suprayacen gravas y arenas, o arenas y arcillas, que pueden tener colores rojos, marrones y violetas intensos. El espesor de esta secuencia, puede llegar a 20 m. Las gravas y arenas indican un origen fluvial. 4) Hacia el techo suprayace una secuencia de arcillas arenosas de color gris a verde, arcillas orgánicas, limos y arenas arcillosas con intercalaciones de turba y lignito, localmente arcillas diatomíticas blancas o abigarradas y algunas gravas. Su espesor puede alcanzar unos 20 m. y 5) La capa más superior constituida por una secuencia de arcillas grises y verdes, limos arcillosos, arenas y algunos intervalos de turba. Su espesor es de 110 m. Está representada en el pozo Funza II por el testigo entre 468 y 585 m de profundidad (VAN DER HAMMEN & HOOGHIEMSTRA 1995 *op. cit.* p. 59). Con los espesores parciales de las secuencias descritas, se tiene para la Formación Tilatá un espesor total de unos 260 m, que el pozo Funza II de 585 m no penetró totalmente.

El ambiente de formación y

deposición de la Formación Tilatá es lacustre y fluvial. Los numerosos horizontes de arcilla pueden constituir capas confinantes. Su edad va del Mioceno al Plioceno.

Las resistividades de los sedimentos permeables de la Formación Tilatá varían, generalmente, en los registros eléctricos, entre 20 y 70 Ohm.m. Sin embargo, pueden encontrarse valores superiores. Para la correlación de capas en el subsuelo se sugiere iniciar la Formación Tilatá con las arcillas de colores verdes y grises con intercalaciones de turba; es la capa de mayor espesor si está presente. Tiene unos 110 m de espesor. Si no lo está, iniciarla con la siguiente capa, desde el techo.

La litología de las capas no consolidadas en el subsuelo se resumió de las referencias consultadas y citadas previamente. Los cambios litológicos en el relleno de la Sabana son notables en cortas distancias. Se comprobarían al perforar un pozo de observación a un pozo de bombeo, porque se obtendría columnas litológicas diferentes que, sin embargo, se pueden correlacionar. Entonces, si se utilizan las columnas litológicas de los pozos, preferentemente descritas por geólogos, junto con los registros geofísicos y se tiene en cuenta la geología superficial, se podrán identificar *niveles u horizontes guía* con características físicas propias que permitirán, con la práctica, hacer la diferenciación y por lo tanto la adecuada correlación de pozos, para completar la geología del subsuelo en la Sabana. Las columnas litológicas con sus registros de tiempo, se recomienda describirlas con detalle. Las columnas de las Figs. 5 y 7 ilustran el método de trabajo. Este objetivo se podría realizar con profesionales dedicados a estudiar e interpretar los datos hidrogeológicos con programas permanentes, y quienes

deben tener bases teóricas y práctica profesional sólidas.

**Formación Subachoque (Qsu).** Está suprayacente a la Formación Tilatá. En superficie, de sur a norte aflora al sur de Sibaté, en el valle del río Muña. Al norte de Usme en un área pequeña y al norte de Facatativá, por la carretera a La Vega. En estas localidades está compuesta por arcillas caoliniticas abigarradas y areniscas arcillosas con clastos subangulares muy meteorizados, que alternan con arcillas orgánicas, arenas y gravas. Todos ellos son depósitos de pendientes.

La Formación Subachoque constituida por arcillas arenosas, arcillas orgánicas y turbas que alternan con arenas arcillosas o arenas arcillosas con gravas, también está presente desde el suroeste de El Rosal hasta más al norte de Subachoque, unos 25 Km, así como en los alrededores de Guasca y en forma extensa en la parte central de la Sabana, debajo de la Formación Sabana. En el valle del río Subachoque (localidad tipo) la Formación Subachoque aflora entre los 2700 y 2600 m.s.n.m., con inclinación suave hacia el río. Forma ocasionalmente un escarpe de 20 m. En el valle central de Guasca, entre 2800 y 2600 m de altura, la Formación Subachoque forma unas superficies planas, con suave inclinación hacia el noroeste. La terraza más alta está situada unos 30-40 m sobre los ríos Siecha y Chipatá. Otro elemento presente en la Formación Subachoque son capas arenosas o arcillosas que contienen desde fragmentos de roca subangulares hasta grandes bloques de arenisca, cerca a los cerros.

En el relleno aluvial de la Sabana, la Formación Subachoque está constituida, de la base al techo, por arcillas, arcillas arenosas, delgadas capas de arena, que alternan con arenas arcillosas con grava; capas de arcillas orgánicas y turbas con lignito. Las gravas, de grano fino y grueso, pueden formar lentes espesos. Esta sucesión litológica en el pozo Funza II, tiene un espesor máximo de 150 m. y corresponde al intervalo del testigo entre 320 y 468 m de profundidad (VAN DER HAMMEN & HOOGHIESTRMA 1995 p. 59). En el pozo de la Ciudad Universitaria la Fm. Subachoque se puede ubicar tentativamente desde una profundidad de 143 m. con base a criterios litológicos y palinológicos. Los registros de polen de los pozos estratigráficos indican para la Formación Subachoque un ambiente de formación lacustre para la parte central de la cuenca. El ambiente deposicional en los valles marginales ha sido interpretado como una alternancia de depósitos fluviales (arenas y gravas), lacustres (arcilla) y paludales (turba) (HELMENS & VAN DER HAMMEN *op. cit.* p. 118).

Para fines de correlación de pozos se sugiere tomar la división con la Formación Sabana en las primeras capas de arenas o gravas, de algún espesor. La profundidad variará evidentemente, por la localización del pozo dentro de la cuenca. Sin embargo, se podrá identificar *niveles u*

*horizontes guía*, con relativa facilidad, porque son las capas permeables de la Fm. Subachoque las que alimentan la mayoría de los pozos poco profundos de la Sabana. El espesor de la Formación Subachoque es de unos 150. Las numerosas capas de arcilla pueden constituir capas confinantes. Su edad es Pleistoceno.

**Formación Sabana (Qsa).** Se halla generalmente suprayaciendo la Formación Subachoque. En superficie, en las partes más altas (páramos) que rodean la Sabana de Bogotá, la Fm. Sabana está presente en forma de depósitos glaciares: morenas laterales y frontales, donde los tills están constituidos por fragmentos de rocas subangulares que pueden llegar hasta bloques. Los páramos generalmente están a más de 3600 m.s.n.m.

De sur a norte aflora en el Páramo de Sumapaz, al sur del Embalse de la Regadera, en donde se encuentran gravas intercaladas con capas gruesas con fragmentos pequeños de roca hasta grandes bloques de arenisca, subangulares a subredondeados dentro de una matriz arcillosa.

La Formación Sabana aflora en los valles de los ríos Tunjuelito, Fucha, San Cristobal y más al norte en el río Subachoque, donde su litología está compuesta por cantos de arenisca, hasta de 40 cm, gravas, intercalaciones de arenas arcillosas, arcillas grises, arcillas orgánicas oscuras y turbas.

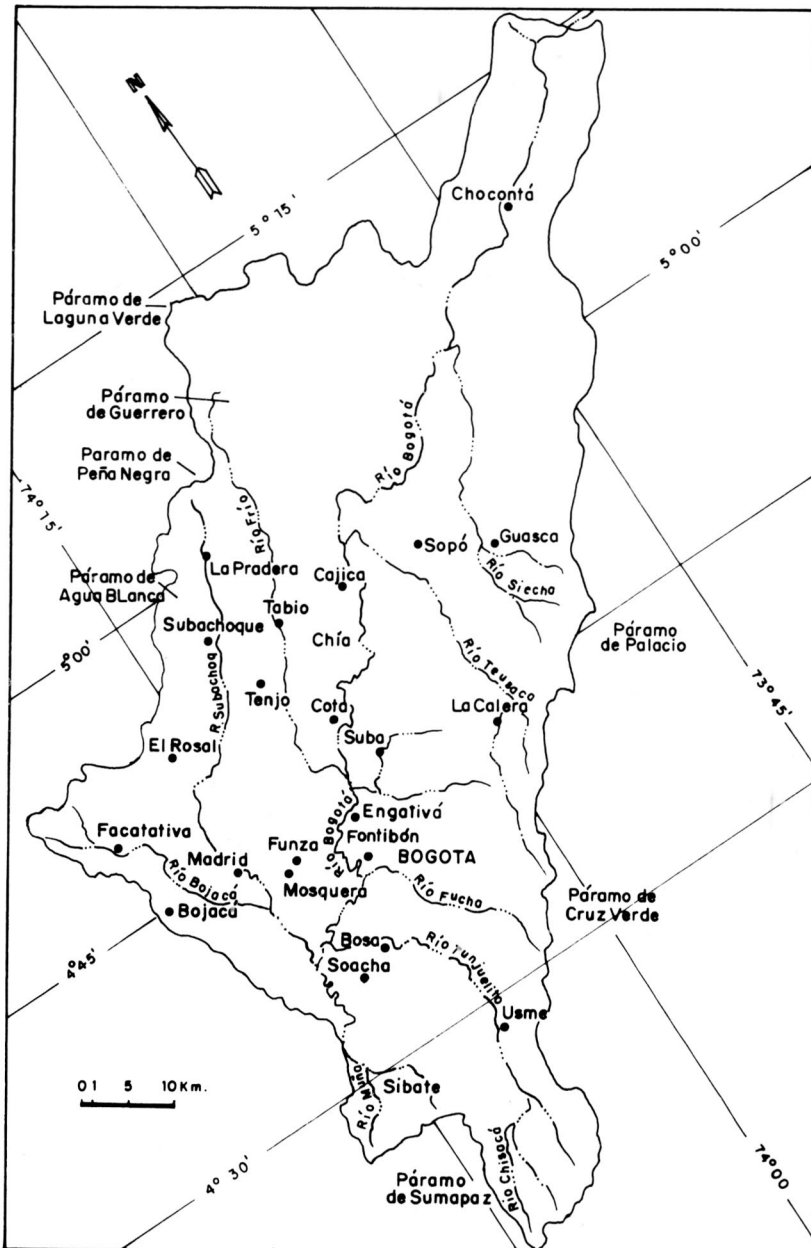
Igualmente aflora en las regiones extensas y secas cercanas a Mosquera, donde los cerros muestran areniscas meteorizadas, y los valles sedimentos limosos y arenosos. También aflora en las pendientes de los cerros cercanos a Soacha con una litología compuesta por limos y arenas, a menudo con fragmentos de rocas subangulares intercaladas con paleosuelos. Forma generalmente depósitos coluviales que pueden pasar a sedimentos lacustres en la planicie.

Al oriente de Guasca, está presente en los grandes sistemas de abanicos aluviales con inclinación suave al sureste y una altitud entre 3050 y 2750 m. El sistema de abanicos está drenado por los ríos Siecha y Chipatá. En los abanicos hay cantos pequeños redondeados y subredondeados, gruesas capas de gravas mal seleccionadas, sedimentos arenosos, arcillas orgánicas y paleosuelos húmicos negros.

La Formación Sabana está presente también en la mayor parte de la parte plana de la Sabana de Bogotá, así como en el cauce del río Bogotá y sus tributarios.

En el subsuelo la Fm. Sabana está constituida principalmente por arcillas. Hacia los bordes de la cuenca hay un incremento en arcillas orgánicas, turba y lignito, arcillas arenosas y arenas arcillosas. Los aljibes aprovechan las capas arenosas. En el pozo estratigráfico Funza II, de la parte central de la cuenca, la Fm. Sabana está constituida principalmente por arcillas parduscas y grises; en la parte





**Fig. 2. Sabana de Bogotá en la Cordillera Oriental de Colombia.**  
Localización geográfica (Tomado de HELMENS  
& VAN DER HAMMEN 1995).

media los testigos muestran pequeñas intercalaciones de arenas. En el Funza II tiene un espesor de 320 m. En el pozo de la Ciudad Universitaria tiene unos 143 m de espesor (HELMENS & VAN DER HAMMEN *op.cit.* p. 119-120). Su ambiente de formación y sedimentación es lacustre. Las numerosas arcillas pueden constituir capas

confinantes. Su edad es Pleistoceno.

La correlación de esta Formación en el subsuelo se facilita por el gran espesor de las arcillas y las contadas capas de arenas. En las columnas litológicas y en registros geofísicos de los pozos se identificarán capas u horizontes guía con relativa facilidad.

## NOCIONES DE HIDRAULICA DE POZOS

Las formaciones productoras de agua se pueden clasificar como acuíferos de acuerdo con la siguiente definición. *Un acuífero* es una formación geológica, parte de una formación o grupo de formaciones que contienen suficiente material permeable saturado para proporcionar agua económicamente aprovechable para alimentar pozos o corrientes superficiales (THEIS 1962, comunicación personal).

Las capas no productoras de agua, o relativamente poco productoras de agua estratigráficamente adyacentes a uno o más acuíferos, deben llamarse capas confinantes o semiconfinantes. Son capas de material impermeable o relativamente permeable. Su conductividad hidráulica puede variar desde cero hasta un valor menor que la del acuífero o acuíferos adyacentes, permitiendo en este último caso la percolación de agua entre acuíferos e inclusive pueden dar agua de su almacenamiento. Su permeabilidad debe ser calificada con un adjetivo, como: impermeable, semipermeable, moderadamente permeable o bastante permeable o similares. Estos calificativos se deben utilizar en lugar de acuífierre, acuífugo o acuífardo (LOHMAN *et al* 1970 p.12).

Los acuíferos más comunes en el subsuelo de la Sabana, se presentan en la Fig. 3. Son los acuíferos confinados (sinónimo de artesianos), y los menos comunes los acuíferos libres (sinónimo de no confinados). No se conoce la presencia, en La Fm. Tilatá, de acuíferos semiconfinados (de goteo); sin embargo, por ser posibles también se explican.

*Acuífero confinado* es un acuífero completamente saturado con agua, cuyos límites superior e inferior son capas confinantes impermeables o bastante impermeables. En los acuíferos confinados la presión hidrostática es mayor que la presión

atmosférica, y el agua en los pozos que los penetran se sitúa por encima de la base de la capa confinante superior. Representa el nivel potenciométrico del sistema.

**Acuífero libre** es un acuífero saturado parcialmente con agua y subyacente por una capa relativamente impermeable. Su límite superior está constituido por el nivel freático, donde la presión hidrostática es igual a la atmosférica.

**Acuífero semiconfinado** es un acuífero completamente saturado con agua, limitado arriba o abajo por una capa semipermeable, con una conductividad hidráulica menor que la del acuífero principal, pero medible. En estos acuíferos al bajar la carga hidráulica (por bombeo generalmente) se generará flujo vertical desde la capa semiconfinante superior hacia el acuífero, porque la capa superior tiene su nivel freático definido. También hay semiconfinamiento cuando la capa superior al acuífero es confinante y la capa inferior semipermeable permite el paso de agua por diferencia con la carga hidráulica del acuífero principal.

Para extraer el agua subterránea se utilizan pozos.

**Pozo de agua** es una estructura hidráulica que si está bien diseñada y bien construida permite efectuar la extracción económica de agua de un acuífero (LAFLEUR 1997).

Cuando un pozo se bombea, se causa una depresión o abatimiento de los niveles de agua, y hay un flujo convergente hacia el pozo, donde los niveles están más bajos que en cualquier otro sitio del acuífero. El agua converge hacia el pozo para reemplazar el agua extraída. Al aproximarse el agua al pozo, hay un aumento continuo de pendiente. La forma de la superficie resultante es un cono, conocido como el *cono de depresión*. La forma de este cono está determinada por las características hidráulicas del acuífero: su *transmisividad* ( $T$ ) y su *coeficiente de almacenamiento* ( $S$ ), dos propiedades fundamentales de todos los acuíferos. THEIS (1935 en CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 834) dedujo la fórmula, que lleva su nombre, y permite deducir la forma del cono de depresión, y calcular la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

La *Fórmula de No Equilibrio de Theis* fue deducida para acuíferos confinados; para aplicarla a acuíferos libres hay que corregir los abatimientos sustrayendo de cada uno el espesor del acuífero al cuadrado dividido por dos veces el espesor del mismo (JACOB 1944, en WALTON 1962 p. 7).

Para acuíferos semiconfinados, HANTUSH & JACOB (1955 en CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 639) desarrollaron la fórmula y la solución correspondiente. Los acuíferos semiconfinados o de goteo son comunes en el relleno aluvial del Valle del río Cauca; en la Sabana pueden ocurrir principalmente en el Grupo Guadalupe, donde la Formación Plaeners actuaría como capa semipermeable semi-confinante.

La *transmisividad* ( $T$ ) es la capacidad de un acuífero de transmitir agua a través de todo el espesor saturado. Es equivalente al producto de la conductividad hidráulica ( $k$  en

m/día) por el espesor saturado ( $m$ ) del acuífero. Se expresa en m<sup>2</sup>/día.

Para clasificar cuantitativamente los acuíferos con valores de transmisividad y conductividad hidráulica se puede utilizar los siguientes valores dados por la Unesco (1977 p. 141), con múltiplos de 10:

$T$ (m <sup>2</sup> /día)	$K$ (m/día)	Características
< 1	$10^{-3}$	Impermeable ("impermeable")
1 - 10	$10^{-3}$ - $10^{-1}$	Semipermeable ("poorly permeable")
10 - 100	$10^{-1}$ -1	Permeable ("Permeable")
100 - 1000	1-10	Muy permeable ("highly permeable")
> 1000	> 10	Extremadamente permeable ("very highly permeable")

A su vez, el autor anota que valores de  $T$  mayores a 100 m<sup>2</sup>/día corresponden a acuíferos que pueden abastecer pozos para irrigación o similares y valores de  $T$  menores a 10 m<sup>2</sup>/día para abastecer pozos domésticos o similares.

La cantidad de agua que puede ser extraída del almacenamiento de un acuífero con un descenso en la carga hidráulica se mide con el coeficiente de almacenamiento, el cual tiene un valor grande para los acuíferos libres, equivalente al valor del rendimiento específico del material constituyente, y tiene un valor pequeño para los acuíferos confinados, en los cuales depende, en general, del módulo de plasticidad del cuerpo sólido del acuífero y del módulo de elasticidad del agua (LOHMAN 1972 p. 9).

El *coeficiente de almacenamiento* ( $S$ ) se define como la capacidad que tiene un acuífero de tomar o dar agua de su almacenamiento, por unidad de área y por unidad de cambio en la carga hidráulica normal a esa superficie (THEIS 1938 en LOHMAN *op.cit.* p. 8).

Los valores característicos de  $S$  para los acuíferos semiconfinados se toman de CUSTODIO & LLAMAS (1976 p. 678); para los otros acuíferos, se toman de LOHMAN (1972 *op. cit.*).

3,50 x  $10^{-1}$  a 1 x  $10^{-2}$  para acuíferos libres  
 $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-4}$  para acuíferos semiconfinados  
 $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-5}$  para acuíferos confinados.

La *Fórmula de No Equilibrio de Theis* es:

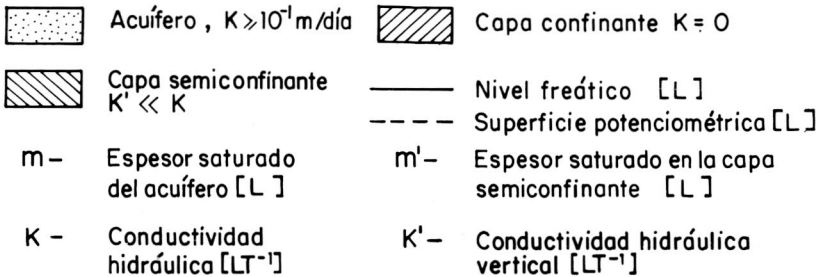
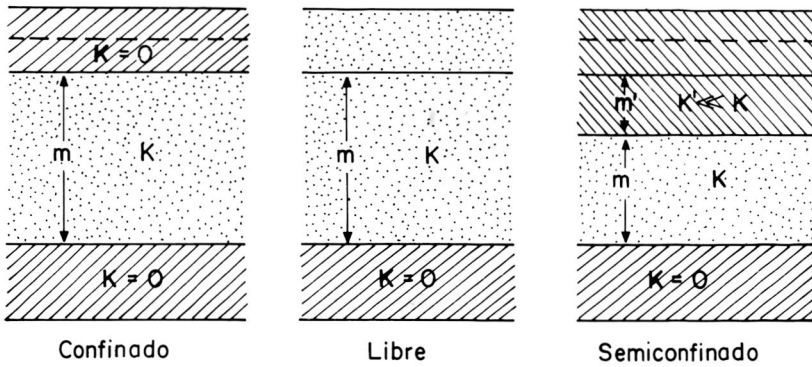


Fig. 3. Acuíferos confinado, libre y semiconfinado.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$$

Donde:

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad \text{no tiene dimensiones.}$$

$s$  (abatimiento). Dimensiones (L).

$r$  (distancia). Dimensiones (L)

$Q$  (descarga). Dimensiones ( $L^3 T^{-1}$ ).

$t$  (tiempo). Dimensiones (T)

$T$  (transmisividad). Dimensiones ( $L^2 T^{-1}$ )

$S$  (coeficiente de almacenamiento). No tiene dimensiones

En la *Fórmula de No Equilibrio de Theis*, el radio del cono de depresión está determinado por el valor del límite inferior del integral que incluye: el tiempo de bombeo, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento. La descarga del pozo no afecta el radio del cono de depresión, pero sí su profundidad (abatimiento) de manera directamente proporcional. El abati-

miento también afecta directamente la rata de bombeo. El valor del coeficiente de almacenamiento, por su relación con el tiempo, afecta la rata de crecimiento lateral del cono, siendo éste inversamente proporcional a su valor. La transmisividad afecta a ambos, el radio del cono y su profundidad. El radio del cono, para un tiempo dado, aumenta con un aumento en el valor de la transmisividad, y su profundidad es inversamente proporcional a su valor (THEIS 1940).

Los diferentes factores de la *Fórmula de No Equilibrio de Theis* se obtienen así: El abatimiento ( $s$ ) se mide en el pozo de bombeo o mejor en un pozo de observación situado dentro del cono de depresión, a una distancia ( $r$ ), para diferentes tiempos ( $t$ ), con una descarga constante ( $Q$ ). Las carteras de campo de los dos ensayos de acuíferos presentados en el Anexo 1, ilustran los parámetros medidos.

La solución de Theis se obtiene por medio de los métodos conocidos de la curva tipo, con programas de computador o con la aproximación de JACOB (1946 en CUSTODIO & LLAMAS

1976 p. 685), llamada *Fórmula de No Equilibrio Modificada de Jacob*, que se explica y utilizará para los cálculos de las constantes hidráulicas, en los apartados siguientes.

Si en la *Fórmula de Theis*  $u \leq 0,05$ , la misma se puede escribir con las unidades utilizadas en nuestro medio, con la aproximación de Jacob, así:

$$s = \frac{15,8 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

Donde :  $Q$  (descarga) está en LPS  
 $T$  (transmisividad) está en  $m^2/día$   
 $t$  (tiempo) está en días.  
 $r$  (distancia) está en m.  
 $s$  (abatimiento) está en m.  
 $S$  (coeficiente de almacenamiento). No tiene unidades.

La *Fórmula de Jacob* se resuelve con los métodos, muy conocidos, utilizados en las Figs. 6 y 8.

### Ensayos de Acuíferos

En los informes sobre la hidrogeología de la Sabana de Bogotá (ALVAREZ 1997), se presentan algunos ensayos de acuíferos. ROBLES & ALVAREZ (1993) con base al último inventario de pozos, conocido, realizado entre 1989 y 1990 resumen algunos parámetros para la Fm. Tilatá, que es aprovechado únicamente en dos cuencas, así: 1) En la cuenca del río Subachoque con 400  $km^2$ , hay 27 pozos perforados en Tilatá. Tienen profundidades entre 216 y 424 m. Descargas entre 1-12 LPS. Capacidades específicas entre 0,02-1,7 LPS/m. Transmisividades entre 1-350  $m^2/día$  y coeficientes de almacenamiento de  $4 \times 10^{-3}$ . 2) En el sector Tibitó, Salto de Tequendama y Oriente Bogotano con 776  $km^2$ , hay 23 pozos perforados en el Tilatá. Tienen profundidades entre 200 y 600 m. Descargas entre 2-40 LPS.

Capacidades específicas entre 0,6-1,5 LPS/m, y transmisividades entre 5-400 m<sup>2</sup>/día. No se conoce los valores del coeficiente de almacenamiento.

Los datos del inventario de pozos terminado en 1990 están desactualizados porque en la Sabana se perforan unos 90 pozos al año (ALVAREZ 1997 *op.cit.*). A la gran mayoría, se les corre un ensayo de acuíferos. Los ensayos en general se hacen sin pozo de observación, lo cual presenta algunos inconvenientes considerados más adelante.

Adicionalmente, pocos ensayos cumplen los requisitos técnicos para obtener valores representativos de las características hidráulicas de los acuíferos. Para mejorar el sistema se requiere supervisión directa durante los ensayos, buscando que sean corridos, en lo posible, con pozo de observación. La supervisión directa de los pozos, debería ser realizada por las entidades responsables de la gestión del agua subterránea en la Sabana y en el Distrito Capital (ALVAREZ 1997 *op.cit.*). Permitiría tener cada año información fidedigna de la hidrogeología de la Sabana de Bogotá. Equivaldría a localizar, perforar, diseñar, desarrollar, probar y terminar anualmente unos 90 pozos exploratorios y de producción, cuya información se incorporaría a la previamente compilada, analizada y aceptada. Contratar estudios y no realizarlos directamente impide formar profesionales con experiencia y conocimientos en aguas subterráneas y en la cuenca misma. Así mismo ha impedido, hasta el momento, tener un Departamento de Hidrogeología en las entidades responsables de administrar el recurso hídrico subterráneo.

Conocer los valores de la transmisividad y del coeficiente de almacenamiento para los diferentes acuíferos en las subcuencas de la Sabana es una de las actividades necesarias para estudiar el funcionamiento de los acuíferos.

De la Formación Tilatá se presentan dos ensayos de acuíferos. Ambos se supervisaron directamente y se corrieron con las condiciones necesarias, para que sea posible aplicar la Fórmula Modificada de No Equilibrio de Jacob, explicada previamente y con un pozo de observación. Utilizar un pozo de observación es importante para que las pruebas de acuíferos sean bien ejecutadas, porque los abatimientos se miden de manera técnica, puesto que no están afectados por la ineficiencia del pozo de bombeo, que ejerce su efecto hasta el empaque de grava inclusive. Y no lo hace dentro del cono de depresión (CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 626). Adicionalmente, los niveles de agua fluctuantes, durante el ensayo, en el pozo de bombeo, impiden hacer buenas mediciones del abatimiento. No hay este factor limitante al medir la recuperación en el pozo de bombeo, porque se eliminan las fluctuaciones del nivel ascendente del agua. Sin embargo con el método de recuperación residual no se puede obtener el valor de S.

Sí se pueden calcular T y S utilizando la recuperación

calculada contra el tiempo después de parada la bomba. Método útil, explicado en los libros de hidrogeología.

En los ensayos de acuíferos sin pozo de observación no se obtienen valores representativos para el coeficiente de almacenamiento, porque éste está relacionado con la distancia a la cual se mide el abatimiento en la Fórmula de Theis, y dentro del pozo de bombeo hay influencia de la ineficiencia del mismo.

En la Fig. 4 se presenta el mapa geológico del área donde se localizan los pozos de los ensayos de acuíferos. Las columnas litológicas y registros de tiempo de los pozos supervisados directamente se presentan en las Figs. 5 y 7.

En el sector norte del mapa geológico (Fig.4) se observa que las formaciones Subachoque y Tilatá están aflorando en los dos flancos del sinclinal. También se observa que el pozo 227 II B 257 Yerbabuena 3; con coordenadas 1.032.700 N y 987.00 E, se inicia en superficie en la Fm. Subachoque, la cual en la columna litológica (Fig. 5) se interpreta hasta una profundidad del 144 m. A 144 m. se encontraron las primeras capas de gravas que aumentan en espesor con la profundidad y constituyen los acuíferos del pozo pertenecientes a la Formación Tilatá. Las gravas terminan a 170 m. Aunque la Fm. Tilatá continúa en profundidad. El espesor del acuífero identificado es de 17 m (147 a 164 m de profundidad); fue seccionado con base a la columna litológica y a los registros geofísicos. La resistividad de esta capa permeable es de 133 Ohm.m. El pozo Yerbabuena 3 es el pozo de observación en el ensayo de acuíferos.

En el pozo de bombeo 227 II B 024 Yerbabuena 2, con coordenadas 1.032.670 N y 986.960 E, hay 14 m de espesor (148-162) del mismo acuífero (ROBLES & SAENZ 1991 Anexo 6 p. 2). La distancia entre los dos pozos es de 98 m.

El mapa geológico, Fig. 4, también muestra que en la parte sur, afloran las formaciones Sabana, Subachoque y Tilatá entre otras. El pozo El Paraíso 2, con coordenadas 1.022.320 N y 976.175 E, está localizado sobre la Formación Sabana, la cual se interpreta presente hasta 112 m de profundidad, en la columna litológica de la Fig. 7. A 112 m de profundidad aparecen las primeras arenas de la Formación Subachoque presentes hasta 172 m donde se inician, posiblemente, las primeras gravas de la Fm. Tilatá con un espesor de 98 m para las capas acuíferas aprovechadas por el pozo. La Fm Tilatá va hasta la profundidad total del pozo exploratorio de 280 m, profundidad a la cual se inicia posiblemente la Formación Guaduas con sus arcillas rojas características. El pozo El Paraíso 2 es el pozo de bombeo en el ensayo.

El pozo de observación El Paraíso 1, con coordenadas 1.022.290 N y 976.150 E, fue inicialmente pozo de producción, que sufrió colapso en sus rejillas por lo cual se reemplazó por el pozo El Paraíso 2.



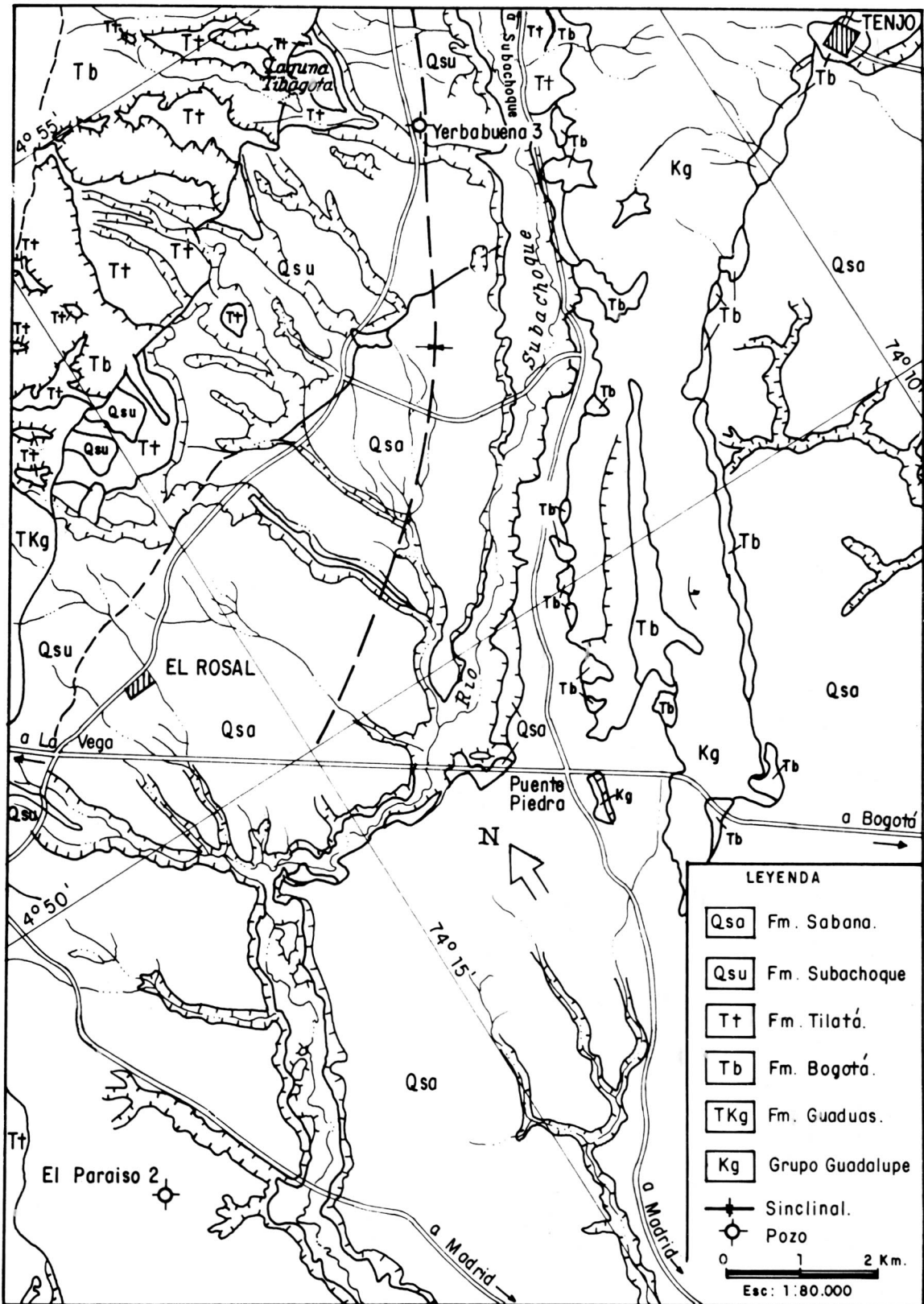
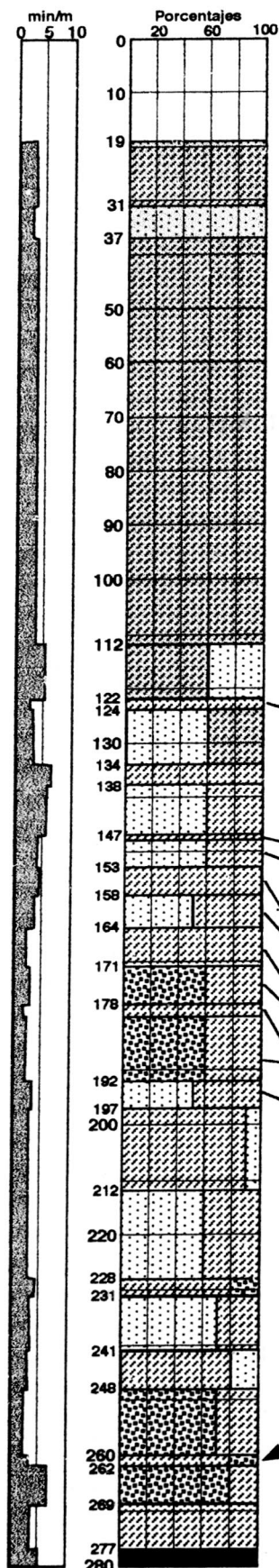


Fig. 4. Mapa geológico y localización de los pozos de los ensayos de acuíferos  
(Modificado de HELMENS & VAN DER HAMMEN 1995, *op. cit.*).



### COLUMNA LITOLOGICA Y REGISTRO DE TIEMPO

POZO: El Paraíso No. 2, Vereda Moyano,  
Mpio. de Facatativá  
COORDENADAS: 1.022.320 N  
976.175 E  
PROFUNDIDAD TOTAL: 280 m  
DIAMETRO: 12 1/4"  
AMPLIACIÓN: De 0 - 166 m, 17 1/2"  
PROFUNDIDAD REVESTIDA: 275,50 m  
Q inicial: 22 LPS N.E.: 76.00 m  
N.B.: 79,33 m Q/s inicial: 6,6 LPS/m  
OBSERVACIONES: Aprovecha acuíferos  
de la Fm. Tilatá, los cuales tienen una  
 $T = 939 \text{ m}^2/\text{día}$  y un  $S = 5,6 \times 10^{-4}$ .  
Resistividades: 25-48 ohm.m  
EFICIENCIA: 82%  
Perforado por Independence Ltda.

#### Posiblemente Formación Sabana

Arcilla y arena gris oscuras; arcilla 60%; arena 40% granos gruesos, esferoidales, subredondeados, regularmente seleccionados de liditas negras y areniscas blancas.

Arcilla gris oscura plástica.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 60% gr. grs, esfers, subredondeados, regularmente seleccs de liditas negras y areniscas blancas; arcilla 40%.

Arcilla gris oscura plástica.

#### Posiblemente Fm. Subachoque

Arena y arcilla gris oscuras; arena 60% gr. grs, esfers, subredondeados, bien seleccs. de liditas negras y areniscas blancas; arcilla 40% plástica.

Arcilla gris oscura plástica.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 60% gr. mds a grs, esfers, subredondeados, bien seleccs. de areniscas blancas y liditas negras; arcilla 40% plástica.

Arcilla gris oscura plástica.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 50% gr. grs, esfers, subredondeados, bien seleccs. de liditas negras y areniscas blancas; arcilla 50%.

Arcilla gris oscura plástica.

Grava arena y arcilla gris oscuras; guijarros 60% finos a mds, esfers, subreds, muy mal seleccs, de liditas negras; arcilla 40% plástica.

Arcilla gris oscura plástica.

Grava y arcilla gris oscuras verdosas; guijarros 60% finos a mds, esfers, subreds, mal seleccs, de liditas negras y areniscas blancas; arcilla 40%.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 50% gr. grs, y mds, esfers, subreds, mal seleccs, de liditas negras y cuarzo lechoso; arcilla 50%.

Arcilla y arena gris oscuras; arcilla 90%; arena 10% gr. grs, esfers, subreds, mal seleccs, de cuarzo lechoso.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 60% granos medios a gruesos esferoidales, subredondeados, mal seleccionados de areniscas blancas y liditas negras; arcilla 40%.

#### Posiblemente Fm. Tilatá

Arcilla y grava gris oscuras; arcilla 80%; grava 20% gr. grs, a muy gruesos esfers, subreds, mal seleccs, de areniscas blancas y liditas negras.

Arena y arcilla gris oscuras; arena 70% gr. grs, a muy gruesos, esferoidales, subreds, mal seleccs, de liditas negras y cuarzo lechoso; arcilla 30%.

Arcilla y arena gris oscuras; arcilla 80%; arena 20% granos gruesos a muy gruesos mal seleccs, esfers, subangulares, de liditas negras y areniscas blancas.

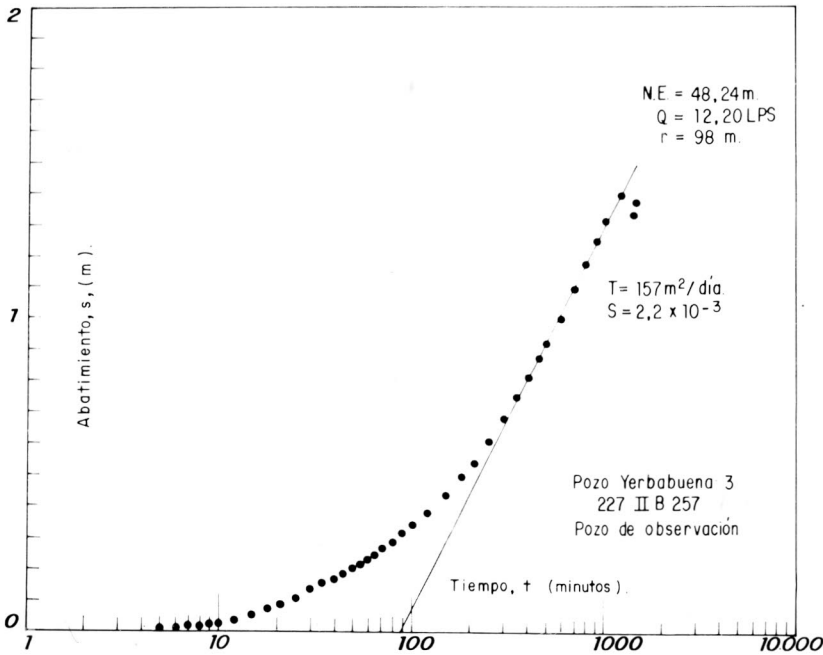
Grava, arena y arcilla gris oscuras; grava y arena 70% gr. muy gruesos, subreds, esfers, mal seleccs, de liditas negras y areniscas balnacas; arcilla 30%.

Arcilla y grava gris oscuras; arcilla 80%; grava 20% granos muy gruesos de liditas negras.

Grava y arcilla gris oscuras; grava 80% guijarros y gr. grs, esferoids subreds, muy mal seleccs, de cuarzo y liditas negras; arcilla 20%, compacta.

Arcilla gris oscura plástica.

Turba café oscura.



**Fig. 6. Ensayo de acuíferos. Método de Jacob resuelto con un programa de computador. Acuíferos de la Fm. Tilatá (Tomado de ALVAREZ 1993, Fig. 8-1). La cartera de campo está en el Anexo 1.**

La distancia entre los pozos El Paraíso 1 y 2 es de 35,60 m. Los registros geofísicos muestran 12 capas permeables de Tilatá en el pozo No. 2 y 10 capas en el pozo No. 1. Las capas con sedimentos permeables alternan, como es natural, con arcillas y dan un espesor total al acuífero de 98 m mencionado previamente. Las resistividades de las capas permeables es de 25 a 48 Ohm.m.

Durante el ensayo, el cono de depresión se estabilizó a los 210 minutos después de iniciado el bombeo con una descarga de 22 LPS (Fig. 8). Cuando se estabiliza un pozo, recibe recarga en cantidad igual a la bombeada. Puede también, recibir menor cantidad de recarga, caso en el cual la pendiente final no es horizontal, como en la Fig. 8, sino que disminuye.

Los valores de la transmisividad calculados (Figs. 6 y 8) son diferentes para los dos ensayos de acuíferos: 157 m<sup>2</sup>/día para el pozo Yerbabuena 3 y 939 m<sup>2</sup>/día para el pozo El Paraíso

2, lo cual se explica evidentemente, en este caso, por la gran diferencia en el espesor de las capas acuíferas. Sin embargo, las conductividades hidráulicas tienen en ambos pozos un valor de unos 9 m/día, y corresponden, junto con las transmisividades, a capas muy permeables, según la clasificación de la Unesco, presentada previamente.

Los coeficientes de almacenamiento son: para el pozo Yerbabuena 3 =  $2,2 \times 10^{-3}$  y para el pozo El Paraíso 1 =  $5,6 \times 10^{-4}$ . Para ambos pozos, corresponden a valores de acuíferos confinados, identificados en las respectivas columnas litológicas (Figs 5 y 7) y registros geofísicos (no presentados en este artículo).

Los valores de las transmisividades se pueden completar con base al conocimiento de las capacidades específicas de los pozos que aprovechen los mismos acuíferos según se explica más adelante. Datos con los que se podría elaborar mapas de transmisividad para toda la Sabana

e igualmente utilizar sus valores en los futuros modelos.

### Radio de Influencia

El radio de influencia de un pozo es la distancia a la cual el cono de depresión no se expande más. Matemáticamente se considera la distancia a la cual el cono de depresión es asintótico al nivel estático. Está determinado por el valor del límite inferior en el integral de Theis, explicado previamente. Depende de las características del acuífero, pero no del caudal de bombeo del pozo. Se expresa así:

$$R = (2,25 T t/S)^{1/2}$$

Donde:

$R$  = radio de influencia en m.

$t$  = tiempo de bombeo en días.

$T$  = transmisividad en m<sup>2</sup>/día.

$S$  = coeficiente de almacenamiento.

Algunas veces, se cree que el radio de influencia debe ser un factor determinante para evitar o eliminar la interferencia entre los pozos. Esta apreciación es errónea y frecuentemente impracticable, principalmente en acuíferos confinados donde los conos de depresión se pueden extender varios cientos de metros y aún kilómetros de acuerdo con el valor de las características hidráulicas de los acuíferos y el tiempo de bombeo. Por lo cual no se puede fijar arbitrariamente (como en la actualidad) el espaciamiento entre pozos de 500 m en la Sabana. Para determinar el espaciamiento entre pozos, hay que conocer el funcionamiento de los acuíferos en cada una de las cuencas de la Sabana.

El siguiente cálculo ilustra la explicación anterior. Para el pozo El Paraíso 2, con los parámetros hidráulicos calculados en la Fig. 8, se tendría un radio de influencia, durante 24 horas de bombeo, de 1.940 m. Para 8 horas de bombeo el radio de influencia

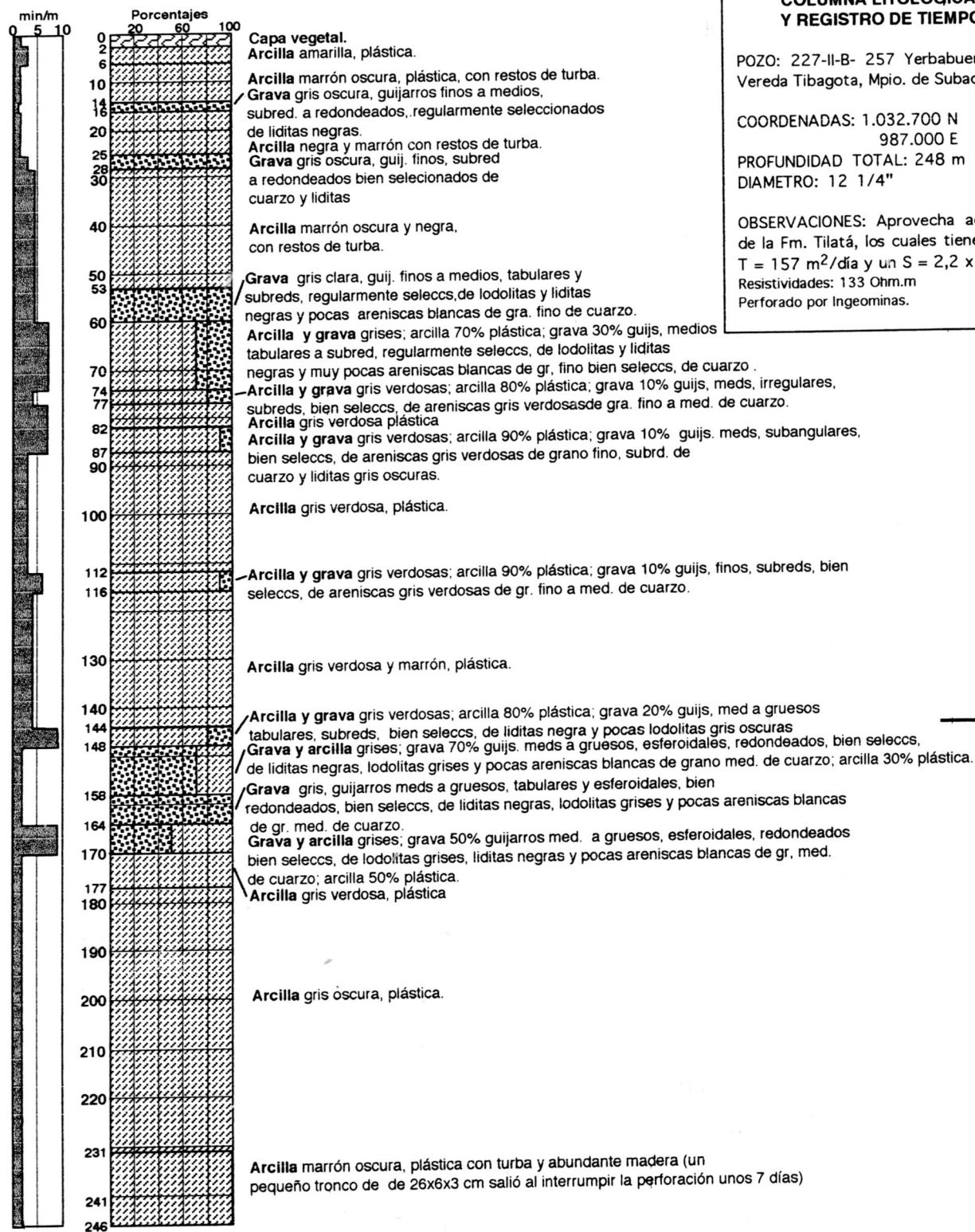
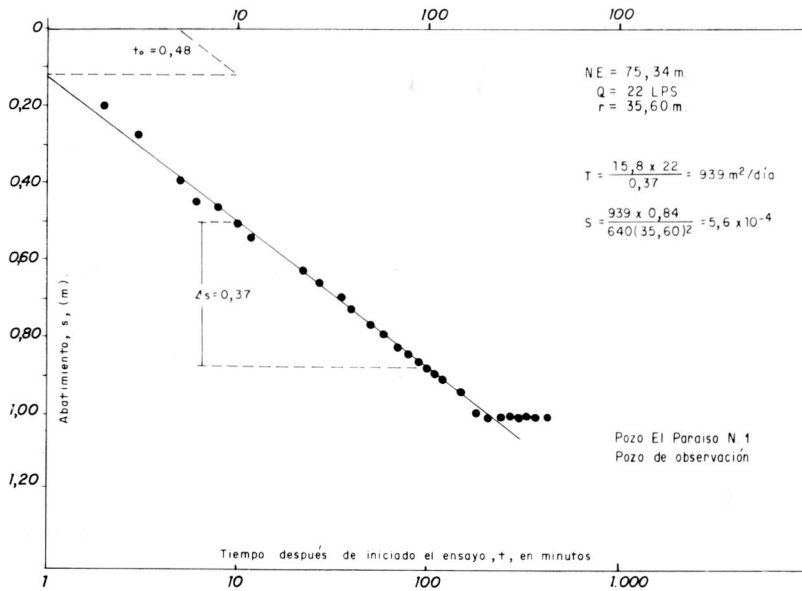


Fig. 7





**Fig. 8. Ensayo de acuíferos. Método de Jacob. Acuíferos de la Formación Tiltá. La Cartera de Campo está en el Anexo 1.**

sería de 1.120 m. Sin embargo, en la práctica, se estabilizó a los 210 minutos (3,5 horas), y para este tiempo se tiene un radio de influencia de 742 m.

### Capacidad Específica

La *capacidad específica* ( $Q/s$ ), de un pozo es posiblemente el parámetro más importante del mismo. Se obtiene al dividir la descarga ( $Q$ ) del pozo por el abatimiento ( $s$ ), después de un tiempo de bombeo. La capacidad específica es función de las características del acuífero, de la extensión del mismo y también es función de las características de terminación de cada pozo. No es estrictamente constante para determinado caudal, ya que con el tiempo el abatimiento aumenta; sin embargo los abatimientos tienden a estabilizarse y por lo tanto la capacidad específica también, para acuíferos confinados (CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 626).

Para acuíferos libres, hay disminución del espesor saturado al bajar el nivel freático por bombeo y

ésto afecta la relación: caudal contra abatimiento. Si el abatimiento se dobla, el caudal no aumenta en la misma proporción. La capacidad específica disminuye con un aumento en el abatimiento; en realidad disminuye en proporción directa al abatimiento (DRISCOLL 1986 p. 217).

Las curvas de caudal contra abatimiento y las curvas de capacidad específica contra abatimiento se llaman *curvas características de un pozo* (CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 626). Según MOGG (1968 p. 8) y BRASSINGTON (1988 p. 135), el caudal máximo de un pozo se puede seleccionar con un ensayo escalonado de 3 ó 5 etapas con caudales crecientes proporcionalmente, si se construye la curva característica de  $Q/s$  contra  $s$ , en papel aritmético, y se selecciona el valor óptimo del caudal que proporcione la mejor capacidad específica, que correspondería a los valores antes de lograr la tendencia horizontal de la curva o valores extrapolados para seleccionar una  $Q/s$  diferente a los utilizados en el ensayo. MOGG (1968 *op. cit.*) reco-

mienda que el ensayo escalonado se haga a una rata  $Q$ , se pare la bomba, se permita la recuperación hasta, o cerca al nivel estático, luego se bombee a  $2Q$  por el mismo periodo de tiempo, se permita la recuperación y se continúe con un bombeo a  $3Q$  por igual periodo. Los tiempos pueden ser de corta duración (por ejemplo 30 minutos cada etapa). La rata  $3Q$  podría seleccionarse como el caudal deseado del pozo.

El tiempo para calcular la  $Q/s$  correctamente se recomienda tomarlo como 24 horas. Sin embargo ésto, en la práctica, es difícil de cumplir. Entonces, se podría tomar un tiempo ( $t_c$ ) en el cual el almacenamiento dentro del revestimiento del pozo sea despreciable o nulo. DRISCOLL (1986 p. 233) transcribe una fórmula de PAPADOPULUS & COOPER (1967) y RAMLEY *et al* (1973) para calcular el  $t_c = 1,97 \times 10^{-4} (D^2 - d^2) / (Q/s)$ . En la cual  $t_c$  está en minutos;  $D$  es el diámetro interior del revestimiento en mm;  $d$  es el diámetro exterior de la tubería de descarga de la bomba en mm; y  $Q/s$  está en LPS/m.

La dificultad para calcular  $t_c$  radica en que hay que conocer la capacidad específica y ésta última es, a su vez, el factor que se pretende calcular. Entonces se recomienda realizar cálculos tentativos de  $t_c$ , con valores conocidos o asumidos de la  $Q/s$  del pozo, lo cual generalmente es posible.

La capacidad específica es indispensable para seleccionar la bomba y se podría llamar el certificado de nacimiento de un pozo según LAFLEUR (1987). Si su valor cambia, después de entregado al servicio el pozo, se debe estudiar y remediar tal cambio. Un aumento podría indicar un desarrollo insuficiente inicial. Una disminución, de su valor, una causa que implique tener menor cantidad de agua disponible para el bombeo, lo cual hay que investigar, identificar y remediar.

Conociendo la  $Q/s$ , en LPS/m, de un pozo y utilizando la fórmula anterior

de Jacob, se puede estimar la transmisividad  $T$ , en  $m^2/día$ , para acuíferos confinados con la relación siguiente:

$$Q/s = T/120$$

En la fórmula de Jacob, para obtener el valor constante se tomaron los parámetros siguientes  $t = 1$  día;  $r = 0,15$  m.;  $T = 400$   $m^2/día$ ; y  $S = 1 \times 10^{-3}$ . Al variar notablemente uno o varios factores considerados, se cambiaría el valor constante.

La capacidad específica también sirve para calcular la eficiencia de un pozo y para comparar pozos entre sí. Por ejemplo, un pozo con una  $Q/s = 40$  LPS/20 m = 2 LPS/m y otro con una  $Q/s = 40$  LPS/10 m = 4 LPS/m, indica que el segundo da 2 veces más agua que el primero por cada metro de abatimiento.

### Eficiencia del Pozo

Calcular la eficiencia del pozo podría llegar a ser una condición contractual en la perforación de pozos. Para obviar posibles conceptos confusos sobre eficiencia de un pozo, se toma la definición de MOGG (1968 p. 3): Es la relación de la capacidad específica real del pozo después de 24 horas de bombeo a la máxima capacidad específica teórica, calculada con las constantes hidráulicas del acuífero y la geometría del pozo también para 24 horas de continuo bombeo. Entonces, esta definición para 24 horas de bombeo se puede expresar con la siguiente relación:

$$Eficiencia = (Q/s \text{ real}) / (Q/s \text{ teórica}) = s \text{ teórico} / s \text{ real}$$

En el pozo El Paraíso 2, la eficiencia del mismo se calculó, con los siguientes valores: Nivel estático 76,00 m. Caudal constante de 22 LPS. Nivel dinámico 79,33 m. Abatimiento 3,33 m después de 210 minutos (3,5 horas) de bombeo, cuando se estabilizó el pozo, según se explicó previamente. Con estos datos se tiene una capacidad específica real ( $Q/s$ ) de 6,6 LPS/m.

Para calcular la  $Q/s$  teórica, se utilizó la fórmula de Jacob, con las constantes hidráulicas obtenidas, para un tiempo de 3,5 horas. Igual al tiempo en el cual se estabilizó el cono de depresión según lo recomienda CUSTODIO & LLAMAS (1976 p. 838). Se procedió así:

$$Q/s = T (15,8 \log 2,25 T t / r^2 S)^{-1} = 939 (15,8 \log 2,25 \times 939 \times 0,15 / 0,152 \times 5,6 \times 10^{-4})^{-1} = 8,03 \text{ LPS/m.}$$

Con los valores anteriores se obtiene una eficiencia del pozo de  $6,6/8,03 = 82\%$ , valor similar a los esperados del 70 u 80 % (DRISCOLL 1986 p. 555); y apropiado en el caso presente, porque se diseñó, construyó, desarrolló y terminó un excelente pozo en un acuífero también excelente para

la Sabana de Bogotá.

Los pozos poco eficientes no son económicos por cuanto para bombear el mismo caudal que un pozo eficiente se requieren mayores descensos de nivel y por lo tanto mayor profundidad de bombeo (CUSTODIO & LLAMAS 1976 p. 626).

Con alguna frecuencia, se consideran los ensayos escalonados como una herramienta para conocer la eficiencia de un pozo. Al respecto MOGG (1968 *op. cit.*) dice que después de haber trabajado, durante unos 10 años, en la UOP Johnson Division, con este tipo de ensayos, encontró inconsistencias que lo obligaron hacer una revisión y concluye que: Los ensayos escalonados no pueden usarse para determinar la eficiencia de un pozo porque son únicamente un medio de descubrir si hay un cambio en la capacidad específica con un cambio en la rata de descarga.

DRISCOLL (1986 p. 555-559) complementa y resume lo expuesto por MOGG (1968 *op. cit.*). Explica que la teoría convencional de hidráulica de pozos se basa en la asunción, original de Theis, que hay flujo laminar durante el bombeo. Si el flujo es laminar el abatimiento es directamente proporcional a la rata de bombeo. Sin embargo, en ciertos pozos ocurre flujo turbulento cuando se bombean con grandes caudales. Bajo las condiciones de flujo turbulento la relación lineal de abatimiento y rata de bombeo no se mantiene y parte del abatimiento se relaciona generalmente con un aumento en la rata de bombeo elevada a una potencia mayor de 1.

Cuando hay flujo turbulento la capacidad específica descenderá, a menudo drásticamente, a medida que la rata de descarga aumenta.

Los ensayos escalonados se desarrollaron para examinar el comportamiento de los pozos con flujo turbulento. En los ensayos escalonados, el pozo es bombeado sucesivamente a mayores caudales y se mide el abatimiento para cada caudal. En estos ensayos frecuentemente se deja recuperar el nivel de bombeo hasta el nivel estático entre cada etapa o escalón. Usualmente se hacen 5 u 8 escalones cada uno, con duración de 1 ó 2 horas.

La fórmula de Jacob puede expresarse, con condiciones de flujo laminar, así:

$$s = 15,8 Q T^{-1} (\log 2,25 T t / r^2 S) = Q B$$

$$\text{Donde } B = 15,8 T^{-1} (\log 2,25 T t / r^2 S)$$

$B$  depende del tiempo. Sin embargo, los cambios de  $B$  son mínimos después que ha pasado un tiempo y se puede, entonces, asumir que tiene un valor constante. Si hay flujo turbulento, JACOB (1946 en DRISCOLL 1986 *op. cit.*) dedujo que el abatimiento ( $s$ ) en el pozo puede ser expresado más exactamente como la suma de  $(BQ)$  más  $(CQ^2)$ . Donde  $BQ$

es la componente del abatimiento total debida al flujo laminar o pérdidas del acuífero y  $CQ^2$  es la componente del abatimiento total debida al flujo turbulento más las pérdidas del pozo, que equivalen a las pérdidas de carga causadas por la ineficiencia del mismo. Sin embargo, según DRISCOLL (1986 *op. cit.* p. 557-559) los análisis realizados en pozos reales, en cientos de ensayos escalonados, han mostrado que esta correlación no es correcta, porque el término  $BQ$  casi siempre incluye la mayor parte de las pérdidas del pozo y  $CQ^2$  ocasionalmente incluye algunas pérdidas del acuífero. Por esta razón los cálculos de eficiencia a partir de los ensayos escalonados resultan con valores erróneos.

Los ensayos escalonados son útiles, sin embargo, para los fines mencionados previamente, que relacionan  $Q/s$  contra  $s$ ; así como para conocer el porcentaje de pérdida total de carga hidráulica atribuida al flujo laminar, la cual no debe confundirse con la eficiencia del pozo (DRISCOLL 1986 *op. cit.* p. 559).

## CONCLUSIONES

La Formación Tilatá contiene varios horizontes acuíferos, que son aprovechados por pozos con altos caudales y altas capacidades específicas para los promedios de la Sabana de Bogotá. De estudios detallados recientes, dados como referencia, se resume la litología de las Formaciones Tilatá, Subachoque y Sabana.

Se presentan las columnas litológicas y el registro de tiempo de dos pozos que aprovechan los acuíferos de la Fm. Tilatá. Se puede mejorar el conocimiento de esta Formación, con buenos acuíferos, con la descripción adecuada de las columnas litológicas de los pozos perforados en la Sabana. El mejor conocimiento, de la litología, junto con la selección de niveles u horizontes guía permitirá correlacionar correctamente las diferentes formaciones geológicas, en el subsuelo, para entender cada vez mejor la hidrogeología de la Sabana. Las descripciones de las dos columnas litológicas de los dos pozos presentados, ilustran el método de trabajo recomendado.

La construcción y terminación de los pozos, así como los ensayos de acuíferos, es conveniente que sean supervisados por profesionales de las entidades responsables de la Administración del recurso hídrico subterráneo en la Sabana. Al hacerlo, se obtendrían datos fidedignos sobre la hidrogeología de la Sabana, básicos para realizar, en el futuro, la gestión de las aguas subterráneas en esta cuenca del país.

Se presentan dos ensayos de acuíferos de la Formación Tilatá, que muestran valores de 160 y 930 m<sup>2</sup>/día para la transmisividad. Unos 9 m/día para la conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento de  $2,2 \times 10^{-3}$  y  $5,6 \times 10^{-4}$ , que corresponden a acuíferos confinados. Las

características hidráulicas de los acuíferos son fundamentales para hacer modelos con el fin de estudiar el funcionamiento de los mismos.

Se presentan nociones de hidráulica de pozos para contribuir al conocimiento hidrogeológico de los usuarios del agua subterránea. Quienes se espera participen, en el futuro, junto con la Administración en la gestión del agua subterránea en la Sabana de Bogotá.

Con fines didácticos, se calcula el radio de influencia de uno de los pozos con ensayo de acuíferos. El radio de influencia puede alcanzar varios cientos de metros y aún kilómetros en acuíferos confinados y no puede tomarse como criterio de espaciamiento entre pozos.

También con fines didácticos, se explica el concepto de capacidad específica,  $Q/s$ , que es uno de los parámetros más importantes de los pozos terminados, porque depende de las características hidráulicas de los acuíferos, de su extensión, y también de las características de los pozos.

Similarmente, se calcula la eficiencia del pozo El Paraíso 2 terminado en la Formación Tilatá. Determinar la eficiencia podría ser una condición contractual en la perforación de pozos. Los ensayos escalonados no son aplicables para calcular la eficiencia de los pozos. Los pozos poco eficientes no son económicos porque para bombear el mismo caudal que un pozo eficiente requieren mayor abatimiento y por lo tanto mayor profundidad de bombeo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Editor de la Revista, Geólogo Jorge Brieva, quien corrigió, mejoró el manuscrito, y elaboró las columnas litológicas y registros de tiempo de los pozos.

## REFERENCIAS

- ALVAREZ, A. (1993): Hidrogeología del Sector Sisga, Tibitó y Embals de Tominé. Sabana de Bogotá.-Ingeominas.Inf. sin número, ps. 194, Figs.29 Tbs.27. Pls. 25. Anexos 6. Inédito.
- ALVAREZ, A. (1997): Gestión del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.- Geología Colombiana, no. 22, ps. 81-101, Bogotá.
- BACK, W. & HERMAN J. S. (1997): American Hydrogeology at the Millenium: An Annotated Chronology of 100 Most Influential Papers.- Hydrogeology Journal, v. 5, n 4, p. 37-50.
- BRASSINGTON, R. (1988): Field Hydrogeology.- Geological Society of London Professional Handbook Series. Halsted Press p. 175.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. (1976): Hidrología Subterránea. Tomos I y II.- Ediciones Omega, S. A., Barcelona, p. 235
- DRISCOLL, F.G. (1986): Groundwater and Wells.- Johnson Division, St. Paul, Minnesota 55112, p. 1089
- HELMENS, K. F. & VAN DER HAMMEN, T. (1995): Memoria Explicativa para los Mapas del Neógeno-Cuaternario de la

- Sabana de Bogotá. Cuenca Alta del Río Bogotá.- IGAC. Análisis Geográficos, n. 24, p. 91-142.
- LAFLEUR, M. (1987): Captación de Agua Subterránea. Video de 9,6 horas.- UOP Johnson Division. Buenos Aires.
- LOHMAN, S. W. *et al* (1970): Definitions of Selected Ground- Water Terms. Revisions and Conceptual Refinements. A Report of the Committee on Redefinition of Ground Water Terms.- USGS. Open-File Report. p.54.
- LOHMAN, S. W. (1972): Ground-Water Hydraulics.- USGS Professional Paper 708. p 70, Figs 47, Tbs. 19, Pls 9.
- LLAMAS, M. R. (1992): La Sobreexplotación de Aguas Subterráneas.- Riegos y Drenajes, Barcelona, n. 61, p. 18-30.
- MOGG, J. L. (1968): Step Drawdown Test Needs Critical Review.- UOP Johnson Drillers Journal, July-August 1968 p 3-11. Saint Paul, Minnesota 55104.
- ROBLES, E. & ALVAREZ, A. (1993): Hidrogeología de la Sabana de Bogotá.- IV Simposio Colombiano de Hidrogeología y III Conferencia Latinoamericana de Hidrogeología Urbana. Memorias, Tomo I, p. 1-27. Publicación de Ingeominas.
- ROBLES, E. & SAENZ, J. S. (1991): Hidrogeología de la Cuenca del Río Subachoque. Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá.- Informe 2118, Ingeominas, p. 127, Figs. 8, Tbs. 17, Pls. 14, Anexos 9. Inédito.
- THEIS, C. V. (1940): The Source of Water Derived from Wells.- Civil Engineering, v. 10, n. 5, p. 277-280.
- UNESCO (1977): Hydrological Maps.- Unesco WMO, p. 204. Unesco, Paris.
- VAN DER HAMMEN, T. & HOOGHIEEMSTRA, H. (1995): Cronoestratigrafía y Correlación del Plioceno y Cuaternario de Colombia. Memoria Explicativa para los Mapas del Neógeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Cuenca Alta del Río Bogotá.- IGAC Análisis Geográficos, n. 24, p. 51-67. Figs. 2.
- WALTON, W. C. (1962): Selected Analytical Methods for Well and Aquifer Evaluation.- Illinois State Water Survey, Bulletin 49, p. 81. Figs. 76, Tbs. 25, Pls. 4.

*Manuscrito recibido, abril de 1998.*



## ANEXO 1

## CARTERA DE CAMPO DE LOS ENSAYOS DE ACUIFEROS

Pozo Yerbabuena 3 -227 II B 257, pozo de observación, situado a  $r=98$  m del pozo de bombeo con una descarga  $Q = 12,20$  LPS

Pozo El Paraiso 1, pozo de observación, situado a  $r=35,60$  m del pozo de bombeo, con una descarga  $Q = 22$  LPS.

Tiempo( $t$ ) en minutos Abatimiento ( $s$ ) en metros

5	0,01
6	0,01
7	0,02
8	0,02
9	0,03
10	0,03
12	0,04
15	0,06
18	0,08
21	0,09
25	0,11
30	0,14
35	0,16
40	0,17
45	0,19
50	0,21
55	0,22
60	0,24
65	0,25
70	0,27
80	0,29
90	0,32
100	0,34
120	0,38
150	0,44
180	0,50
210	0,54
250	0,61
300	0,68
350	0,75
400	0,81
450	0,87
500	0,92
600	1,00
700	1,10
800	1,18
900	1,26
1000	1,32
1200	1,40
1400	1,34
1440	1,37

Tiempo ( $t$ ) en minutos Abatimiento ( $s$ ) en metros

1	0,08
2	0,20
3	0,27
5	0,39
6	0,45
8	0,46
10	0,50
12	0,54
22	0,62
27	0,66
35	0,69
40	0,72
50	0,76
60	0,79
70	0,82
80	0,84
90	0,86
100	0,87
110	0,89
120	0,90
150	0,94
130	0,99
210	1,00
240	1,00
270	1,00
300	1,00
330	1,00
360	1,00
390	1,00
420	1,00