

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE BOGOTÁ: “UN LABORATORIO EN EL CAMPUS” APORTANDO AL ESTADO DE CONOCIMIENTO DEL SUBSUELO DE LA SABANA DE BOGOTÁ

HYDROGEOLOGICAL CONCEPTUAL MODEL OF THE UNIVERSITY CITY OF BOGOTÁ: “A LABORATORY ON THE CAMPUS”, CONTRIBUTING TO THE STATE OF KNOWLEDGE OF THE SUBSOIL OF THE BOGOTÁ SAVANNA

Torres-Rojas E.¹ & Ángel-Martínez C. E.²

¹Candidato maestría en Ciencias Geología, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. edtorresro@unal.edu.co

²Profesor auxiliar, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. ceangelm@unal.edu.co

Torres-Rojas E., & Ángel-Martínez C. E., (2020): *Modelo hidrogeológico conceptual de la Ciudad Universitaria de Bogotá: “UN laboratorio en el Campus” aportando al estado de conocimiento del subsuelo de la Sabana de Bogotá.* GEOLOGIA COLOMBIANA, Vol. 42. Bogotá, Colombia. pp. 27-40

Manuscrito recibido: 10 de Diciembre 2019; aceptado: 28 de febrero de 2019

Resumen

A partir de la síntesis y correlación de información geológica e hidrogeológica previa, de la reinterpretación de una prueba de bombeo, de la realización e interpretación de 7 pruebas slug, de dos campañas de muestreo anual de aguas subterráneas y de la medición mensual del nivel piezométrico en 7 puntos durante casi dos años, se llegó a un modelo hidrogeológico conceptual para la Ciudad Universitaria de Bogotá (CUB). Se identificaron y caracterizaron tres unidades hidrogeológicas dentro de los primeros 270 m de profundidad en el subsuelo de la CUB, que desde superficie hacia abajo son: UH-1 (acuífero – acuitardo); UH – 2 (acuífero) y UH – 3 (acuitardo). La recarga para los acuíferos someros de la UH-1, estaría relacionada con los episodios de lluvia-infiltración, pero no se descarta que en este sector urbano haya también contribuciones a partir de las fugas del sistema de acueducto. Para las capas acuíferas a mayores profundidades se estima que reciben aportes descendentes verticales a partir de goteo, para el cual se calcularon valores entre 50mm/año y 205mm/año para diferentes acuíferos. Esta última hipótesis parece confirmarse además con los resultados del muestreo hidrogeoquímico, que revelan una evolución desde las aguas sub-superficiales (bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas) hasta las bicarbonatadas sódico – potásicas, correspondientes a las muestreadas en acuíferos a más de 100m de profundidad, indicando una evolución relacionada a un tiempo mayor de residencia y a movimientos de flujo con componente vertical (goteo) hacia abajo entre acuitardos y acuíferos. Se identificaron al menos cuatro sectores dentro de la parte media – baja de la CUB, topográficamente hablando, donde se evidencia el afloramiento de aguas sub-superficiales probablemente relacionadas con la UH – 1. Esto confirmaría la dirección de flujo para agua subterránea determinada para esta unidad (N65°W).

Palabras claves: Modelo hidrogeológico conceptual, Ciudad Universitaria de Bogotá (CUB), Sabana de Bogotá, hidrogeología urbana, agua subterránea, goteo, laboratorio en el campus.

Abstract

From the synthesis and correlation of previous geological and hydrogeological information, the reinterpretation of a pumping test, the realization and interpretation of 7 slug tests, two annual groundwater sampling campaigns and the monthly measurement of the piezometric level in 7 points for almost two years, a conceptual hydrogeological model was reached for the University City of Bogotá (CUB). Three hydrogeological units were identified and characterized within the first 270 m depth in the subsoil of the CUB, which from the surface downwards are: UH-1 (aquifer - aquitard); UH - 2 (aquifer) and UH - 3 (aquitard). The recharge for the shallow aquifers of the UH-1 would be related to the episodes of rain-infiltration, but it is not ruled out that in this urban sector there are also contributions from the leaks of the aqueduct system. For the aquifer layers at greater depths it is estimated that they receive vertical descending contributions from leakage, for which values between 50mm / year and 205mm / year were calculated for different aquifers. This last hypothesis seems to be confirmed with the hydrogeochemical sampling results, which reveal an evolution from sub-surface waters (calcium bicarbonates and calcium-magnesium) to sodium-potassium bicarbonates, corresponding to those sampled in aquifers more than 100m deep, indicating an evolution related to a longer residence time and flow movements with a vertical component (leakage) downwards between aquitards and aquifers. At least four sectors were identified within the lower - middle part of the CUB, topographically speaking, where the outcrop of subsurface waters probably related to the UH - 1 is evidenced. This would confirm the direction of flow for groundwater determined for this unit (N65°W).

Keywords: Hydrogeological conceptual model, University City of Bogotá (CUB), Sabana de Bogotá, urban hydrogeology, groundwater, leakage, laboratory on campus.

1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de la población y los fenómenos de migración hacia las ciudades, se presenta una expansión de áreas urbanas, que trae consigo modificaciones en el medio físico. La hidrogeología urbana pretende conocer el comportamiento de los acuíferos bajo estas nuevas condiciones y comprender como el agua subterránea se relaciona con las edificaciones, vías de comunicación y servicios que constituyen el área urbana (Custodio 2004).

De esta manera, espacios relativamente abiertos pero con una importante intervención antrópica, como la Ciudad Universitaria de Bogotá (CUB), constituyen laboratorios experimentales en los que es posible estudiar el agua subterránea y su comportamiento en relación al ámbito urbano. Numerosos trabajos sobre la estratigrafía (Helmens & Van der Hammen 1994; Torres et al. 2013) e hidrogeología (INGEOMINAS 2002; Lobo-Guerrero 1992; Veloza 2013) han sido realizados en el área de la Sabana de Bogotá. Pero también, estudios más específicos para la CUB como la Zonificación geotécnica y de efectos locales (Alarcón et al. 2007) más concentrados en el comportamiento de los materiales del suelo y subsuelo y no en la hidrogeología.

Así, el presente trabajo pretende generar un modelo hidrogeológico conceptual sintetizando información geológica e hidrogeológica generada lo largo de los más de 80 años de la CUB, pero además, a partir de las mediciones de niveles piezométricos por un periodo de 21 meses, dos campañas de muestreo de aguas subterráneas, la revisión y análisis de una prueba de bombeo y 7 pruebas slug realizadas en piezómetros allí existentes.

1.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza geográficamente en la cordillera oriental colombiana, dentro de la Sabana de Bogotá (Figura 1). La CUB es el campus de la Universidad Nacional de Colombia, que abarca un área total de 164 ha dentro del centro oriente del distrito capital, y cuya construcción empezó a partir de 1937 (OPE-UN 2013)

El rango de alturas para el área de estudio varía entre 2551 y 2557 msnm, lo que le otorga a CUB una morfología relativamente plana, sin embargo su parte más alta es en el sector oriental. El campus se encuentra dentro de la zona moderadamente húmeda de la ciudad, con precipitaciones anuales que oscilan entre 900-1000mm con una distribución bimodal (IDEAM & FOPAE 2007). Se presentan dos periodos lluviosos entre abril y mayo y entre octubre y noviembre, mientras que la temporada seca abarca los periodos de enero y febrero y de julio y agosto.

2. MÉTODOS

En una primera etapa se realizó una recopilación de información disponible dentro de la que se encuentran los resultados de perforaciones realizadas con fines estratigráficos como la sección CUX-CUY, llevada a cabo por el Dr. Thomas Van der Hammen y el entonces Servicio Geológico Nacional en 1957 (Van der Hammen & González, 1963, 1964) y del piezómetro 227-IV-D-103 (Torres 1995). Se consultó también la recopilación de perforaciones realizadas con fines hidrogeológicos

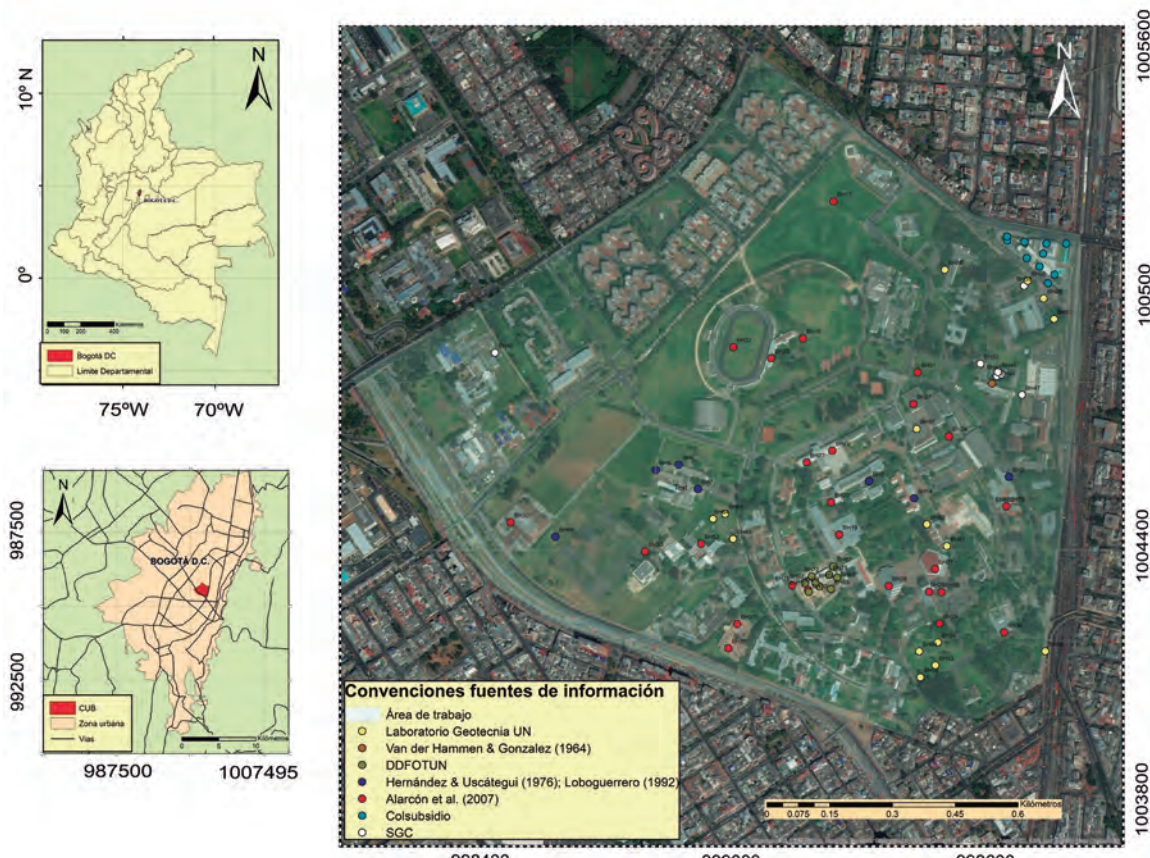


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de las perforaciones utilizadas en el proceso de correlación. En colores se presentan las fuentes de información utilizadas

Figure 1. Location of the study area and the drillings used in the correlation process. In colors, the sources of information used are presented.

de Fandiño (1967) y los informes de perforación y construcción de pozos y piezómetros dentro de CUB y en sus alrededores (Garzón 1993; INGEOMINAS 2000; Morales 2002). Fueron de importancia, además, trabajos con enfoque de geotecnia realizados en el área (Alarcón et al. 2007; Hernández & Uscátegui 1976; INGEOMINAS & UNIANDES 1997) y la información levantada y compartida por el Laboratorio de geotecnia de la UN, en el marco del desarrollo de nuevos edificios en el campus. En total se compilaron 79 perforaciones (Figura 1) con una profundidad que varía entre 25m y 270m.

En una segunda etapa se consolidó un modelo geológico 3D haciendo correlaciones litológicas con la información recopilada utilizando la plataforma libre *Geomodelr*.

Paralelamente, se midieron mensualmente y con sonda, los niveles piezométricos de un pozo y 6 piezómetros, desde mayo de 2017 hasta febrero de 2019. En la actualidad se cuenta con la Red de Monitoreo de aguas subterráneas de la UN (REDMAS-UN) con 18 puntos

en la CUB, con apoyo del Laboratorio de Geotecnia de la UN. A esta red se incorporaron 3 piezómetros recientemente perforados por el Grupo semillero de estudiantes de Hidrogeología del Departamento de Geociencias (UN Recurso hídrico CyS).

De otro lado, se realizaron dos 2 campañas de muestreo de aguas subterráneas en la segunda mitad de los años 2017 y 2018, cada una con 6 puntos muestreados y con el apoyo del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UN. Para la interpretación de los análisis se utilizó el software Diagrammes de la Universidad de Avignon (Smiler 2007)

Posteriormente, se reinterpreto la prueba de bombeo del pozo Ingeominas-1 (INGEOMINAS 2000) y se realizaron e interpretaron 7 pruebas slug llevadas a cabo, entre octubre de 2018 y febrero de 2019 en piezómetros de la REDMAS-UN. Para la reinterpretación de la prueba de bombeo se utilizó la solución para acuíferos semiconfinados de Hantush (1960) y para

la interpretación de las pruebas slug fueron usadas las soluciones de Hvorslev (1951) y de Bouwer & Rice (1976) mediante el software Aqtsolv (Duffield 2007). Finalmente, se realizó una primera aproximación al cálculo del flujo entre acuíferos mediante la aplicación de la metodología para evaluar el goteo a través de acuitardos propuesta por Healy & Cook (2002) con base en el trabajo de Hantush (1956).

Todas las actividades de campo fueron realizadas con el apoyo del Grupo UN Recurso hídrico CyS, adscrito al Observatorio del Agua Ciencias y Saberes (OACYS).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estratigrafía y Modelo Geológico 3D

En la Sabana de Bogotá se presenta una sucesión de sedimentos fluvio-lacustres que da cuenta de los últimos 3.5Ma (Helmens & Van der Hammen 1994). En el área de estudio los sedimentos cuaternarios de la Formación Sabana y la Formación Subachoque, descansan sobre rocas del Paleoceno Superior de la Formación Bogotá.

A partir del proceso de correlación de las litologías en las perforaciones disponibles se generó un modelo geológico en 3D (Figura 2). En este se diferenciaron las capas que conforman las formaciones Sabana y Subachoque. Debido al limitado número de perforaciones que alcanzaban el tope de la Formación Bogotá (en color azul) su posición dentro del modelo es aproximada y se basa en el mapa de profundidad de roca de la Microzonificación sísmica de Bogotá (INGEOMINAS & UNIANDES 1997) producido a partir de información gravimétrica.

A continuación, se procede a describir cada una de las formaciones presentes en el área de estudio de más antigua a más reciente.

3.1.1 Formación Bogotá

Definida por Hubach (1933) en la región de Panga, Choachi. En la CUB, las escasas descripciones que se tienen de ella son acordes a las de Julivert (1963) y Hoorn (1988) en (Montoya & Reyes 2005) en donde consiste de arcillolitas rojas intercaladas con areniscas. En el campus el tope se encuentra a aproximadamente 180m de profundidad y no se conoce su espesor con certeza. A partir del informe de Ingeominas (2000), correspondiente al pozo Ingeominas-1, que tuvo en total 270m de profundidad, y dado que en este informe no hay descripción litológica de la perforación por debajo de los 60 m de profundidad, se dedujo a partir del diseño del pozo y de los registros geofísicos que se atravesó a esta formación aproximadamente en los 90

m finales y de estos, solamente captaron en este tramo horizontes de areniscas que oscilan entre 2 m y 6 m de espesor cada uno, para un total de 16 m. Esas capas captadas de arenisca están intercaladas con capas de arcillolita que oscilan en su espesor individual entre 5 m y 27 m, para un total de 74m. Eso confirma la absoluta predominancia de arcillolitas en esta formación.

3.1.2 Formación Subachoque

Definida por Van der Hammen et al. (1973), está compuesta por arcillas arenosas, arcillas con materia orgánica y turba, intercaladas con arenas arcillosas o arcillas arenosas y gravas (Helmens 1990). Para los perforadores de pozos de agua en la Sabana, ha constituido un objetivo importante durante los últimos 20 años, en sus niveles de gravas y arenas. Ellos la conocen y denominan aún por su antiguo nombre formal (Formación Tilitá). Dentro de la CUB, Van der Hammen et al. (1973), definieron su tope a 148m de profundidad, lo que coincide con la base de la zona VI (cantidades apreciables de granos de polen de alisos) y le da una edad de Cuaternario medio. De esta manera, dentro del campus, la formación se compone de una intercalación de arcillas grises en capas muy gruesas con capas de turba y capas muy gruesas (2m-5m) de arenas de grano fino a medio.

A partir de CUX-CUY, donde tiene 32m de espesor, se correlacionó con otras perforaciones en la CUB.

3.1.3 Formación Sabana

Descrita por Hubach (1952) como depósitos lacustres, paludales y marginales distribuidos en la planicie de la Sabana de Bogotá, compuestos de arcillas plásticas, de arcillas turbosas, restos de maderos, de diatomitas y de arenas finas. Representa el registro sedimentario del ancestral lago de Bogotá. Torres et al. (2013) reconstruyeron la historia de este lago determinando para aquél condiciones de máxima profundidad (aproximadamente 50m) entre 1.23 y 0.86Ma, periodo a partir del cual comenzó un proceso más intenso de sedimentación, con variaciones en los niveles durante periodos glaciares e interglaciares. A partir de perforaciones estratigráficas alcanza un espesor máximo de 320m en el centro de la cuenca cercano a Funza (Helmens & Van der Hammen, 1994).

Esta formación abarca gran parte del espesor de sedimentos correlacionado para este modelo y se distinguieron varios segmentos, por lo que los colores empleados en la figura 2, no siguen el código de colores de la ICS (Cohen et al. 2013) y más bien fueron seleccionados para generar contraste y diferenciación en el bloque diagrama resultante. Así, esta formación descrita de techo a base consta de una intercalación de capas muy gruesas (2m-5m) de limos arcillosos grises y

verdosos (color beige en el bloque diagrama, Figura 3) con capas de turba (en color negro) de hasta 2.5 m de espesor. Se presentan también capas a veces lenticulares de arenas (en color amarillo) de grano fino a grueso con aumento en el tamaño de grano y mayor espesor hacia el E, llegando a ser tamaño grava inclusive. Las capas de arena aumentan su espesor y se hacen más comunes a medida que se descende estratigráficamente (color café en Figura 2), llegando a tener hasta 7m. El espesor medio de esta formación en el sector bajo estudio en la CUB, es de 140.5m.

3.1.4 Formación Chía

La Formación Chía (Helmens 1990) consiste de lodos y localmente incluye limos y arenas de origen fluvial. Cubre las llanuras de inundación de los principales ríos que surcan la Sabana de Bogotá. En el área de estudio se restringe a la zona más oriental (hacia la Carrera 30), en alrededores al río Salitre. Representa los primeros 3.45 metros de la perforación CUX-CUY y su máximo espesor llega hasta aproximadamente 5m (Helmens 1990). Presenta capas de lodo en algunos casos areno-limosos de color habano, con lentes arenosos con espesor de hasta 1m. Su límite inferior se marca por una capa de turba que Van der Hammen & González (1963) identificaron en CUX-CUY a una profundidad de 3.45m. Este límite separa las arcillas de origen lacustre de las llamadas de inundación o de origen aluvial. Los límites de esta formación son difícilmente cartografiables debido a la intervención del terreno, por lo que los presentados en la Figura 2 son susceptibles de cambio.

3.2 Parámetros hidráulicos

Se hizo una reinterpretación de la prueba de bombeo hecha en el año 2000 en el pozo 227-IV-D-103, de aquí en adelante pozo Ingeominas-1 (264 m de profundidad), con un punto de observación (piezómetro, de aquí en adelante denominado 103) localizado a 10m de distancia horizontal y con 150 m de profundidad (INGEOMINAS 2000). A partir de la nueva interpretación se obtuvieron parámetros representativos para la Formación Sabana con los datos del piezómetro y para las formaciones Sabana, Subachoque y Bogotá considerando el pozo.

Se optó por hacer una interpretación independiente pues se consideró que los siguientes factores pudieron afectar la realizada originalmente:

- 1) Posible efecto de almacenamiento en el pozo durante los primeros minutos del bombeo, a partir del análisis de derivadas logarítmicas del abatimiento (Renard et al. 2009). Este fenómeno se puede identificar por la forma de campana en la derivada (en rojo) de la Figura 3a y puede explicarse por la limitada capacidad de la bomba empleada (233 m³/dia) para desalojar los 20.54m³ almacenados en el pozo. Nótese, además, que la derivada no tiende a estabilizarse en los últimos minutos de bombeo y por ende no es recomendable utilizar aproximaciones de línea recta válidas solo para condiciones de flujo radial infinito.

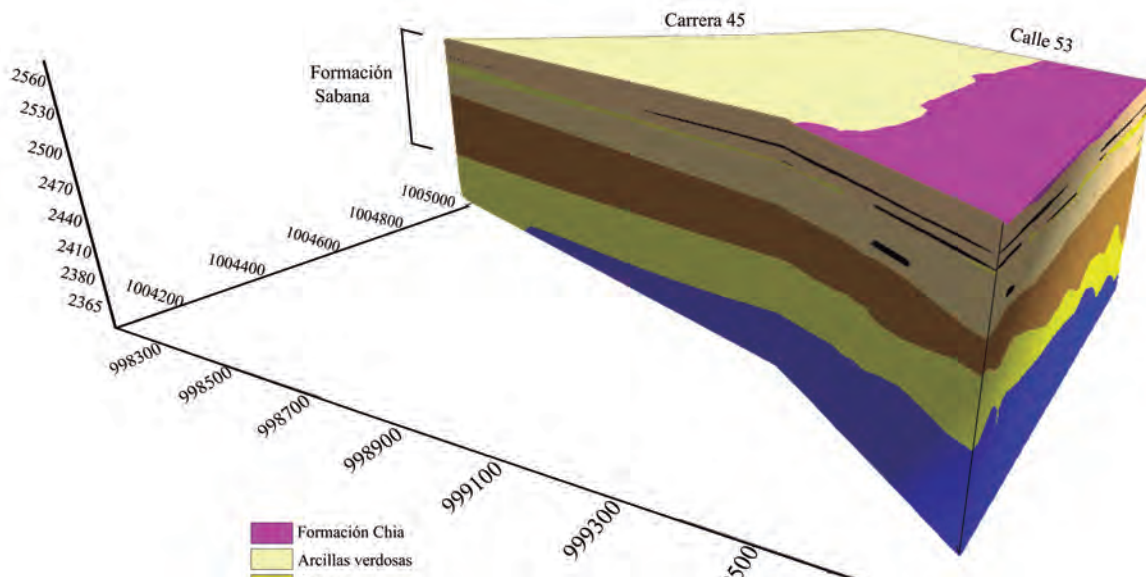


Figura 2. Modelo geológico para la Ciudad Universitaria de Bogotá (CUB). Cada una de las subdivisiones de los ejes x e y, abarca 100m. El modelo presenta una exageración vertical de dos veces respecto a la horizontal. Nótese los puntos de referencia en superficie.

Figure 2. Geological model for the University City of Bogotá (CUB). The subdivision of the axes x and y, covers 100m. The model presents a vertical exaggeration of twice compared to the horizontal. Note the reference points on the surface.

Tabla 1. Parámetros hidráulicos calculados a partir de diferentes modelos de acuífero.**Table 1. Hydraulic parameters calculated from different aquifer models.**

Punto de medición	Método	T (m ² /día)	K (m/día)	S
Ingeominas-1	Theis	20.01	0.74	-----
	Hantush sin almacenamiento	10.02	0.37	-----
	Hantush con almacenamiento	17.77	0.65	-----
	Theis & Jacob (Recuperación)	16.56	0.61	-----
Piezómetro 103	Theis	22.75	0.84	9.5×10^{-3}
	Hantush sin almacenamiento	22.75	0.84	9.5×10^{-3}
	Hantush con almacenamiento	22.06	0.81	9.8×10^{-3}
	Theis & Jacob (Recuperación)	37.29	1.38	-----

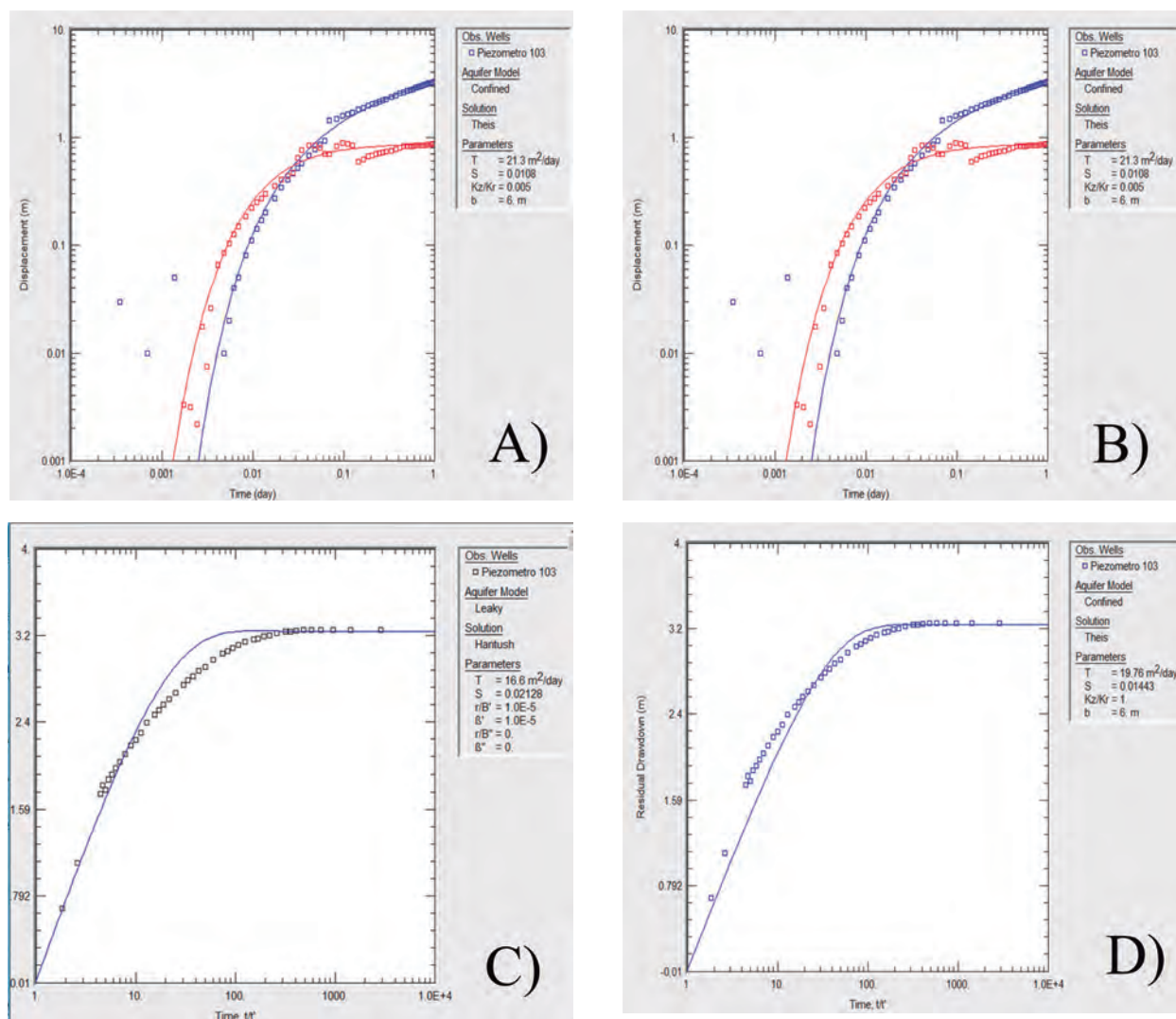


Figura 3. Ejemplos de graficos de los resultados para la reinterpretación de pruebas de bombeo. **A)** Abatimiento vs. tiempo para el piezómetro 103 con solución de Theis (1935) y derivada logarítmica. **B)** Datos de abatimiento vs. tiempo para el pozo Ingeominas-1 junto con derivada logarítmica en rojo **C)** Solución de Hantush (1960) con los datos de recuperación del piezómetro 103. **D)** Solución de Theis (1935) con los datos de recuperación del piezómetro 103.

Figure 3. Examples of graphics of the results for the re-interpretation of pumping tests. **A)** Drawdown vs. time plot for the 103 piezometer, with the Theis (1935) solution. **B)** Drawdown vs. time plot with logarithmic derivative for Ingeominas-1 well. **C)** Hantush (1960) solution for the 103 piezometer residual drawdown. **D)** Theis (1935) solution for the 103 piezometer residual drawdown

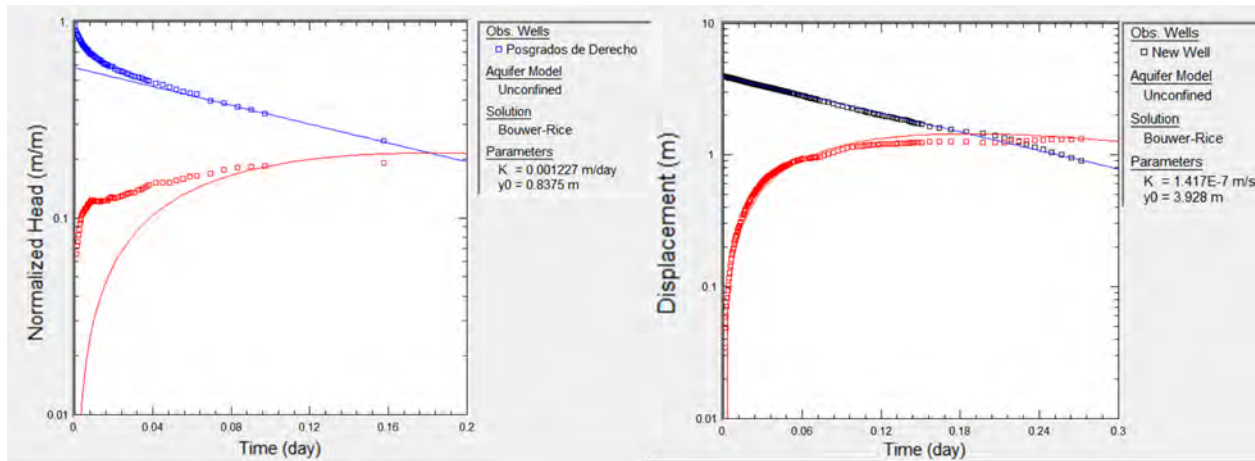


Figura 4. Ejemplo de Interpretación para dos de las 7 pruebas slug realizadas en la CUB mediante la solución de Bouwer & Rice (1976). En color azul se tienen los valores medidos de abatimiento vs. tiempo y en color rojo la derivada logarítmica de dichas mediciones.

Figure 4. Example of interpretation for two of the 7 slug test performed in the CUB through the Bouwer & Rice (1976) solution. In blue color is shown the measured values of drawdown vs. time and in red the logarithmic derivative of such measurements.

Tabla 2. Resultados de permeabilidades calculados a partir de las pruebas slug realizadas en la CUB.

Table 2. Permeability results calculated from the slug tests performed in the CUB.

	Método empleado	
	Bouwer & Rice (1976)	Hvorslev (1951)
	m/d	m/d
ICN	2.47×10^{-3}	4.23×10^{-3}
Posgrados Derecho	1.22×10^{-3}	1.18×10^{-3}
Ingeniería-3	2.22×10^{-3}	3.18×10^{-3}
Aulas de ingeniería	1.10×10^{-4}	1.61×10^{-4}
Pozo de monitoreo 1	1.22×10^{-2}	1.84×10^{-2}
Biología-1	3.30×10^{-4}	5.18×10^{-4}
Pozo de monitoreo 2	7.40×10^{-4}	9×10^{-4}

para este tipo de acuíferos, dando indicios de su carácter semiconfinado.

Así, se optó por darle mayor peso a los datos de recuperación que son más confiables que los de abatimiento cuando no se ha mantenido el mismo caudal a lo largo de la prueba (Kruseman & de Rieder, 2000). Finalmente, se utilizaron soluciones para acuíferos semiconfinados (Hantush 1956, 1960), Los resultados se presentan en la Tabla 1. De allí se adoptaron como representativos para las formaciones ya indicadas los siguientes valores: $S = 9 \times 10^{-3}$, $K = 0.4$ a 0.8 m/d, y $K' = 1 \times 10^{-2}$ m/d a 1×10^{-3} m/d, valores que son consecuentes con el modelo hidrogeológico conceptual elaborado con base en la información de las perforaciones mencionadas.

Adicionalmente, para caracterizar mejor las propiedades de los materiales superficiales de la Formación Sabana y Chía (primeros 2-25m de profundidad), se realizaron 7 pruebas slug en diferentes piezómetros ubicados dentro del campus y seleccionados entre los existentes para ser representativos por su distribución espacial. Este tipo de ensayos proveen de manera relativamente rápida, económica, simple e in situ una caracterización para materiales con baja conductividad hidráulica (Butler 1998). Los resultados de la interpretación de estas pruebas mediante métodos de ajuste a líneas rectas (Bouwer & Rice 1976; Hvorslev 1951) se presentan en la Tabla 2 y un ejemplo de los datos de abatimiento con su derivada y la solución en la Figura 4. Se encontraron valores de la conductividad hidráulica típicos para limos y arenas arcillosas, que responden lentamente a cualquier perturbación en el nivel piezométrico, tal como se esperaba. Igualmente son congruentes con la litología descrita en las respectivas perforaciones, con los valores calculados a partir de ensayos geotécnicos de consolidación (C. Reina, comunicación personal 2019)

- Comportamiento anómalo exhibido por el punto de observación expresado como un salto en el abatimiento (Figura 3b), y no estabilización de la derivada, con las mismas implicaciones descritas anteriormente para el pozo.
- Preliminarmente, no se obtuvo un buen ajuste de los datos con un modelo para acuífero confinado usando la solución de Theis (1935) (Figura 3c), adicionalmente los resultados para el coeficiente de almacenamiento (S) fueron mayores a lo esperado

y con rangos establecidos para el valor de K en estos materiales (Freeze & Cherry 1979). Un comportamiento observado es la variación lateral en las propiedades medidas llegándose a encontrar una variación en dos órdenes de magnitud en menos de 100m, debidas a características intrínsecas del material, dando una idea de la complejidad en la caracterización de estos materiales, lo cual no se contradice con el tipo de depósitos sedimentarios que

representan, es decir estratos lenticulares con extensión limitada de origen fluvio - lacustre.

De esta manera, las arcillas y limos de las formaciones Sabana y Chia en su parte somera del subsuelo de la CUB, constituyen acuitardos con valores de K en un rango de 1×10^{-2} m/día hasta 1×10^{-4} m/día, que se consideran representativos y acordes con su litología.

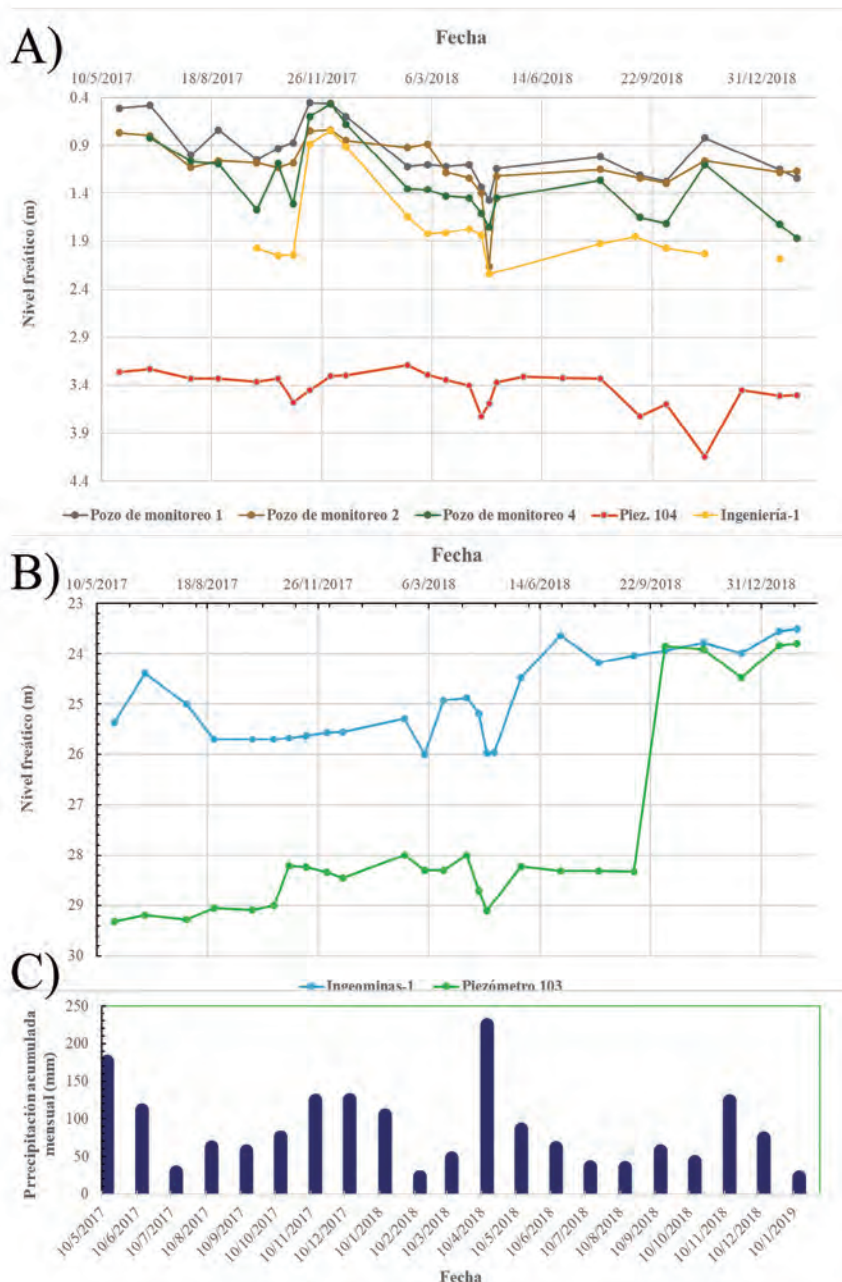


Figura 5 A) Niveles freáticos en piezómetros que captan de los primeros metros de las formaciones Sabana y Chía (3-6m) y de niveles más profundos (33m). **B)** Niveles freáticos del pozo Ingeominas-1 y del piezómetro 103. **C)** Precipitación acumulada para la estación automática del IDEAM de la UN.

Figure 5 A) Piezometric levels for the upper part of the Chia and Sabana Formation (3-6m) and for some deeper aquifer levels (33m) of the Sabana Formation. **B)** Piezometric levels at the Ingeominas-1 well, and piezometer 103. **C)** Cumulative precipitation at the IDEAM's automatic station located in the CUB.

3.3 Niveles piezométricos y precipitación

Los resultados de las mediciones del nivel piezométrico durante 21 meses en piezómetros escogidos de la CUB se presentan en la Figura 5. En la parte superior de la Figura 5A se tienen los piezómetros que captan como máximo hasta los primeros 6m del acuífero de la Formación Sabana, representado por arcillas arenosas a limos arenosos. Se presentan dos comportamientos ascendentes: el primero luego del mes de mayo/17 y el segundo entre los meses lluviosos de noviembre y diciembre de 2017 y 2018. Sin embargo, para Mayo/18 no hubo ascenso sino descenso de los niveles a pesar del aumento de la precipitación. Por tanto parece haber una relación entre precipitación y ascenso de niveles, pero aún hay aparentes inconsistencias. Para el pozo Ingeominas -1 y el piezómetro 103 los comportamientos lluvia – niveles piezométricos no parecen estar tan estrechamente relacionados, pero en general se observa una tendencia hacia la recuperación de los niveles en los periodos de lluvia. Es interesante el comportamiento del piezómetro 103 que desde octubre de 2018 presenta niveles anómalamente altos (un salto), para lo cual ya se desechó el error humano en la medición. Es necesario continuar con este monitoreo para evaluar su comportamiento y determinar posibles explicaciones. Se requiere hacia futuro un análisis cuantitativo de la semejanza entre series de tiempo con mayor cantidad de datos. Sin embargo se hace notar que las mediciones se han venido haciendo una vez al mes (un día del mes para todos los puntos de observación), esto podría estar incidiendo en la “imprecisión” de la variación de niveles observada vs. registros diarios de la precipitación.

3.4 Aproximación al flujo entre acuíferos

Healy & Cook (2002) identifican el flujo a través de acuitardos como una importante fuente de recarga para acuíferos confinados (semiconfinados). Tal como se anotó en apartados anteriores, la Formación Sabana es un complejo acuífero en el que las arenas en capas tabulares a lenticulares son limitadas por capas de arcillas y limos que pueden considerarse como un solo conjunto semipermeable. A partir de estas condiciones, se plantea una posible conexión hidráulica por “goteo” a través de este acuitardo, entre los acuíferos someros y profundos, la cual puede ser cuantificada. Utilizando la expresión de la Ley de Darcy que presentan estos últimos autores y con base en la definición de coeficiente de goteo de Hantush (1956) se tiene

$$R = \frac{Q_c}{A_c} = \frac{k'}{m} \Delta h \quad (1)$$

Donde la tasa de goteo R , equivalente al caudal de agua Q_c que atraviesa una sección A_c de acuífero,

se obtiene de la razón entre la conductividad hidráulica del acuitardo k' y su espesor m multiplicada por la diferencia de la cabeza hidráulica Δh existente entre el acuífero profundo y el acuitardo o un nivel acuífero por encima de aquél.

Tomando como insumo las mediciones de los acuíferos de la Formación Sabana (6m, 34m, 142m, 74m) y la caracterización del acuitardo (mediciones de laboratorio, pruebas slug y de la prueba de bombeo) se puede estimar este flujo. La Figura 6 muestra un esquema del modelo conceptual así planteado e ilustra mediante un diagrama los piezómetros utilizados en los cálculos con la ubicación de sus rejillas en los niveles captados. Se tuvieron en cuenta los resultados de las pruebas slug (Tabla 2) y 18 mediciones mensuales de niveles freáticos para generar valores promedio de goteo en varios escenarios, basados en los 3 órdenes de magnitud hallados para k' , 3 valores de espesor del acuitardo y 3 valores de diferencia de cabeza hidráulica, derivados estos de los resultados de las pruebas slug y bombeo y también de los monitoreos de niveles tal como es ilustrado en la Tabla 3.

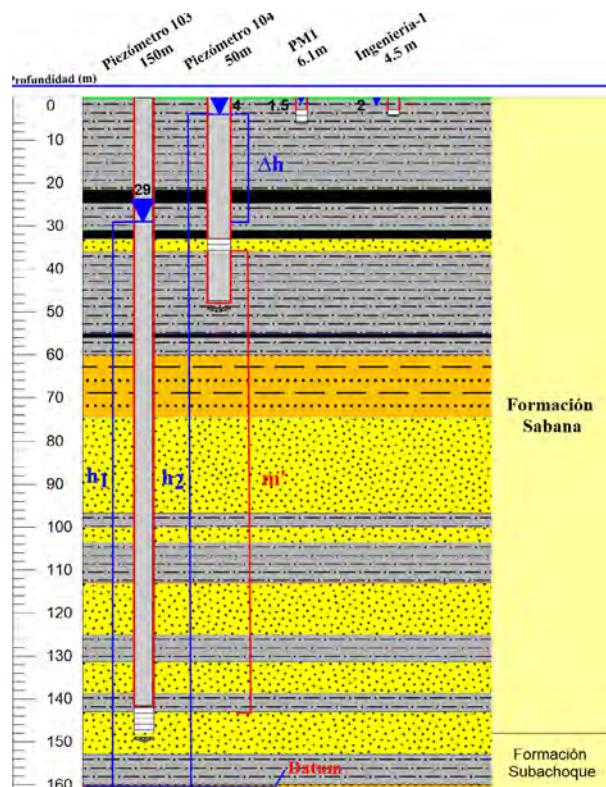


Figura 6. Esquema del diseño de piezómetros utilizados y del modelo conceptual correspondiente en la estimación del flujo entre niveles acuíferos someros y profundos de la Formación Sabana.

Figure 6. Sketch of the design for piezometers used and of the corresponding conceptual model in the assessment of the flow between shallow and deep aquifer levels of the Sabana Formation.

Tabla 3. Resultados de los cálculos para el goteo entre diferentes niveles acuíferos someros y profundos de la Formación Sabana.

Table 3. Results of the calculations for leakage between different shallow and deep aquifer levels of the Sabana Formation.

Piezómetros utilizados	m' (m)	Δh prom. (m)	Goteo (mm/año)		
			$K' = 1.22 \times 10^{-2}$ m/d	$K' = 2.47 \times 10^{-3}$ m/d	$K' = 1.1 \times 10^{-4}$ m/d
Ingeniería-1 - 104	31	1.74	250	50	2
PM 1 - 104	28	2.48	394	79	4
103-104	106	24.55	1031	205	9

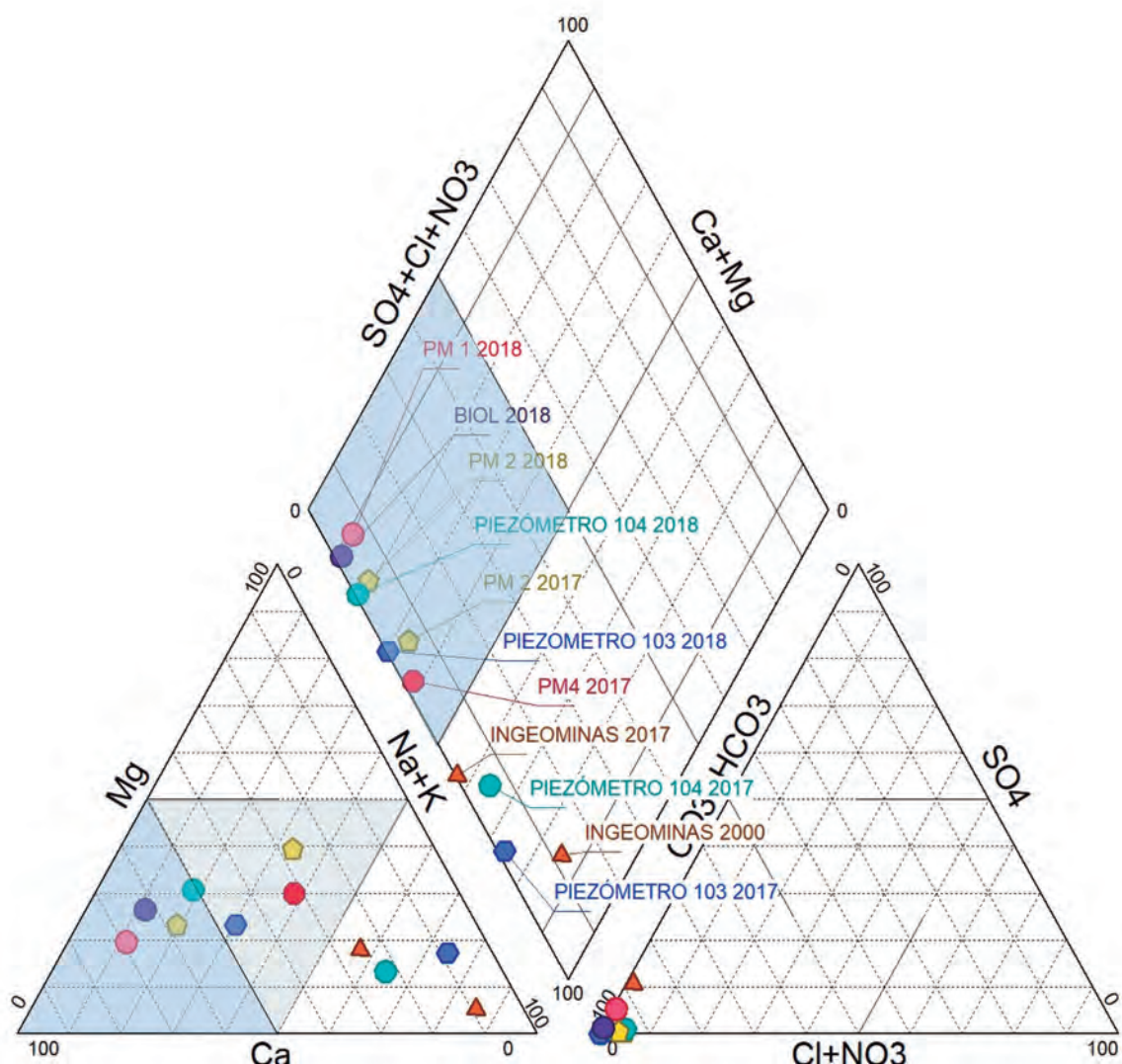


Figura 7. Diagrama de Piper para las muestras analizadas. Dentro del diamante se distinguen las facies bicarbonatada cálcico-magnésica (en color azul) y bicarbonatada sódico-potásica (en color rojo). En el diagrama triangular de los cationes (abajo a la izquierda), se distinguen en color azul oscuro la facies bicarbonatada cálcica y en color azul claro la facies bicarbonatada sin iones predominantes.

Figure 7. Piper diagram for the samples analyzed. The bicarbonated calcium-magnesium facies (in blue) and the sodium-potassium bicarbonated (in red) are distinguished within the diamond. In the triangular cation diagram (bottom left), the bicarbonated calcic facies are distinguished in dark blue and the bicarbonated facies without predominant ions in light blue color.

Se descartan los valores de goteo obtenidos para los mayor y menor valor de K' por ser valores extremos. Por tanto se adoptan los valores intermedios, que arrojan valores de goteo entre 50mm/año y 205mm/año.

Esta, aunque una primera aproximación debe ser validada en lo posible con trazadores (v.g. Priestley et al. 2017) y evaluada a partir del monitoreo de niveles piezométricos en otras zonas de la Sabana de Bogotá. Sin embargo no debe descartarse la probable influencia antrópica en la recuperación de los niveles piezométricos, por la influencia de pérdidas en la red de acueducto que reportan Varila & Leal (2018), lo que implicaría un aumento en la cantidad de agua dentro del sistema.

3.5 Hidrogeoquímica

Partiendo de los reportes de análisis físico-químicos para el agua subterránea del pozo Ingeominas-1 (INGEOMINAS 2000) y luego de dos campañas de muestreo realizadas para el presente trabajo en 2017 y 2018, que abarcaron cinco puntos más, es posible tener una visión general del agua subterránea y superficial en la CUB.

En la Figura 7 se visualiza la posición de las muestras dentro del Diagrama de Piper. En primer lugar, se tiene una población de aguas con facies bicarbonatada sin iones predominantes (Figura 7, triángulo azul claro) y bicarbonatada cálcica (Triángulo azul oscuro) para los niveles más superficiales del acuífero de la Formación Sabana, captadas hasta aproximadamente 36m. De otro lado se tiene una población con facies bicarbonatada sódico-potásica (Fig. 7, Campos color rojo) para los puntos que captan niveles acuíferos por debajo de los 100m en las formaciones Sabana, Subachoque y Bogotá, con excepción de la muestra tomada para el piezómetro 103 en el 2018, que se sale de esa tendencia general.

La primera población de muestras representa aguas similares a la meteórica (Biol 2018 en Figura 7), es decir muy cerca de la zona de recarga, en tanto la segunda, presenta diferenciación por motivo del mayor tiempo de residencia del agua en tales sedimentos.

Adicionalmente, la interpretación del diagrama de Piper evidencia para las muestras de los pozos y piezómetros 103 y 104 una tendencia a presentar un enriquecimiento progresivo en calcio y magnesio, a expensas de una disminución del sodio y potasio. Esto sumado a una composición relativamente constante de los aniones es indicativo de un intercambio iónico (Hounslow 1995), que guarda relación con el alto contenido de arcillas en las capas arenosas de la Formación Sabana.

3.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual 3D

Con base en el modelo geológico descrito previamente, y de todos los resultados de ensayos, muestreos y monitoreos anteriormente descritos, a continuación se describen las unidades hidrogeológicas (UH) identificadas para el subsuelo de la CUB. Figura 8.

UH-1

Incluye a las formaciones Chía y Sabana dadas sus características similares desde el punto de vista hidrogeológico y su conexión hidráulica existente. Esta unidad se puede clasificar en principio, como acuíferos locales, someros, con porosidad primaria, de poco espesor, con recursos muy limitados, libres (en su parte más cercana a superficie) variando a semiconfinados, y también lateralmente y verticalmente a acuitardos. A partir de las pruebas slug se determinó para la parte somera esta unidad el valor de K en un rango de 1×10^{-2} m/día hasta 1×10^{-4} m/día, que es consecuente con su litología.

Para la parte profunda (mayor a 36 m) de esta unidad, lo mismo que para las unidades UH-2 y UH-3, se determinaron los siguientes coeficientes hidráulicos: $S = 9 \times 10^{-3}$, $K = 0.4$ a $0,8$ m/d, y $K' = 1 \times 10^{-2}$ m/d a 1×10^{-3} m/d.

UH-2

Corresponde a la Formación Subachoque, que se puede clasificar como acuíferos multicapa con porosidad primaria, de tipo semiconfinado a confinado, de espesor moderado y con recursos limitados.

UH-3

Equivale a la Formación Bogotá, que de acuerdo con la descripción hecha en el modelo geológico, en general se comporta como un acuitardo, formado por intercalaciones menores de areniscas en medio de capas de arcillolitas predominantes. Su porosidad dominante es primaria, pero dado su grado compactación debe tener también porosidad secundaria. Las escasas capas intercaladas de arenisca que pueden constituir acuíferos locales, tienen relativo poco espesor y al ser captadas deben comportarse como confinadas.

La recarga para los acuíferos someros de la UH-1, parece estar relacionada con los episodios de lluvia y su infiltración, pero no se descarta que en este sector urbano haya también contribuciones a partir de las pérdidas del sistema de acueducto. Con respecto a las capas de arenas y areniscas ubicadas a mayores profundidades

se estima que reciben aportes descendentes verticales a partir de goteo. Esta última hipótesis parece confirmarse además con los resultados del muestreo hidroquímico, que revelan una evolución de las aguas sub-superficiales (bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas) hasta las bicarbonatadas sódico-potásicas, correspondientes

a las muestreadas en acuíferos a más de 100m de profundidad, indicando una evolución relacionada a un tiempo mayor de residencia y a movimientos de flujo con componente vertical (goteo) hacia abajo entre acuitardos y acuíferos.

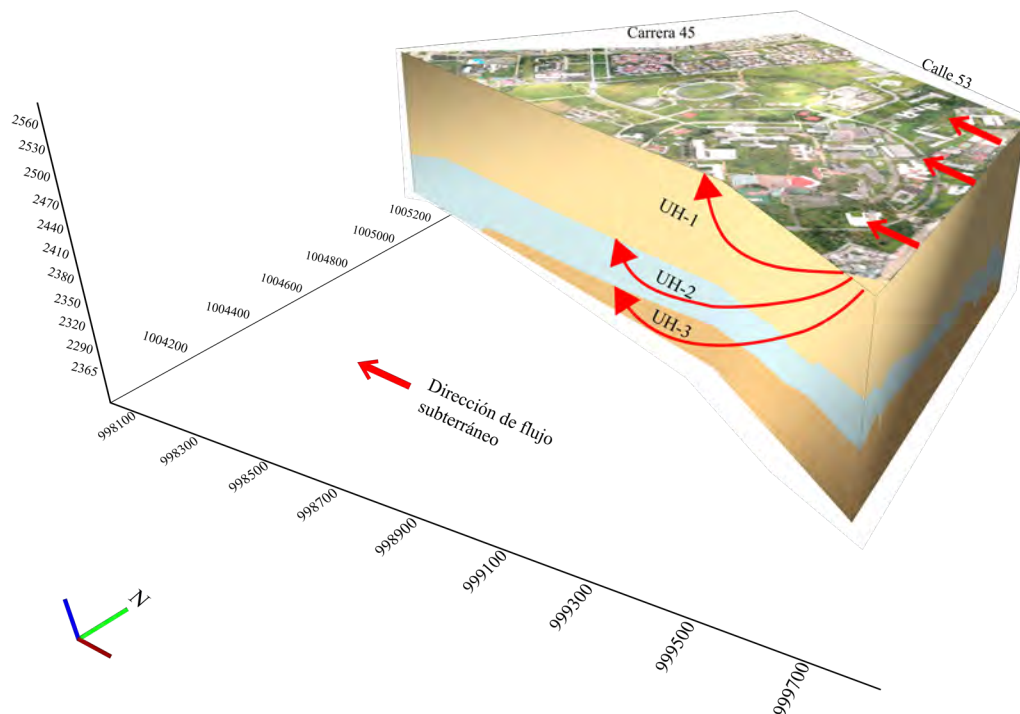


Figura 8. Modelo hidrogeológico conceptual 3D para la CUB con las tres unidades hidrogeológicas diferenciadas dentro de ella. La exageración de la escala vertical es dos veces la escala horizontal. Cada división del eje x e y representa 100m.

Figure 8. 3D Hydrogeological conceptual model for the CUB, with the three hydrogeological units defined there. The vertical exaggeration is twice the horizontal scale. Each of the subdivisions on the x and y axis represents 100m.

En cuanto a sectores con descarga natural se obtuvieron datos de campo al respecto dentro de la zona de estudio, en la pequeña laguna-humedal denominada Mama Dominga, ubicada en inmediaciones del edificio del departamento de Biología y también en sectores pantanosos al costado oriental del edificio de la Hemeroteca Nacional. Igualmente por comunicación verbal (Gabriel Guillot 2017) se conoció que existían zonas pantanosas en inmediaciones del Instituto de Genética y también del edificio de CYT. Estos afloramientos de agua subterránea se relacionan especialmente con sectores relativamente más bajos topográficamente con referencia al sector oriental de la CUB y que deben relacionarse principalmente con aguas sub-superficiales de la UH-1, sin embargo hace falta comprobación al respecto. Esta hipótesis se plantea también con soporte en la determinación de la

dirección de flujo para el acuífero somero de la UH-1, a partir de los piezómetros PM 1, 2, 3 y 4, donde se halló una dirección preferencial N65°W, que se encuentra de acuerdo con la dirección de flujo descrita por Veloza (2013) desde los Cerros Orientales hacia el centro de la Cuenca. Por otro lado dentro de la presente área de estudio no hay extracción de agua subterránea para cualquier propósito mediante captación alguna.

4. CONCLUSIONES

Se identificaron y caracterizaron tres unidades hidrogeológicas dentro de los primeros 270 m de profundidad en el subsuelo de la CUB. Aquellas son desde superficie hacia abajo: UH-1, que es un acuífero – acuitardo; UH – 2, conformando un acuífero de espesor moderado y finalmente UH – 3, que conforma otro acuitardo.

La recarga para los acuíferos someros de la UH-1, parece estar relacionada con los episodios de lluvia-infiltración, pero no se descarta que en este sector urbano haya también contribuciones a partir de las pérdidas del sistema de acueducto. Con respecto a las capas de arenas y areniscas ubicadas a mayores profundidades se estima que reciben aportes descendentes verticales a partir de goteo.

Se identificaron al menos cuatro sectores dentro de la parte media-baja de la CUB, topográficamente hablando, donde se evidencia salida de aguas subsuperficiales probablemente relacionadas con la UH-1. Esto parece confirmar la dirección de flujo determinada (N65°W) para esta unidad.

Es necesario continuar con el monitoreo de niveles en los puntos de agua identificados, ojalá implementando instrumentación para medición continua, y así evaluar mejor su comportamiento y que procesos lo controlan. Se requiere hacia futuro un análisis cuantitativo de la semejanza entre series de tiempo con mayor cantidad de datos. Sin embargo se hace notar que las mediciones hasta la fecha se han venido haciendo una vez al mes (un día del mes para todos los puntos de observación) Esto podría estar incidiendo cierta “imprecisión” de la variación de niveles observada Vs. registros diarios de la precipitación.

Una reinterpretación de una prueba de bombeo realizada en la CUB arroja mejores resultados con el uso de un modelo de acuífero semiconfinado. Una primera cuantificación del flujo de goteo entre capas arenosas separadas por conjuntos semipermeables, a partir de varios escenarios, variando la conductividad hidráulica del acuitardo, y los espesores del mismo dependiendo de varios casos, y también a partir de la diferencia entre la cabeza hidráulica de aquellas capas, da como resultado un flujo oscilando entre 50mm/año y 205mm/año para acuíferos separados por 31m y 106m de acuitardo, respectivamente. Esta, siendo una primera aproximación debe ser validada en lo posible con trazadores y evaluada a partir del monitoreo de niveles piezométricos en otras zonas de la Sabana de Bogotá.

En muestras de agua subterránea tomadas dentro de la CUB es posible diferenciar aguas similares a la meteórica, es decir localizadas muy cerca de la zona de recarga y aguas con tiempo de residencia mayor en el subsuelo, a partir de interpretación de los contenidos de los iones mayores. Es también plausible la existencia de un proceso de intercambio iónico dado el importante componente arcilloso dentro de las arenas de la Formación Sabana.

La CUB es un laboratorio único en Bogotá, para el estudio de las aguas subterráneas, gracias a la infraestructura

con la que cuenta, a las series de tiempo de mediciones que se tienen actualmente y otras que se pueden implementar y también al interés académico sobre el tema que se está despertando, especialmente entre las nuevas generaciones de profesionales en formación a diferentes niveles y de manera transdisciplinaria al interior de la Universidad Nacional por el momento, pero que puede proyectarse a otras instituciones.

Hacia futuro es clave fortalecer el monitoreo continuo de los niveles piezométricos y el muestreo y análisis periódico de las aguas en la CUB, entre otros ensayos posibles, para detectar y entender mejor fenómenos y procesos que ocurren en el subsuelo en relación con la dinámica de las aguas subterráneas y que son muy relevantes para su aplicabilidad a la planeación, diseño y conservación de infraestructura y mobiliario urbano a escala de la CUB, de la ciudad y de la Sabana de Bogotá.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al profesor del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Leonardo Donado, por su apoyo al prestar durante los últimos dos años la sonda para las mediciones de niveles de agua y por sus comentarios enriquecedores. También el apoyo del Laboratorio de Geotecnia de la UN ha sido muy valioso en el desarrollo de la investigación. La profesora Martha Cristina Bustos apoyó incondicionalmente también las iniciativas propuestas por los estudiantes. Finalmente este trabajo no hubiera sido posible sin la financiación de Bienestar Universitario de la UN y sin el apoyo y disposición de los miembros del semillero UNRecurso hídrico del Observatorio del Agua Ciencias y Saberes (OACYS)

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, A., Ávila, G., Díaz, F., Gómez, G., Rodríguez, G., Buitrago, N., & Tovar, R. (2007). *Zonificación geotécnica y de efectos locales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá*. Bogotá.
- Bouwer, H., & Rice, R. . (1976) : *A slug test for determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating wells*. Water Resources Research, 12(3), 423–428.
- Butler, J. (1998): *The design, performance, and Analysis of Slug Test*. 263 p. Lewis Publishers.
- Cohen, K. ., Finney, S. C., Gibbard, P. L., & Fan, J. . (2013) : *The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes*, 36(3), 199–204.
- Custodio, E. (2004) : *Hidrogeología urbana: Una nueva rama de la ciencia hidrogeológica*. Boletín Geológico y Minero, 115(SPEC. ISS.), 283–288. <https://doi.org/0366-0176>

- Duffield, G. . (2007). *Aqtsolv*. Reston, Virginia. Retrieved from <http://www.aqtsolv.com/>
- Fandiño, E. (1967). *Compilación de las perforaciones realizadas en el área de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Freeze, A., & Cherry, J. . (1979): *Groundwater*. 623 p. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N.J.
- Garzón, T. (1993). *Pozo de Agua INEA-1. Bogotá*: Instituto de Ciencias Nucleares y energías alternativas.
- Hantush, M. . (1956) : *Analysis of Data From Pumping Tests In Leaky Aquifers*. Transactions of the American Geophysical Union., 37(6).
- Hantush, M. S. (1960) : *Modification of the Theory of Leaky Aquifers*. Journal of Geophysical Research, 65(11), 3713–3725.
- Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). : *Using groundwater levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, 10(91), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Helmens, K. F. (1990): *Neogene-Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia (stratigraphy, paleoenvironments and landscape evolution)*. 202 p. J. Cramer. Berlin-Stuttgart:
- Helmens, K. F., & Van der Hammen, T. (1994) : *The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): A history of tectonic uplift, basin development and climatic change*. Quaternary International, 21(C), 41–61. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90020-5)
- Hernández, P., & Uscategui, J. (1976) : *Geología de un sector del área urbana de Bogotá y sus posibles implicaciones geotécnicas*. (Trabajo de grado) Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá..
- Hounslow, A. (1995): *Water Quality Data Analysis and Interpretation* (1st ed.). 416 p. CRC Press. Boca Ratón.
- Hubach, E. (1933). *Región de Panga Panga, al norte de Choachi (Departamento de Cundinamarca)*. Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
- Hubach, E. (1952). *Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. Bogotá*: Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
- Hvorslev, M. . (1951) : *Time lag and soil permeability in groundwater observartions. Bulletin of Waterways experiment station Corps of Engineers U.S Army*. Vicksburg, Mississippi.
- IDEAM, & FOPAE. (2007). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca alta del Rio Tunjuelo*.
- INGEOMINAS. (2000). *Antecedentes sobre la perforación y construcción del pozo 227-IV-D-103 INGEOMINAS y resultados de las pruebas de bombeo, Bogotá, Cundinamarca.*, Bogotá.
- INGEOMINAS. (2002): *Modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogota*. 80 p. Bogotá.
- INGEOMINAS, & UNIANDES. (1997). *Microzonificación sísmica de Santafe de Bogotá. Subproyecto No. 19 Ensayos de Laboratorio y campo. Zonificación geotécnica*. Bogotá.
- Julivert, M. (1963) : *Los Rasgos Tectonicos De La Region De La Sabana De Bogotá Y Los Mecanismos De Formacion De Estructuras. Boletin Geologico*. Retrieved from <file:///C:/Users/impresiongeo/Downloads/5782-27595-1-PB.pdf>
- Kruseman, G. ., & de Rieder, N. . (2000) :. *Analysis and evaluation of pumping test data. International Institute for Land Reclamation and Improvement* (Second edi). Wageningen, The Netherlands: International Institute for land reclamation and improvement. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(71\)90015-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(71)90015-1)
- Lobo-Guerrero, A. (1992). *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana*. In *VII Jornadas geotécnicas de la Ingeniería de Colombia* (pp. 1–20). Bogotá. Retrieved from http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogota.pdf
- Montoya, D. M., & Reyes, G. A. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá*. Bogotá: Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas.
- Morales, C. . (2002). *Resultados de la perforación, construcción y análisis del piezómetro 227-IV-D-104*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Priestley, S. C., Wohling, D. L., Keppel, M. N., Post, V. E. A., Love, A. J., Shand, P., Tyroller., Kipfer, R. (2017): *Detecting inter-aquifer leakage in areas with limited data using hydraulics and multiple environmental tracers , including 4 He , Cl / Cl , 14 C and 87 Sr / 86 Sr*, Hydrogeology Journal. 25:2031–2047. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1609-x>
- Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009) : *Understanding diagnostic plots for well-test interpretation*. Hydrogeology Journal, 17: 589–600.
- Smiler, R. (2007). *Diagrammes 4.0*. Laboratorio de Hidrogeología de Avignon. Retrieved from <http://www.lha.univ-avignon.fr>.
- Theis, C. V. (1935) : *The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Eos, Transactions American Geophysical Union, 16(2): 519–524. <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>
- Torres, V. (1995): *Análisis paleoclimático con base en palinología de los sesenta metros superiores del pozo Ingeominas I y su relación con los depósitos lacustres de la Sabana de Bogotá*. (Trabajo de grado) Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá..

- Torres, V., Hooghiemstra, H., Lourens, L., & Tzedakis, P. C. (2013): *Astronomical tuning of long pollen records reveals the dynamic history of montane biomes and lake levels in the tropical high Andes during the Quaternary*. Quaternary Science Reviews, 63, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.004>
- Van der Hammen, T., & González, E. (1963): *Historia de clima y vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá*. Boletín Geológico, 1(1–3), 189–266.
- Van der Hammen, T., & González, E. (1964): *A pollen diagram from the Quaternary of the Sabana de Bogotá (Colombia) and its significance for the Geology of the Northern Andes*. Geol. Mifnbouw, 43, 113–117.
- Van der Hammen, T., Werner, J. H., & Van Dommelen, H. (1973) : *Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-andean biota*, 16.
- Varila, O., & Leal, J. (2018). *Comportamiento de la dinámica hídrica subterránea del Acuífero Formación Sabana a través de la red de monitoreo del Distrito Capital-Bogotá*. In Memorias VI Congreso Colombiano de Hidrogeología (p. 8).
- Veloza, J. (2013). *Sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital Bogotá*. Bogotá.