

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-04-04

Artículos

Modelado geométrico de hidrofacies aplicado al sector norte de Bucaramanga, Santander, Colombia

Geometric modeling of hydrofacies applied to the northern sector of Bucaramanga, Santander, Colombia

Mario Andrés Gómez-Arroyo¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2573-9154>

Oscar F. Sánchez-Ortíz², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9185-468X>

¹Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, mario.gomez4@correo.uis.edu.co

²Grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, oscar.sanchez2@correo.uis.edu.co

Autor para correspondencia: Mario Andrés Gómez Arroyo,
mario.gomez4@correo.uis.edu.co

Resumen

En el sector norte de la ciudad de Bucaramanga, Colombia, las unidades geológicas presentan una configuración litoestratigráfica compleja, con variaciones texturales que involucran un amplio rango granulométrico y porcentaje de matriz variable, siendo de interés su caracterización hidroestratigráfica no desarrollada localmente. Con el objetivo de comprender el sistema agua-suelo, se elaboró un modelo geométrico hidroestratigráfico, a partir de la relación de litofacies e hidrofacies, y la correlación de secciones geológicas, implementando la herramienta *online Geomodelr*. Mediante datos cartográficos recopilados y con el empleo de sondeos y núcleos de perforación de 100 a 150 m de profundidad, se distinguieron y clasificaron cuatro hidrofacies, su distribución y continuidad lateral respectiva, siguiendo una metodología de extensión 3D. El modelo se calibró con información piezométrica y geoeléctrica, evaluando las características geológicas que definen el flujo subterráneo real, con una distribución preferencial general de segmentos gravosos de interés hidrogeológico; segmentos arenosos y arcillosos que, sumados al marco estructural, exhiben las características hidroestratigráficas del área. La generación de un modelo tridimensional de esta índole permite, además de visualizar la distribución de las unidades, determinar el complejo sistema hidrogeológico que conforma el sector, con información de estratigrafía complementada con datos geofísicos y piezométricos.

Palabras clave: hidrofacies, litofacies, modelo geométrico, sistema hidrogeológico, *Geomodelr*.

Abstract

In the northern sector of the city of Bucaramanga, Colombia, the geological units present a complex lithostratigraphic configuration, with textural variations that involve a wide granulometric range and percentage of variable matrix, being of interest its hydrostratigraphic characterization, not locally developed. In order to understand the water-soil system, a hydrostratigraphic geometric model was elaborated through the relationship of lithofacies and hydrofacies and correlation of geological sections, through the online tool Geomodelr. With collected cartographic data and the use of drill cores at a depth of 100 to 150 m, four hydrofacies were distinguished and classified with their respective distribution and lateral continuity, following a 3D extension methodology. The model was calibrated with piezometric and geoelectric information, evaluating the geological characteristics that define the actual underground flow, with a general preferential distribution of gravelly segments of hydrogeological interest, sandy and clayey segments that, added to the structural framework, exhibit the hydrostratigraphic characteristics of the area. The generation of a three-dimensional model of this kind allows, in addition to visualizing the distribution of the units, the determination of the complex hydrogeological system that makes up the sector, with stratigraphic information supplemented with geophysical and piezometric data.

Keywords: Hydrofacies, lithofacies, geometric model, hydrogeological system, Geomodelr.

Recibido: 15/11/2018

Aceptado: 15/11/2019

Introducción

El modelado hidrogeológico tridimensional se fundamenta a partir de características litológicas que destacan un comportamiento hidráulico generalizado de un segmento de rocas determinado; su desarrollo permite visualizar la geometría y distribución lateral de las unidades que lo constituyen, así como su configuración en profundidad, mediante el uso de parámetros estratigráficos como las facies, que como término general se asigna a conjuntos de litología que reúnen características particulares, como pueden ser textura y composición mineralógica (litofacies), y que al ser asociados permiten la deducción de ambientes de formación y agentes de transporte (Teichert, 1958). Este concepto fundamental se aplica en diversas disciplinas de la geología, sufriendo leves modificaciones etimológicas y conceptuales, como en el caso de la hidroestratigrafía, cuya adaptación constituye el término hidrofacies (Poeter & Gaylord, 1990), asignado a niveles interconectados con propiedades hidráulicas relativamente similares y uniformes (Bierkens,

1996; Ouellon *et al.*, 2008) o diferenciados en parámetros hidrogeológicos, como pueden ser porosidad y permeabilidad (Velo, Navarrete, Soria, & Meléndez, 2013), clasificación del agua subterránea con base en el contenido iónico (Hidalgo, Rey, & Dueñas, 2002) y pH (Rivas *et al.*, 1993). Al tener un sistema consistente de hidrofacies, se pueden relacionar esquemas geológicos con sistemas hidrológicos (Maxey, 1964; Monreal, Rangel, Grijalva, Minjarez, & Morales, 2011), y construir unidades y subunidades hidrogeológicas que permitan establecer la presencia, circulación y composición química de las aguas subterráneas, así como sus posibles relaciones con los procesos exógenos que las rigen (Filí, 2001).

En el área urbana de Bucaramanga, Colombia, restringida al sector norte (Figura 1), se realizó el modelo geométrico de las hidrofacies en términos de porosidad-permeabilidad, corroborado y ajustado con información de piezómetros de hilo vibrátil, y tomando como base preliminar la metodología desarrollada por Klingbeil, Kleineidam, Asprion, Aigner y Teutsch (1999) para determinar hidrofacies mediante datos granulométricos y porcentaje de matriz.



Figura 1. Imagen de satélite (*Google Earth*) de la localización del área de estudio, delimitada en rojo, al norte de la ciudad de Bucaramanga, Colombia. El marco geográfico está fuertemente condicionado por dos sistemas de fallas regionales. Un tercer sistema de fallas transversales surge de manera interna modificación de tales esfuerzos.

Marco geológico regional y antecedentes

El sector de estudio se localiza sobre el segmento occidental de la Cordillera Oriental Andina y enmarcado entre el sistema de fallas

Bucaramanga-Santa Marta al oriente, y la falla del río Suárez al occidente, lo que configura un bloque deprimido, posteriormente rellenado por componentes sedimentarios asociados con afluentes provenientes del Macizo de Santander, conformando el Abanico Aluvial de Bucaramanga, al inicio descrito por De Porta (1959). El área se restringe al segmento norte, abarcando una dimensión cercana a los 1.5 km² (Figura 2).

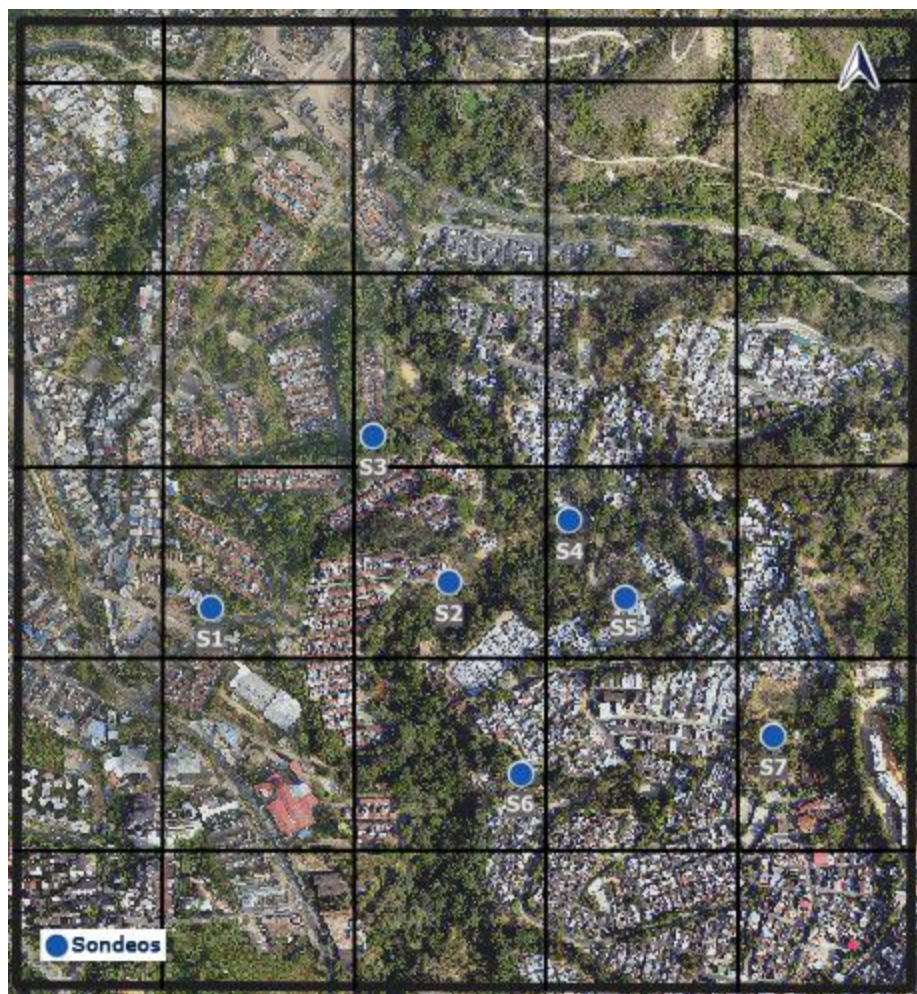


Figura 2. Distribución espacial de los sondeos realizados en el estudio previo. El marco de referencia está delimitado cada 250 metros.
Modificado de UIS-AMB (2017).

La estratigrafía del sector reúne principalmente formaciones sedimentarias asociadas con ambientes marinos epicontinentales y fluviales que corresponden, en orden cronológico, a la Formación Diamante (constituida por calizas fosilíferas, arcillolitas y lodolitas fósiles del periodo Carbonífero Superior, con reportes de chert subordinado); la Formación Tiburón (conformada por conglomerados calcáreos y líticos de edad prejurásica, con fragmentos de guijos y guijarros de calizas predominantemente, areniscas, chert y rocas volcánicas en menor proporción); la Formación Bocas (compuesta por una secuencia de limolitas, areniscas finogranulares y arcillolitas prejurásicas calcáreas de color gris verdoso a oscuro), y la Formación Girón (conformada por areniscas, conglomerados y limolitas de color marrón rojizo) (Ward, Goldsmith, Cruz, & Restrepo, 1973).

El suprayacente Abanico Aluvial de Bucaramanga ocupa el tope estratigráfico del área, siendo subdividido en cuatro miembros (Ingeominas, 2001) mediante criterios texturales y composicionales, constituyéndose, de más antiguo a más joven en miembro Órganos, Finos, Gravoso y Limos Rojos. La cartografía del área de estudio sólo reporta al miembro Órganos, definido por Hubach (1952), que se compone de fragmentos de niveles polimícticos, con granulometría de tipo gravas, alternados con capas limo-arenosas (Bueno & Solarte, 1994), con

una edad del Pleistoceno medio (Geotecnología Ltda., 2005; Suárez & Suárez, 2006), y un ambiente de depositación para todo el abanico aluvial, influenciado por agentes fluviales de carácter torrencial (asociado principalmente con el río Suratá y el Río de Oro), según la heterometría de los cantos y sedimentos (De Porta, 1959). Para el desarrollo del modelo se trabaja con dos unidades internas diferenciadas (de más profunda a más superficial): 1) Órganos inferior, con litologías arcillosas de tonalidad verdosa a amarillenta, poco friable, con presencia de lentes de granulometría superior dispuestos de manera local; 2) Órganos superior, conformados por gravas arenosas y arenas gravosas, con variaciones en la composición de sus clastos y en sus tonalidades, que va desde el rojizo hasta el amarillento (UIS-AMB, 2017).

A escala regional, se desarrolló una caracterización de provincia hidrogeológica de la Cordillera Oriental (IDEAM, 2010), limitada al oriente con la Falla de Guaicáramo; al occidente, con el sistema de fallas del este del Magdalena (Falla de Suaza-Prado-Bituima, Salinas); al norte, con la Falla de Bucaramanga-Santa Marta y el Macizo de Santander-Floresta; y al sur, con el Macizo de Garzón. En tal estudio se define una columna hidroestratigráfica para la provincia de la Cordillera Oriental, utilizando unidades hidrogeológicas según el criterio de porosidad. En una escala más reducida está la definición de un modelo hidrológico sobre la cuenca superior del Río de Oro (Forero, 2012).

Colegial, Forero, Fuentes y Gómez (2017) realizan una descripción hidrogeológica en la fase de meteorización de las rocas del macizo de Santander. Sin embargo, el estudio se enfoca en rocas cristalinas.

Ingeominas (2004) elaboró un modelo geológico-geofísico del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, mediante prospección geoelectrica, caracterizando todos los miembros de la Formación Bucaramanga en términos de resistividad. En este trabajo se resaltan dos resistividades generales en el miembro Órganos, ilustrando una delimitación geofísica de las unidades internas diferenciadas: 1) un nivel fino, con resistividades bajas (equivalente al miembro Órganos inferior), más homogéneo granulométricamente; y 2) un nivel grueso (con valores de resistividad mayores), que correspondería al miembro Órganos superior.

Estos datos fueron utilizados después por Joya y Deantonio (2012) para la construcción de un modelo digital de elevaciones (MDE) de la zona metropolitana de Bucaramanga de las unidades correspondientes al basamento hidrogeológico y las capas acuíferas. Sin embargo, el subsuelo no es caracterizado hidroestratigráficamente.

Gómez y Colegial (2003) segmentan de manera hidrogeológica el subsuelo de Bucaramanga en dos acuíferos principales. El acuífero que incluye el área de estudio se denomina acuífero profundo de Bucaramanga (Gómez & Anaya, 2004), con una tasa lenta de renovación de aguas y con recargas asociadas con flujos de larga distancia.

En el estudio realizado por UIS-AMB (2017) se reporta cerca de los sondeos un caudal de alrededor 0.3 l/s, para la extracción de aguas subterráneas, en una prueba de bombeo para un pozo cercano a los 56 m de profundidad, con un caudal medio por 48 h. Por otro lado, Colmenares y Jiménez (2009) determinan los datos de transmisividad real

que confieren valores de conductividad hidráulica del orden de 10^{-6} m/s. Sin embargo, no se encontró indicada una delimitación, cercana a la zona de trabajo, de las capas geológicas en hidrofacies. No obstante, Villegas y Mero (2017) desarrollan una caracterización hidrogeológica en cercanías al río Tahuando, Ecuador, implementando un proceso establecido con base en parámetros litoestratigráficos mediante la transformación de litofacies en segmentos con condiciones hidráulicas semejantes, pudiendo ser reproducido en el área de este estudio. La metodología agrupa conjuntos de roca con características texturales afines y los relaciona en una única particularidad hidrogeológica. Así, una unidad hidroestratigráfica puede comprender varios segmentos litoestratigráficos y, de igual manera, una formación puede contener varias unidades hidroestratigráficas (Poehls & Smith, 2009).

La base de Villegas *et al.* (2017) es tomada de Klingbeil *et al.* (1999), quienes proponen una relación de litofacies con hidrofacies, teniendo en cuenta la granulometría y matriz de litologías de origen fluvial. El miembro Órganos corresponde a una unidad depositada en un ambiente fluvial con variaciones aluviales de carácter menor (Geotecnología Ltda., 2005), lo que ofrece la existencia de una equivalencia genética que viabiliza el uso de la metodología. El autor propone valores de conductividad hidráulica K promedio. Las litofacies, a su vez, corresponden a una clasificación de tipo, planteada por Miall (1977).

Metodología

Para determinar la geometría de las hidrofacies se requirió información correspondiente a cartografía geológica, estratigrafía, geología estructural y cortes geológicos, proporcionada por UIS-AMB (2017). Con el MDE obtenido por medio de tecnología LiDAR, se generó un mapa topográfico base, después demarcado para la zona de estudio a un área de cerca de 1.5 km². El mapa geológico utilizado corresponde a un modelo simplificado de las unidades aflorantes, tomando como base principal la cartografía planteada por UIS-AMB (2017) y modificado de manera local, siguiendo las delimitaciones cartográficas propuestas por Aldana y Ariza (2000) para el miembro Órganos. Las geformas de deslizamiento y coluviones, los depósitos de terraza, los antrópicos mecanizados, y los antrópicos de desechos se incluyen como una unidad total de depósitos recientes.

El modelo geológico simplificado de la zona norte de Bucaramanga fue construido teniendo como marco de referencia principal la génesis y morfología de un abanico aluvial conceptual (Blair & McPherson, 1994; Figura 2), con un suministro de sedimentos por parte de los procesos fluvio-torrenciales desarrollado en dirección SE-NW. Teniendo en cuenta métodos de información directa, equivalente a siete sondeos delimitados en unidades (Tabla 1), núcleos de perforación, apiques y trincheras, se estableció la continuidad de las unidades con base en criterios de

correlación litoestratigráfica, análisis y comparación de curvas topográficas y pendientes para la determinación de depresiones.

Tabla 1. La tabla muestra la profundidad de la base de cada unidad, en metros, en los sondeos realizados. La columna "Total" representa la profundidad a la que llegó cada perforación.

Núm. del sondeo	Qd	Órganos superior	Órganos inferior	Fm. Bocas	Fm. Tiburón	Fm. Diamante	Total
1	23.4	65	122	130	Ausente	Ausente	130
2	9.1	65.9	107.3	Ausente	114	Ausente	114
3	16.6	25.4	74.5	Ausente	81	Ausente	81
4	10.3	27.8	65.9	Ausente	80.1	Ausente	80.1
5	19.1	30.5	69	Ausente	77	Ausente	77
6	12.1	56.1	133	147	Ausente	Ausente	147
7	17.5	69.7	93.5	Ausente	Ausente	151	151

Qd: depósitos recientes.

Con apoyo de 19 tomografías, tanto longitudinales como transversales a los perfiles, se llevó a cabo una revisión final indirecta y una delimitación geofísica general del subsuelo, con los datos de resistividad propuestos por Ingeominas (2004), calibrando la correlación en sectores distantes a puntos con exploración directa.

La superficie correspondiente al contacto basal de la Formación Bucaramanga es condicionada por un dominio estructural importante (debido al factor tectónico complejo en el área de estudio), propagado y extendido a los cuerpos geológicos del abanico aluvial. La distribución y disposición del miembro Órganos inferior y miembro Órganos superior fue delimitada con variaciones de litofacies entre sondeos y puntos de control cartográfico. La ubicación de los sondeos se muestra en la Figura 2.

El modelo se desarrolló en la plataforma *on-line Geomodelr*, mediante la implementación de perfiles geológicos utilizados con la finalidad de construir bloque-diagramas que muestren la información cartográfica representada en las tres dimensiones (Figura 3).

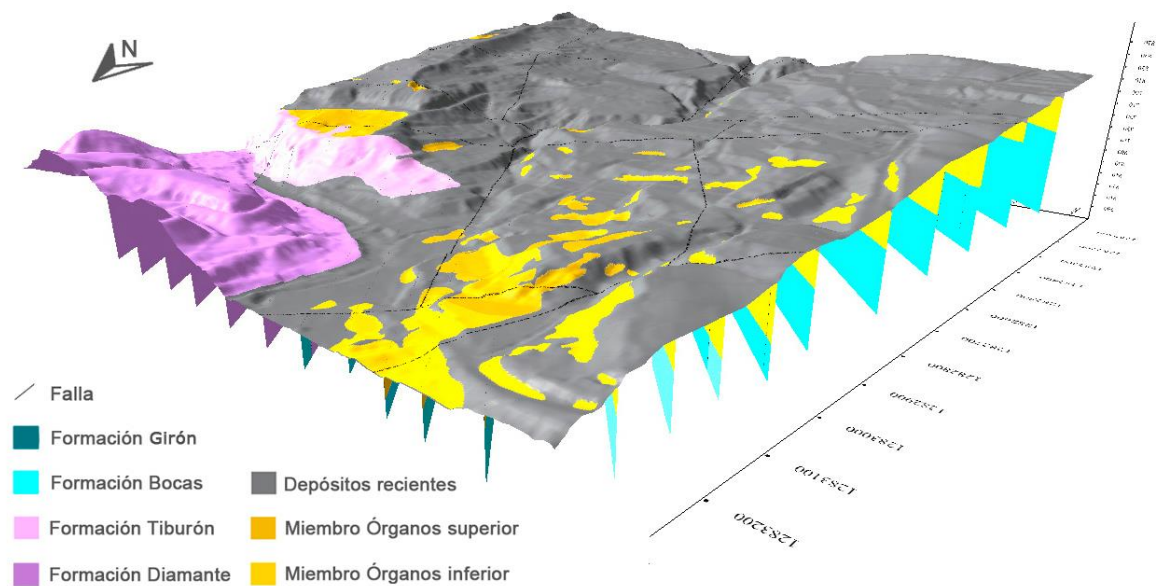


Figura 3. MDE con superposición de la estratigrafía aflorante. Se observa la disección de una quebrada que corta en dirección S-N el área

de estudio y está gobernado su curso en su totalidad por fallas geológicas.

Con la inserción de cortes geológicos en dirección SE-NW y a una distancia de unos 90 m entre éstos, se incorporaron la estratigrafía del área de estudio y el componente geológico estructural correspondiente a fallas inversas asociadas con el Sistema de Fallas de Bucaramanga-Santa Marta, fallas de rumbo con componente vertical del Sistema de Fallas del río Suárez y un sistema de fallas transversales en el área, producto de esfuerzos distensivos (UIS-AMB, 2017). La construcción del modelo geológico, que exhibe las unidades rocosas del sector, se muestra en la Figura 3. El algoritmo del servidor relaciona los cortes geológicos con la geología aflorante y la topografía, generando el modelo tridimensional de las unidades.

La clasificación correcta de litofacies permite realizar una caracterización hidroestratigráfica lo más cercana posible a la realidad. Dependiendo de la granulometría y el porcentaje de matriz, cada litofacies es equivalente a una hidrofacies en concreto en relación con la propuesta de Klingbeil *et al.* (1999). Las litofacies se ubicaron desde la base hasta el tope de cada unidad, siguiendo la configuración estratigráfica inicial. Fueron agrupadas y reclasificadas, conformando segmentos hidroestratigráficos generales.

Después se construyó un modelo tridimensional de hidrofacies con base en el modelo geológico, que corresponden a las hidrofacies grava masiva, gravas *open-framework* y arena. Los segmentos rocosos con

propiedades hidráulicas poco potenciales, no planteados en Klingbeil *et al.* (1999), se agruparon en una hidrofacies denominada bajo potencial. La conductividad hidráulica respectiva se toma de Coduto (1999).

En la observación y el análisis de los siete sondeos se delimitaron intervalos con afectación hídrica, evidenciada como lavado y remoción de la matriz componente del miembro geológico en su totalidad. Por lo tanto, para la selección pertinente de una hidrofacies adecuada, se clasificaron como gravas *open-framework*, que corresponde a litologías con ausencia de sedimentos en los poros formados entre las gravas, proporcionando altas permeabilidades (Lunt & Bridge, 2007), aun cuando, en principio, perteneciese a una litofacies de propiedades hidráulicas diferentes. Esto también es apreciable en la unidad depósitos recientes, que presenta este incidente al encontrarse lavada en algunos sectores, debido al contacto directo con fenómenos de precipitación y escorrentías.

Para el modelo generado de hidrofacies, las formaciones Diamante, Girón, Bocas y Tiburón se trabajaron como basamento hidrogeológico. Sin embargo, el análisis de núcleos de perforación expone el estado fracturado de dicho basamento. Cercano al contacto con la Formación Bucaramanga, los segmentos más próximos de estas formaciones pueden expresar un comportamiento de menor resistencia al flujo, con conductividades hidráulicas superiores. A pesar de ello, se incluyen dentro de la hidrofacies grava masiva y no en las gravas *open-framework*, pues la primera corresponde a la hidrofacies de mayor transmisividad natural para efectos de este estudio, siendo la hidrofacies grava *open-framework* propia de segmentos con afectación hídrica directa.

La información obtenida por piezómetros de hilo vibrátil permite hacer una comparación entre el modelo final de hidrofacies y los datos cuantitativos reales. Para el estudio, las curvas de tendencia de los niveles piezométricos en el tiempo muestran la configuración de los flujos subsuperficiales a diferentes profundidades en un mismo punto (Figura 4). En tal sentido y para este estudio, diferencias mayores a cinco metros entre niveles, tomados a profundidades relativamente similares, permiten suponer la ocurrencia de un segmento intermedio de permeabilidad baja confinante, o que el sector analizado funciona como un mecanismo con propiedades hidráulicas diferentes. Por su parte, diferencias piezométricas menores a cinco metros entre niveles, a distintas profundidades, definen una hidrofacies continua y su distribución permite extenderse verticalmente. Sin embargo, es probable la posibilidad de no reconocerse segmentos (p. ej., la hidrofacies arena en la flecha roja), mostrando una distribución hidroestratigráfica imprecisa. De igual manera, puede presentarse la existencia de una configuración con permeabilidad vertical baja para una misma hidrofacies, modificando la dinámica de percolación del sistema. Por tanto, es recomendable realizar una toma de datos uniforme y continua para un análisis oportuno, que a su vez integre el mayor número de técnicas implementadas en el área de estudio. Este uso particular de la herramienta permite construir un modelo de hidrofacies a partir de datos piezométricos, sintetizando una configuración hidrogeológica para fines de captación de aguas subterráneas o delimitación de zonas potenciales a procesos de remoción en masa.

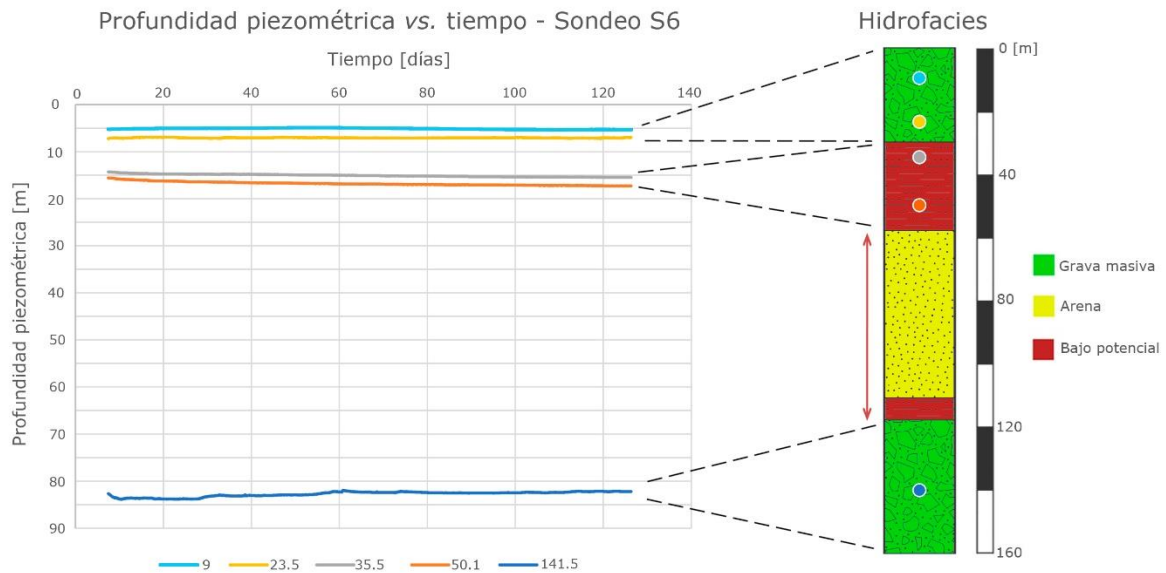


Figura 4. Gráfica de la variación de la profundidad piezométrica en el tiempo del sondeo S6 en cinco profundidades distintas, permitiendo definir hidrofacies. La flecha roja marca un segmento de hidrofacies importante no detectado gráficamente, y cuya determinación sólo será establecida con una toma de datos sistemática.

Resultados

Modelo geológico

El primer modelo generado representa la distribución de las unidades geológicas hasta la profundidad de 600 msnm (Figura 5).

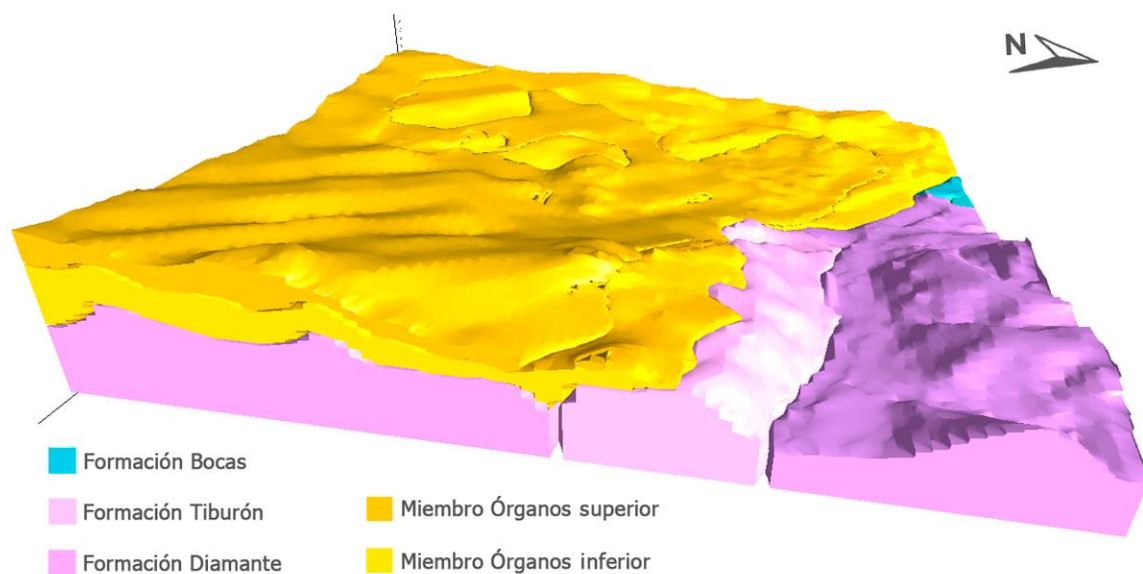


Figura 5. Modelo geológico construido a partir de la correlación litoestratigráfica. El algoritmo ajusta la geología a valores de altura designados por el MDE y a superficies de falla.

Se manifiesta la propagación de las estructuras de falla de los tres sistemas en las unidades, modificando por completo la geometría y los espesores (Figura 6). Las fallas de rumbo ponen en contacto las unidades infrayacentes al miembro Órganos.

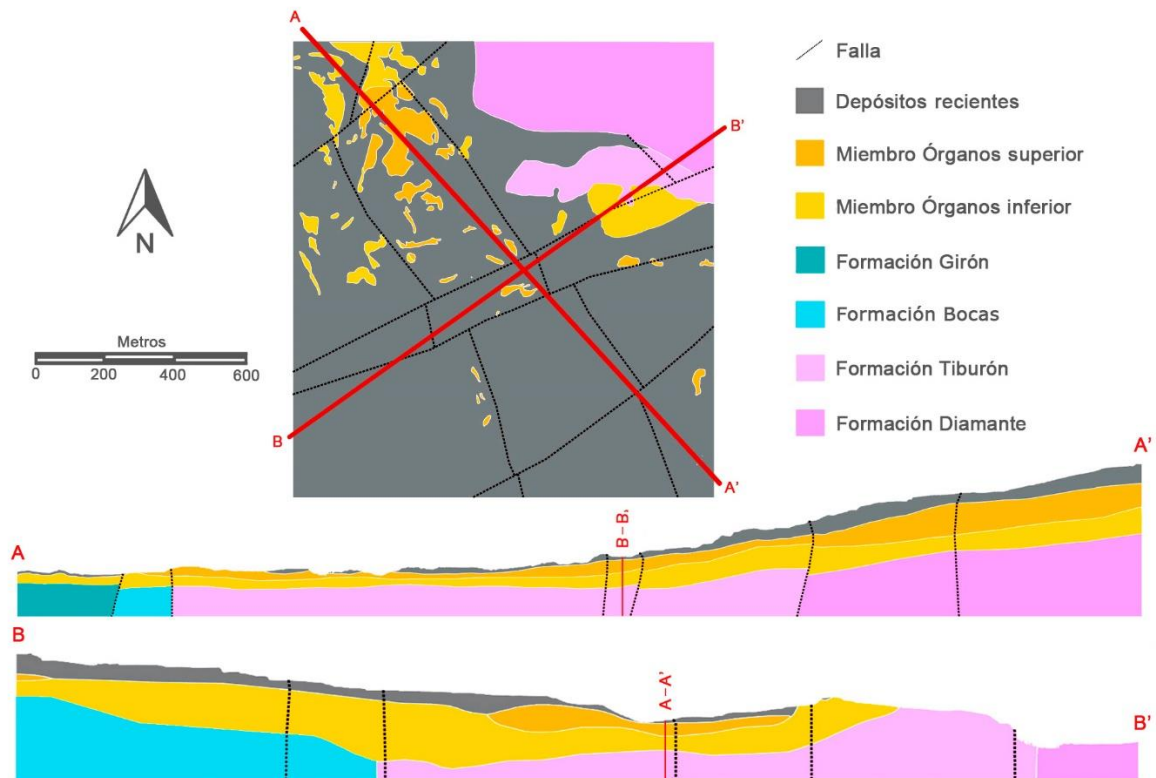


Figura 6. Representación de dos perfiles utilizados para la interpolación (A-A') y visualización transversal (B-B') del modelo geológico. Las líneas A-A' y B-B' en los cortes marcan la respectiva intersección.

El modelo generado (Figura 7) muestra finalmente la disposición estratigráfica de las unidades.

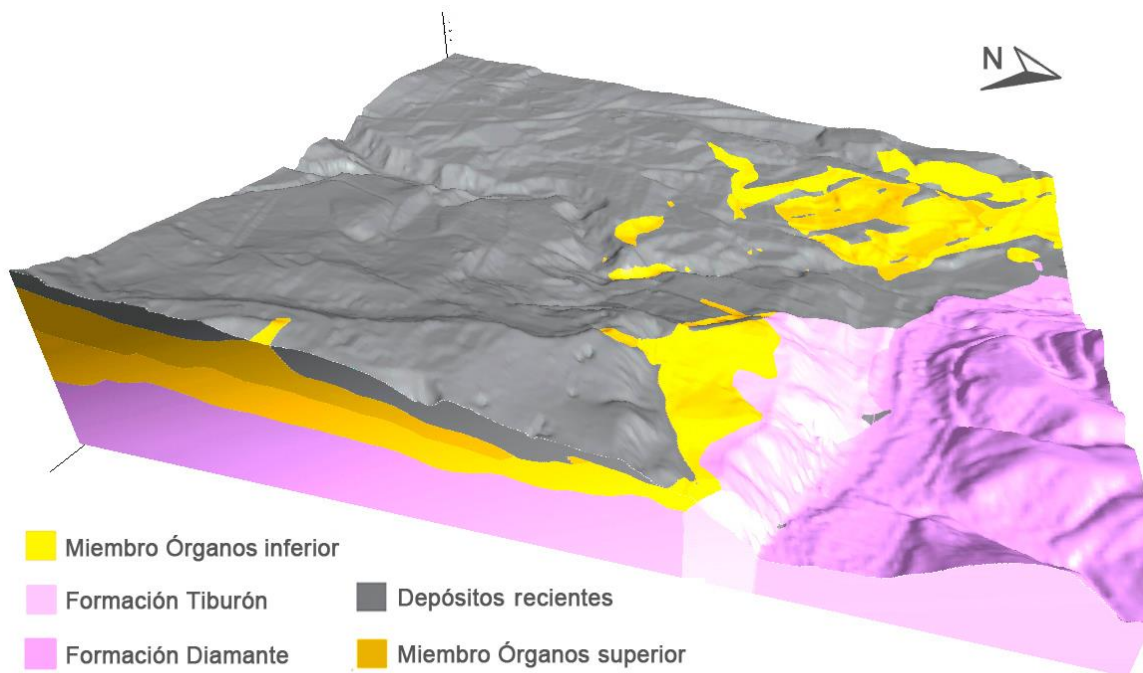


Figura 7. Bloque diagrama final, construido a partir de correlaciones entre cortes geológicos. El modelo geológico completo se prolonga desde la superficie del MDE.

Modelo de hidrofacies

Se registraron siete litofacies principales en el área de estudio, mediante el proceso establecido por Klingbeil *et al.* (1999) (Figura 8). Corresponden a gravas matriz-soportadas (Gmm); gravas clasto-soportadas (Gcm);

gravas con segmento lavado (G'); arenas con tendencia horizontal, masiva y gradada (Sh, Sm y Sg, respectivamente), y finos totales (Ft), que involucra limos arenosos, limos con materia orgánica y limos ligeramente gravosos.

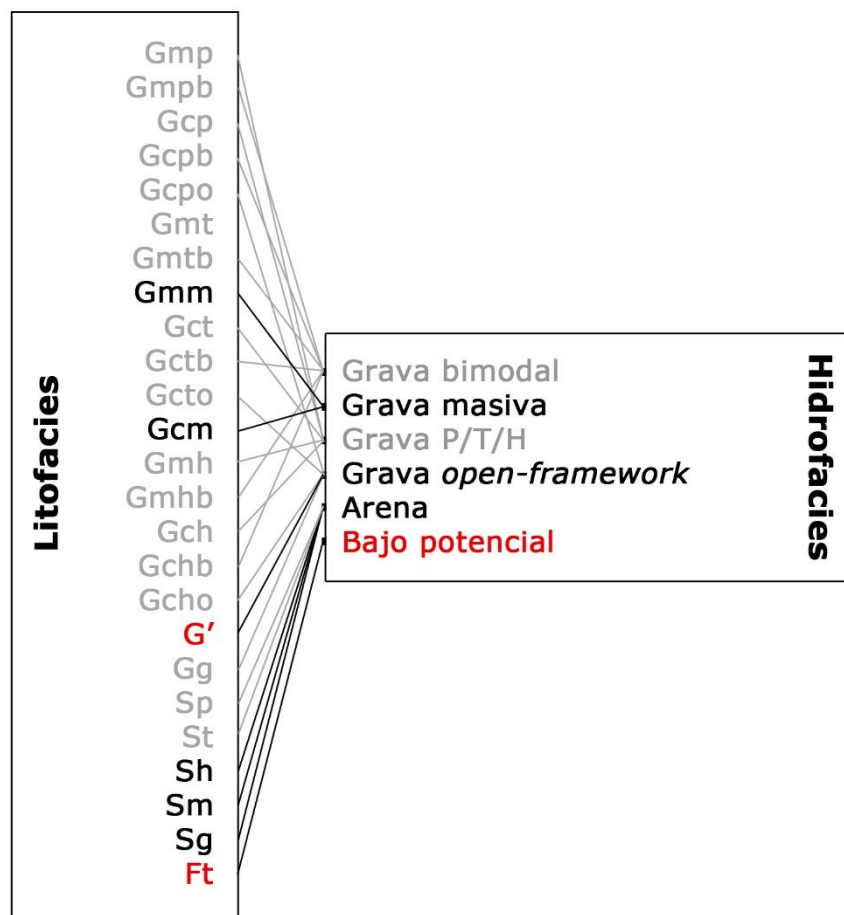


Figura 8. Relación litofacies-hidrofacies según propiedades hidráulicas. Las litofacies e hidrofacies en color negro y rojo corresponden a las

presentes en el área de estudio, siendo las rojas las anexadas al esquema original. Modificado de Klingbeil *et al.* (1999).

Se determinó un conjunto de cuatro hidrofacies (Figura 8), consignadas en la Tabla 2, que corresponden a grava masiva (M), grava *open-framework* (OW), arena (S) y bajo potencial (BP), controladas de manera espacial por contrastes de resistividad en tomografías eléctricas (Figura 9). Esta herramienta complementa el modelo de hidrofacies, dada la visualización de segmentos con posible presencia de agua o material arcilloso, denotado en azul en la tomografía. Los segmentos arcillosos (y en general de granulometría inferior al tamaño arena) se agruparon en la hidrofacies bajo potencial, al presentar resistencia hidráulica debido a la baja permeabilidad.

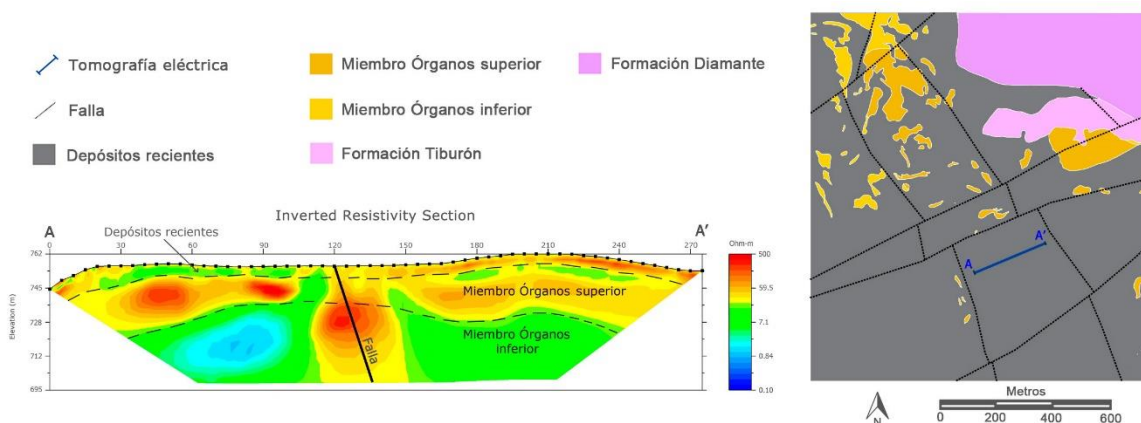


Figura 9. Tomografía eléctrica del subsuelo en el área de estudio, donde se marca la continuidad de las dos divisiones del miembro Órganos. Se infiere una falla en el perfil geofísico, no definida en el

mapa debido a la ausencia de rasgos superficiales que la respalden.
Modificado de UIS-AMB (2017).

Tabla 2. Litofacies presentes en el área de estudio, con las respectivas hidrofacies. La conductividad hidráulica de la hidrofacies bajo potencial (BP) es tomada de Coduto (1999). No obstante, estos valores pueden modificarse, dada la heterogeneidad granulométrica. Modificado de Klingbeil *et al.* (1999).

Litofacies	Hidrofacies	K_h (m/s)
Gmm	M	5.37×10^{-4}
Gcm	M	5.37×10^{-4}
G'	OW	2.52×10^{-1}
Sh	S	1.10×10^{-3}
Sm	S	1.10×10^{-3}
Sg	S	1.10×10^{-3}
Ft	BP	10^{-8} a 10^{-2} *

El algoritmo de correlación de las hidrofacies permite evidenciar intermitencias en la continuidad lateral de éstas, resultando de la existencia de posibles lentes en las unidades geológicas. Estos cuerpos presentan una dimensión adecuada en la escala que permite se diferencien en otras hidrofacies, principalmente arena y bajo potencial. Con la metodología de la variación piezométrica se calibra y corrobora el

modelo final de hidrofacies, determinando unidades localizadas que pueden estar afectando el flujo subterráneo en el área (Figura 10).

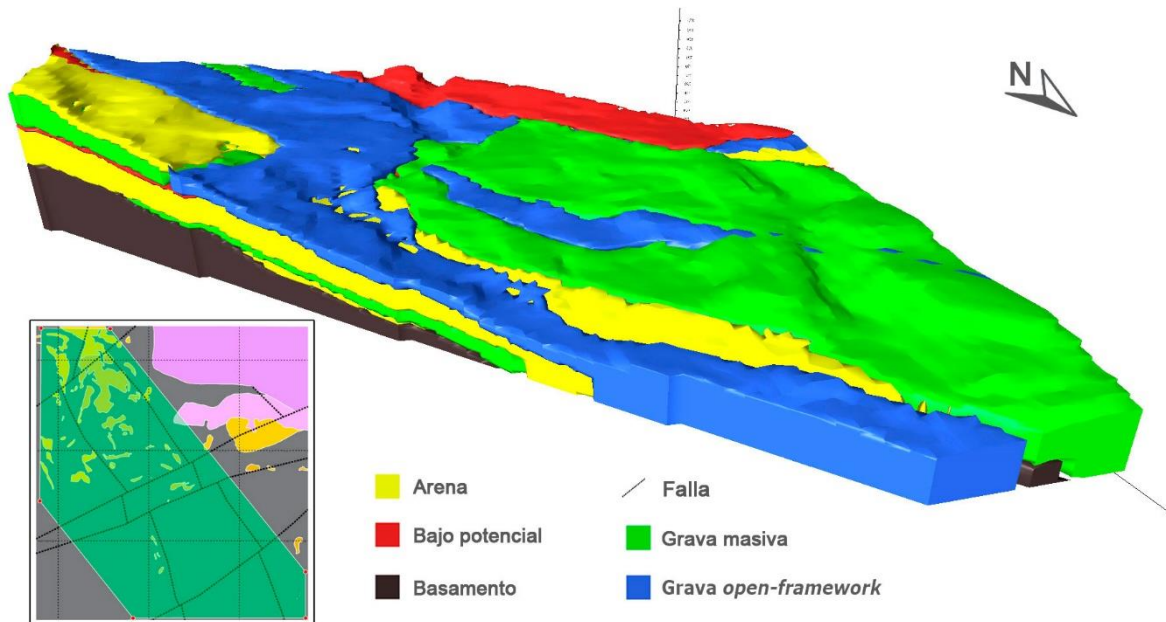


Figura 10. Modelo tridimensional de las hidrofacies del subsuelo en la zona norte de Bucaramanga, por debajo de los depósitos recientes. La hidrofacies grava masiva corresponde a la clase con mayor distribución en el límite superior del miembro Órganos.

Discusión

La variación en los niveles piezométricos permite ajustar los modelos de hidrofacies siguiendo el análisis gráfico de los instrumentos de medición tradicionales. Esta metodología es válida y aplicable como complemento de otros criterios de discretización de hidrofacies en proyectos que cuenten con información de exploración directa.

Cabe resaltar la ventajosa utilidad de los piezómetros de hilo vibrátil, dada la facilidad de lectura e incorporación a sistemas automáticos de adquisición de datos. Sin embargo, es común la ocurrencia de sucesos que alteran el comportamiento del dispositivo, como problemas de corrosión por hermeticidad ineficiente o cambios en la tensión del cable de medición a lo largo del tiempo (Abramson, Lee, Sharma, & Boyce, 2002; Suárez, 2009), por lo que debe considerarse la existencia de datos inexactos. Se recomienda un buen seguimiento técnico durante la instalación de este tipo de instrumentación.

La campaña de monitoreo tuvo una duración de 120 a 130 días, donde los niveles medidos se mantuvieron relativamente constantes en el tiempo. Sin embargo, factores como un periodo hidrológico más largo pueden mostrar respuestas piezométricas diferentes para las distintas hidrofacies, por lo que se aconseja trabajar con tiempos de monitoreo de preferencia mayores a dos años, donde los registros involucren la acción conjunta de las hidrofacies (sobre todo las de bajo potencial), los procesos climáticos característicos que afectan el área de estudio y cómo se relacionan estos eventos con los niveles piezométricos.

Por otra parte, los puntos de monitoreo pueden verse afectados por modificaciones en la presión barométrica (sobre todo las asociadas con condiciones climáticas), siendo probables las interpretaciones erróneas en estudios de monitoreo de aguas subterráneas y niveles en reservas acuíferas (Erskine, 1991; Van der Kamp & Schmidt, 1997). Para obtener la representación más cercana a la realidad, se necesita aplicar una corrección de presión atmosférica. Se sugiere llevar a cabo un monitoreo independiente de este parámetro, en especial en zonas potenciales de tormentas, donde los sistemas de presiones se ven potencialmente afectados (Saucier, 1955).

Conclusiones

El modelo geométrico generado expone el complejo sistema entrelazado horizontal y verticalmente en que se presentan las hidrofacies en el sector norte de Bucaramanga, Santander. La hidrofacies bajo potencial puede modificar levemente la dirección de flujo subterráneo, manifestando el desarrollo de bajas permeabilidades asociadas con distribuciones locales, pero constantes, de estos segmentos cerca de los pozos de bombeo. Sin embargo, la disposición de la hidrofacies gravas *open-framework* y la configuración estructural del área muestra una tendencia hidrodinámica

subterránea idónea. En términos de distribución, la hidrofacies grava masiva es la que presenta mayor continuidad en el área de estudio, confiriéndole características de interés hidrogeológico. Por otra parte, los segmentos con hidrofacies tipo arena son localizados con mayor proporción en la parte central de la zona, confiriendo así un mayor almacenamiento y transporte de volúmenes superiores de agua hacia ese sector.

La interpretación y el análisis de los sondeos generó siete litofacies pertinentes a la relación de Klingbeil *et al.* (1999), de tal manera que se constituyeron cuatro hidrofacies, con valores de conductividad hidráulica K promedio respectivos.

La propagación de estructuras de falla en el abanico aluvial de Bucaramanga produce espacios de acomodación a escala menor, por lo cual el espesor del miembro Órganos no es uniforme en toda su extensión. Las formaciones Diamante, Girón, Bocas y Tiburón fueron trabajadas como basamento hidrogeológico para el desarrollo del estudio por limitaciones en profundidad. Sin embargo, éstas pueden ser caracterizadas siguiendo la metodología desarrollada, con la condición de que las facies de las formaciones y el ambiente de sedimentación sean semejantes. Se propone delimitar hidrofacies en todas estas unidades para tener una definición y dinámica clara del subsuelo del área de estudio.

Agradecimientos

Se le extiende un especial agradecimiento al grupo de investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas; a todo el plantel docente y auxiliar de la Universidad Industrial de Santander, que auspiciaron el desarrollo de este trabajo con sus valiosos aportes y recomendaciones. También se hace extensivo el agradecimiento al Dr. Patricio Catalán y al revisor anónimo por sus aportaciones y sugerencias realizadas a la primera versión de este trabajo.

Referencias

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Aldana, W., & Ariza, S. (2000). *Geología para la estabilidad del escarpe norte de Bucaramanga* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Bierkens, M. F. (1996). Modeling hydraulic conductivity of a complex confining layer at various spatial scales. *Water Resources Research*, 32(8), 2369-2382. DOI: 10.1029/96WR01465
- Blair, T. C., & McPherson, J. G. (1994). Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. *Journal of Sedimentary Research*, 64(3a), 450-489.
- Bueno, E., & Solarte, A. (1994). *Geología, geotecnia y comportamiento erosivo del área de reserva forestal de Bucaramanga* (tesis de

pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical engineering: Principles and practices* Upper Saddle River, USA: Prentice Hall.

Colegial, J. D., Forero, M. C., Fuentes, M. A., & Gómez, S. (2017). Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 41, 16-30. DOI: 10.15446/rbct.n41.59347

Colmenares, S., & Jiménez, J. (2009). *Medición de parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua subterránea en la zona de Bucaramanga* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

De Porta, J. (1959). La terraza de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 3, 5-13.

Erskine, A. D. (1991). The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK. *Groundwater*, 29(4), 556-562.

Filí, M. F. (2001). Síntesis geológica e hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos-República Argentina (número especial). *Boletín Geológico y Minero*, 112, 25-36. Recuperado de http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_1-2001/1-SINTESIS.pdf

Forero, J. (2012). *Modelo hidrológico distribuido de la cuenca superior del Río de Oro* (tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Geotecnología Ltda. (2005). *Documento de diagnóstico de las amenazas*

de inundación y erosión en el río de Oro. Volumen 1: geología y geotecnia (informe técnico). Bucaramanga, Colombia: Geotecnología Ltda.

Gómez, S., & Anaya, A. (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 11, 37-50.

Gómez, S., & Colegial, J. (2003). *Interacción entre sistemas hidrogeológicos para el estudio del fenómeno de recarga en el macizo de Santander e identificación de acuíferos* (informe de investigación). Bucaramanga, Colombia: UIS-Colciencias.

Hidalgo, M., Rey, J., & Dueñas, J. (2002). Visita al área minera de Linares. Hidrogeología del sector. En: López, J., & Rubio, J. (eds.). *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén* (pp. 309-317). Recuperado de http://aguas.igme.es/igme/publica/lib108/pdf/lib108/in_n13.pdf

Hubach, E. (1952). *Interpretación geológica de la erosión y de los deslizamientos en Bucaramanga y medidas de defensa* (informe 867). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Nacional-Ingeominas.

IDEAM, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Oferta y uso de agua subterránea en Colombia. En: Franco, O., García, M., & Vargas, O. (eds.). *Estudio Nacional del Agua 2010* (pp. 112-167). Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2001).

Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (informe técnico). Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería, Subdirección de Amenazas Geoambientales.

Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2004). *Modelo geológico geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga* (informe técnico). Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Geología y Minería.

Joya, G., & Deantonio, W. (2012). *Modelo digital de elevaciones de la zona metropolitana de Bucaramanga para basamentos y capas de acuíferos* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Klingbeil, R., Kleinedam, S., Asprion, U., Aigner, T., & Teutsch, G. (1999). Relating lithofacies to hydrofacies: Outcrop-based hydrogeological characterisation of Quaternary gravel deposits. *Sedimentary Geology*, 129(3-4), 299-310. DOI: 10.1016/S0037-0738(99)00067-6

Lunt, I., & Bridge, J. (2007). Formation and preservation of open-framework gravel strata in unidirectional flows. *Sedimentology*, 54(1), 71-87. DOI: 10.1111/j.1365-3091.2006.00829.x

Maxey, G. B. (1964). Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, 2(2), 124-129. DOI: 10.1016/0022-1694(64)90023-X

Miall, A. D. (1977). Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: A summary. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 5, 597-604. Recuperado de

http://archives.datapages.com/data/dgs/005/005001/597_cspgsp0050597.htm

Monreal, R., Rangel, M., Grijalva, A., Minjarez, I., & Morales, M. (2011). Metodología para la definición de unidades hidroestratigráficas: caso del acuífero del valle del río Yaqui, Sonora, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 119-135. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222011000100011

Ouillon, T., Lefebvre, R., Marcotte, D., Boutin, A., Blais, V., & Parent, M. (2008). Hydraulic conductivity heterogeneity of a local deltaic aquifer system from the kriged 3D distribution of hydrofacies from borehole logs, Valcartier, Canada. *Journal of Hydrology*, 351(1-2), 71-86. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2007.11.040

Poehls, D., & Smith, G. (2009). *Encyclopedic dictionary of hydrogeology*. New York, USA: Academic Press.

Poeter, E., & Gaylord, D. R. (1990). Influence of aquifer heterogeneity on contaminant transport at the hanford site. *Ground Water*, 28(6), 900-909. DOI: 10.1111/j.1745-6584.1990.tb01726.x

Rivas, P., Pérez del Villar, L., Cruz, B., Gómez, P., Tunero, M., Hernández, A., Marín, C., García, M., Pelayo, M., & Pardillo, J. (1993). El proyecto de El Berrocal: síntesis preliminar. *Estudios Geológicos*, 49(3-4), 175-186. DOI: 10.3989/egeol.93493-4348

Saucier, W. J. (1955). *Principles of meteorological analysis*. Chicago, USA: The University of Chicago Press.

- Suárez, J. (2009). Capítulo 12: Instrumentación y monitoreo. En: *Deslizamientos: análisis geotécnico. Vol. I* (pp. 497-526). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Suárez, N., & Suárez, J. (2006). *Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos en la Cuenca de la Quebrada Angulito en Girón, Santander* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Teichert, C. (1958). Concepts of facies. *AAPG Bulletin*, 42(11), 2718-2744. Recuperado de <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1957-60/data/pg/0042/0011/2700/2718.htm?doi=10.1306%2F0BDA5C0C-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- UIS-AMB, Universidad Industrial de Santander, Área Metropolitana de Bucaramanga. (2017). *Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María)* (informe técnico). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Área Metropolitana de Bucaramanga.
- Van der Kamp, G., & Schmidt, R. (1997). Monitoring of total soil moisture on a scale of hectares using groundwater piezometers. *Geophysical Research Letters*, 24(6), 71-722.
- Veloso, F., Navarrete, R., Soria, A., & Meléndez, M. (2013). Estudio de afloramiento de escala intermedia como almacén geológico (Aliaga, provincia de Teruel). En: García-Hidalgo, J., Gil Barroso, F., Díaz de

Neira, J. (eds.). *V Congreso Cretácico de España* (pp. 136-139). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Villegas, L., & Mero, G. (2017). *Caracterización hidrogeológica de una terraza fluvial del río Tahuando mediante el estudio sedimentológico y estratigráfico, Ibarra, Imbabura* (tesis de pregrado). Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, A. (1973). Geología de los cuadrángulos H12 y H13, Pamplona, Departamento de Santander. *Boletín geológico – Ingeominas*, 21(1-3), 1-132.