

Aproximación al Modelo de Hidrofacies del Sistema Acuífero del Sector Norte de  
Bucaramanga, Colombia

Mario Andrés Gómez Arroyo, María Fernanda Gómez Palencia

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Jorge Eduardo Pinto Valderrama

Geólogo MSc.

Codirectores

María Alejandra Cetina Tarazona

Geóloga MSc.

Oscar Fabián Sánchez Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Geología  
Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

*A mi padre, que me cuida y alienta desde el cielo.*

*A mi madre, el pilar fundamental de mi vida.*

*A mi hermana, mi apoyo y maestra.*

**Mario Andrés**

*A mis papás, quienes impulsan mi caminar y con su apoyo incondicional he podido  
alcanzar mis sueños poco a poco.*

*A mi hermano, de quien espero grandes cosas y adoro con el alma.*

*A Lulú, que me cuida desde el cielo.*

*A Florecita, la flor más hermosa del jardín, quien estuvo conmigo hasta el final de su  
vida terrenal, me dio consuelo cuando hacía falta y me enseñó que venimos a servir.*

*A mis mejores amigos Paula y Pipe, que me salvaron en muchas ocasiones y siguen allí.*

*A mis compañeros de geología y sobre todo a Mario, de quien aprendí estos años.*

*A Laura Corredor, Ana María y Sthefany Durán por ser mis amigas y apoyo en los  
geoproblemas y en la vida.*

**María Fernanda**

### **Agradecimientos**

*A Dios por la salud y la vida.*

Los autores agradecen profundamente al profesor Jorge Eduardo Pinto Valderrama por su dirección y sugerencias a lo largo de este proyecto.

A la profesora María Alejandra Cetina, por su constante ayuda y acompañamiento, por su colaboración, guía y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

Al ingeniero Óscar Fabián Sánchez Ortiz, por su apoyo, asistencia, disposición, asesoría técnica, paciencia e incondicionalidad.

Al profesor Francisco Velandia, por su colaboración y sugerencias como evaluador.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter por formarnos como profesionales y ciudadanos íntegros.

A todas aquellas personas presentes a lo largo de estos años.

*A todos gracias.*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Planteamiento del problema.....	13
2. Objetivos .....	15
2.1 Objetivo general.....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
3. Localización.....	16
4. Marco geológico .....	17
4.1 Estratigrafía.....	17
4.1.1 Formación Diamante.....	17
4.1.2 Formación Tiburón .....	18
4.1.3 Formación Bocas .....	18
4.1.4 Formación Jordán.....	18
4.1.5 Formación Girón.....	19
4.1.6 Formación Bucaramanga .....	19
4.1.7 Subdivisión del Miembro Órganos .....	21
4.1.8 Depósitos de ladera .....	22
4.1.9 Depósitos aluviales recientes .....	22
4.2 Geología estructural .....	22
4.2.1 Sistema de fallas de Bucaramanga.....	24
4.2.2 Sistema de fallas transversales.....	24

4.2.3 Sistema de fallas por deslizamientos .....	25
5. Marco teórico .....	25
5.1 Generalidades de los abanicos aluviales .....	25
5.2 Litofacies asociadas a abanicos aluviales .....	27
5.3 Definición de hidrofacies .....	28
5.4 Parámetros hidrogeológicos relacionados.....	30
5.4.1 Porosidad.....	30
5.4.2 Porosidad efectiva.....	31
5.4.3 Conductividad hidráulica .....	31
5.5 Software GemPy .....	31
5.6 Método de cokriging.....	32
6. Antecedentes .....	33
7. Metodología .....	43
7.1 Recopilación y revisión de la información .....	44
7.2 Definición de hidrofacies .....	45
7.3 Integración en modelo geoestadístico.....	48
7.4 Diagnóstico del modelo .....	51
8. Resultados .....	52
8.1 Clasificación de hidrofacies en el área de estudio .....	53
8.2 Modelo de hidrofacies.....	63
8.3 Diagnóstico del modelo de hidrofacies.....	72
9. Discusión .....	73

10. Conclusiones .....	77
Referencias Bibliográficas .....	81

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización del área de estudio.....	16
Figura 2. Geología estructural del área de estudio.....	22
Figura 3. Planta esquemática y sección de un abanico aluvial y su distribución de facies .....	25
Figura 4. Ejemplo de una correlación estratigráfica de litofacies e hidrofacies. ....	28
Figura 5. Esquema de representación de la porosidad. ....	30
Figura 6. Ejemplo de modelos generados usando GemPy.....	32
Figura 7. Disposición de los niveles piezométricos dentro del área del proyecto. ....	34
Figura 8. Correlación de las asociaciones de litofacies y correlación estratigráfica en diagrama panel para los núcleos perforados. ....	36
Figura 9. Columna estratigráfica generalizada para el Miembro Órganos Inferior en el sector norte de Bucaramanga.....	39
Figura 10. Áreas de estudio de los proyectos anteriores, con los puntos de núcleos de perforación, apiques y trincheras realizados y estaciones de campo revisadas.....	41
Figura 11. Modelo tridimensional de hidrofacies desarrollado por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020).....	42
Figura 12. Esquema metodológico donde se representan las fases desarrolladas del presente proyecto.....	43
Figura 13. Visualización de los datos de entrada a interpolar para generar el modelo de hidrofacies en GemPy.....	49

Figura 14. Esquema conceptual del enfoque propuesto para la modelización hidroestratigráfica a escala regional.....	52
Figura 15. Mapa geológico del área de estudio, a escala 1:5 000.....	53
Figura 16. Esquemas de visualización de la información de espesores y proporciones de hidrofacies.....	57
Figura 17. Visualización de las hidrofacies de gravas masivas (GM), gravas sin matriz (Gsm) y arenas lodosas (AL) en el sondeo S6 desarrollado por UIS - AMB (2017). ....	58
Figura 18. Visualización de las hidrofacies de arenas gravosas (AGr) en el sondeo S2 desarrollado por UIS - AMB (2017).....	59
Figura 19. Visualización de las hidrofacies de lodos y arcillas gravosas (LAGr) en el sondeo S3 desarrollado por UIS - AMB (2017).....	60
Figura 20. Visualización de las hidrofacies de limos y arcillas (LA) en el sondeo S6 desarrollado por UIS - AMB (2017).....	61
Figura 21. Modelo de hidrofacies generado para el sector norte de Bucaramanga. ....	63
Figura 22. Representación de dos secciones transversales realizadas en el modelo. ....	65
Figura 23. Secciones transversales B-B' y C-C' del modelo.....	66
Figura 24. Secciones horizontales realizadas en profundidad 650 - 700.....	68
Figura 25. Secciones horizontales realizadas en profundidad 750 - 800.....	70
Figura 26. Representación exclusiva de la hidrofacies en superficie, superpuesto con una imagen satelital de Google Satellite. ....	74

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Descripción sedimentológica de los miembros de la Formación Bucaramanga. ....	20
Tabla 2. Facies típicas de depósitos de abanicos aluviales según Miall (1977). ....	27
Tabla 3. Unidades hidrogeológicas definidas para un sector del norte de Bucaramanga. ....	34
Tabla 4. Ambientes de depositación y regímenes paleoclimáticos interpretados a partir de información de facies del Miembro Órganos. ....	38
Tabla 5. Interpretación de las zonas geoeléctricas encontradas en las tomografías del proyecto. ....	38
Tabla 6. Recopilación de litofacies determinadas para el proyecto UIS - AMB (2017) de acuerdo a información textural. ....	46
Tabla 7. Recopilación de litofacies determinadas para el proyecto UIS - AMB (2019), siguiendo criterios texturales. ....	47
Tabla 8. Matriz de relación entre estructuras definida según su relación de corte para el modelo a interpolar. ....	50
Tabla 9. Correlación entre litofacies recopiladas de estudios previos y las hidrofacies determinadas en el área de estudio y su descripción. ....	54
Tabla 10. Correlación entre las hidrofacies de estudios previos y la clasificación final. ....	55
Tabla 11. Proporción de la longitud total de cada hidrofacies determinada en los 13 núcleos de perforación y en cada subdivisión del Miembro Órganos. ....	56
Tabla 12. Rangos de porosidad, porosidad efectiva y conductividad hidráulica K propuestos para las hidrofacies determinadas, con base en los valores planteados por Vélez Otálvaro (1999). ....	62

## Resumen

**Título:** Aproximación al modelo de hidrofacies del sistema acuífero del sector norte de Bucaramanga, Colombia\*

**Autor:** Mario Andrés Gómez Arroyo, María Fernanda Gómez Palencia\*\*

**Palabras Clave:** Hidrofacies, cokriging, sistema hidrogeológico, acuífero, conductividad hidráulica, potencial hidrogeológico, Python.

**Descripción:** Para un adecuado estudio de aguas subterráneas en una zona, es necesario conocer el potencial de las unidades geológicas de su subsuelo según la aptitud del medio al flujo, mediante la definición y caracterización de hidrofacies, como elemento primario de arquitectura a nivel hidrogeológico. En el sector norte de Bucaramanga, Colombia, no se tiene un conocimiento completo de la distribución espacial de las hidrofacies del Miembro Órganos, principal unidad geológica que aflora en el sector. Aunque se han realizado diversos estudios de carácter sedimentológico e hidroestratigráfico, las áreas de estudio no son representativas. En este proyecto, se construyó el modelo de hidrofacies de todo el sector, a partir de la clasificación y revisión de 934 metros de núcleos de perforación y otros elementos de exploración directa, según parámetros hidráulicos como la porosidad, porosidad efectiva y conductividad hidráulica, para un total de 6 hidrofacies determinadas, clasificadas en términos de acuífero, acuitardo y acuífugo. Se aplicaron técnicas de análisis geoestadístico (cokriging) utilizando librerías externas de Python para la integración y generación del modelo matemáticamente más probable, que fue revisado posteriormente con criterio geológico. Se determinó que la hidrofacies Arenas gravosas (AGr) es representativa en profundidad, mientras que las Gravas sin matriz (Gsm), de interés en gestión del riesgo, se encuentran principalmente en zonas de falla. Es posible identificar superposición de hidrofacies con potencial hidrogeológico de acuitardo sobre capas acuíferas, generando sistemas de acuíferos semiconfinados. Finalmente, se comparó el avance del modelo y se sugirió una serie de futuras etapas de desarrollo siguiendo una metodología definida. Este trabajo constituye un aporte para estudios posteriores que permitan comprender el sistema hidrogeológico de la zona, el cual puede ser importante para posibles eventos de remoción en masa, donde el agua subterránea es considerada un detonante de éstos en el sector.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Codirectores: María Alejandra Cetina Tarazona y Oscar Fabián Sánchez Ortiz.

### Abstract

**Title:** An approach to the hydrofacies model of the aquifer system of the northern zone of Bucaramanga, Colombia\*

**Authors:** Mario Andrés Gómez Arroyo, María Fernanda Gómez Palencia\*\*

**Key Words:** Hydrofacies, cokriging, hydrogeological system, aquifer, hydraulic conductivity, hydrogeological potential, Python.

**Description:** For an appropriate study of groundwater in an area, it is necessary to know the potential of the geological units of its subsoil according to the ability of groundwater to flow, with the definition and characterization of hydrofacies, as a primary element of the architecture at the hydrogeological level. In the northern sector of Bucaramanga, Colombia, there is not complete knowledge of the spatial distribution of the hydrofacies of Miembro Órganos, the main geological unit of the sector. Although various sedimentological and hydrostratigraphic studies have been carried out, the study areas are not representative. In this project, the hydrofacies model of the entire sector was built from the classification and review of 934 meters of drilling cores and other direct-exploration elements, according to hydraulic parameters such as porosity, effective porosity and hydraulic conductivity, for a total of 6 determined hydrofacies, classified in terms of aquifer, aquitard and aquifer. Geostatistical analysis techniques (cokriging) were applied using external Python libraries for the integration and generation of the most mathematically probable model, which was later revised with geological criteria. It was determined that the hydrofacies Arenas gravosas (AGr) are representative in depth, while Gravas sin matriz (Gsm), of interest in risk management, are mainly found in fault zones. It is possible to identify the superposition of hydrofacies with aquitard hydrogeological potential above the aquifer layers, generating semi-confined aquifer systems. Finally, the progress of the model was compared and a series of future development stages was suggested following a defined methodology. This work constitutes a contribution for subsequent studies that allow understanding the hydrogeological system of the area, which may be important for possible massive removal events, where groundwater is considered a trigger for these in the sector.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering, School of Geology. Director: Jorge Eduardo Pinto Valderrama. Co-directors: María Alejandra Cetina Tarazona and Oscar Fabián Sánchez Ortiz.

## Introducción

Estudios previos realizados en la Formación Bucaramanga reconocen la ocurrencia de rasgos geológicos y sedimentológicos favorables para el flujo y almacenamiento de agua subterránea, confiriendo a ciertos miembros de la unidad interés hidrogeológico (Ingeominas, 2004 en Ramírez y Hernández, 2018), este factor es importante hacia el sector norte de la ciudad de Bucaramanga, donde la Formación Bucaramanga ha sido cartografiada (y principalmente el Miembro Órganos de la unidad) y la presión de poros generada por las aguas subterráneas es considerada como el principal detonante de movimientos en masa ocurridos en el sector, por lo tanto, su estudio es fundamental para la mitigación de este suceso (UIS - AMB, 2017).

En este sentido, este trabajo de grado se realiza con el propósito de responder a la pregunta de investigación *¿cuáles son las hidrofacies del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga en el sector norte, su potencial hidrogeológico y distribución espacial?* Para responder esta pregunta se realiza un aporte a la comprensión del comportamiento y distribución espacial de las hidrofacies como técnica de análisis para entender en primera instancia la aptitud del medio a la dinámica de flujo de aguas subterráneas según criterios sedimentológicos e hidráulicos.

La generación de esta información constituirá una línea base para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual de la zona y a la mitigación de los problemas geotécnicos y de contaminación de aguas subterráneas que se presentan en el sector norte de Bucaramanga.

## 1. Planteamiento del problema

De acuerdo con el estudio realizado por IDEAM (2010), el 74% del territorio colombiano tiene potencial hidrogeológico para uso de aguas subterráneas y se encuentra dividido en 16 provincias hidrogeológicas limitadas por fallas de carácter regional. En estas provincias hidrogeológicas se han identificado 65 Sistemas Acuíferos, de los cuales 20 tienen grado de conocimiento hidrogeológico significativo y el resto aún se encuentra en fase exploratoria para conocer sus características hidráulicas e hidrogeoquímicas (IDEAM, 2019). Sin embargo, el aprovechamiento de estas aguas subterráneas en la mayor parte del territorio es todavía muy incipiente, entre otras cosas, por desconocimiento del potencial de tales recursos a nivel local y regional.

Para el caso de Santander, departamento localizado al nororiente del país, algunos autores han realizado caracterizaciones afines en varios de sus municipios (Barajas y Gómez, 2010; Castellanos y Gutiérrez, 2006; Díaz *et al.*, 2009; Gómez y Forero, 2009; Ingeominas, 2009), donde las condiciones geológicas y estructurales presentes permiten considerar algunas cuencas locales como pilotos en los procesos de adquisición de información hidrogeológica (Colegial *et al.*, 2006). En el municipio de Bucaramanga, Gómez *et al.* (2015) establecen dos niveles de acuíferos según criterios piezométricos, Profundo y Freático, correspondientes a los miembros Órganos y Gravoso de la Formación Bucaramanga, respectivamente. Para el sector norte de Bucaramanga, se ha cartografiado principalmente el miembro Órganos (UIS - AMB, 2017). En este sector, el sistema hidrogeológico local es importante ya que se ha considerado a la presión de poros generada por las aguas subterráneas como el principal detonante de los movimientos en masa generados, por lo tanto, su estudio es fundamental para la mitigación de este fenómeno (UIS - AMB, 2017). Además,

se ha evidenciado que la comunidad de la zona capta las aguas subterráneas para consumo humano y que estas presentan problemas de contaminación por fallas en el sistema de alcantarillado (UIS - AMB, 2019).

En este sentido, esta investigación plantea un aporte a la comprensión del comportamiento y distribución espacial de las hidrofacies, como técnica de análisis para entender la dinámica de flujo de aguas subterráneas según criterios sedimentológicos e hidráulicos, en el subsuelo del norte de Bucaramanga que, en conjunto con las propiedades hidráulicas distintivas, se efectúe la elaboración de un modelo hidroestratigráfico conceptual de facies, desarrollado en el software GemPy, donde se represente la configuración espacial y geométrica del sistema hidrogeológico que contribuya a la construcción del modelo hidrogeológico conceptual de la zona y a la mitigación de los problemas geotécnicos y de contaminación de aguas subterráneas que se presentan en el sector norte de Bucaramanga, Colombia. De acuerdo con lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación: *¿cuáles son las hidrofacies del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga en el sector norte, su potencial hidrogeológico y distribución espacial?*

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Construir el modelo de hidrofacies del sistema acuífero en el sector norte de Bucaramanga, Colombia, a partir de métodos de interpolación geoestadística con base en datos litoestratigráficos e información de campo, que constituirá la línea base para el conocimiento del potencial hidrogeológico del depósito cuaternario presente y así brindar un aporte al estudio de aguas subterráneas en la zona de estudio.

### **2.2 Objetivos Específicos**

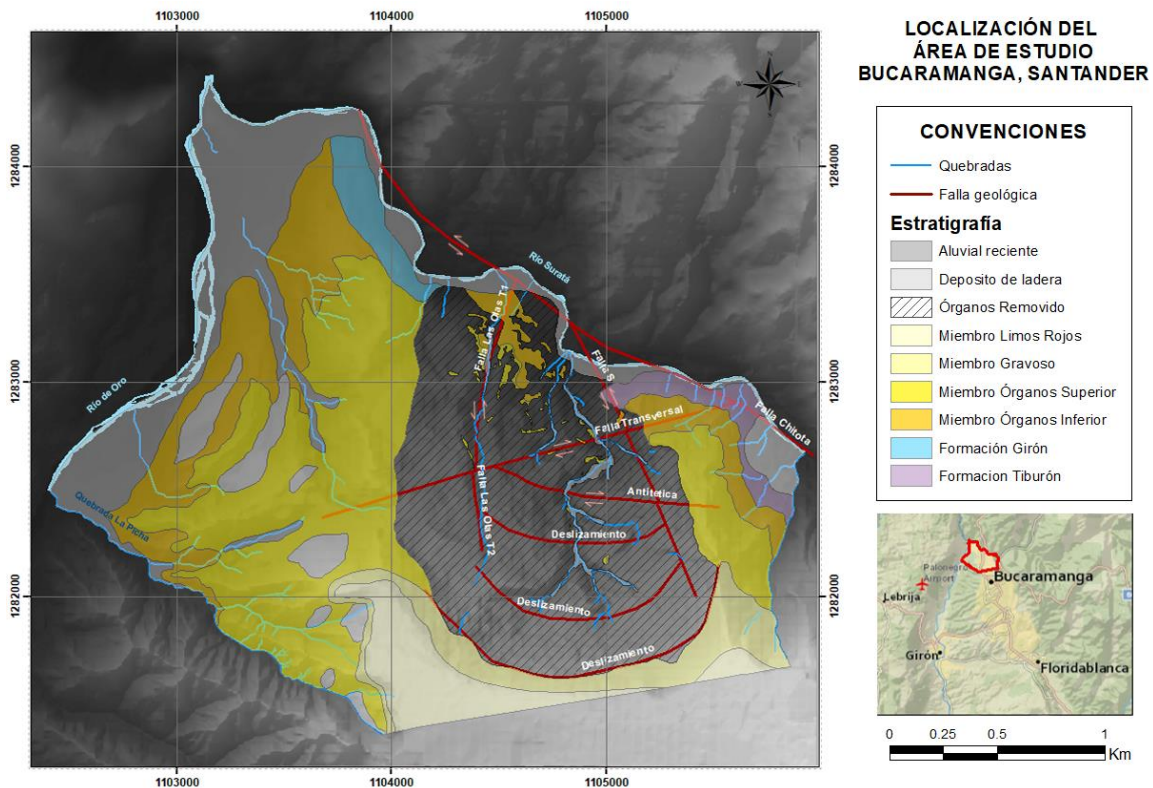
- Definir las hidrofacies del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga en el sector Norte de Bucaramanga, mediante la estimación del potencial hidrogeológico de las litofacies previamente caracterizadas en núcleos de perforación disponibles dentro del área de estudio.
- Correlacionar espacialmente las hidrofacies del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga a partir del procesamiento geoestadístico en el software GemPy.
- Establecer un diagnóstico del modelo de hidrofacies del sistema acuífero del sector norte de Bucaramanga, como base para continuar la línea de desarrollo en estudios posteriores.

### 3. Localización

El área de estudio se localiza al norte de la ciudad de Bucaramanga, Santander, abarcando principalmente las comunas 1 y 2 del municipio, para un total de aproximadamente 5,90 km<sup>2</sup> de superficie. Esta zona representa el polígono ubicado entre el Río de Oro al NW-W, Río Suratá al N, Quebrada La Picha al SW y el curso de una quebrada, de aproximadamente 1 km de longitud, al este, siendo el límite sur la línea generada entre los dos puntos límite cartográficos de estas dos últimas (Figura 1). Esta zona es seleccionada por corresponder al dominio del modelo hidrogeológico desarrollado por UIS - AMB (2019).

**Figura 1.**

*Localización del área de estudio*



*Nota.* Ubicación y mapa geológico del sector. Modificado de UIS - AMB (2019).

## 4. Marco geológico

### 4.1 Estratigrafía

La estratigrafía del área de estudio reúne unidades sedimentarias y depósitos recientes cuyo registro abarca unidades desde el Paleozoico superior hasta el Periodo Cuaternario. A continuación, se describen las unidades geológicas presentes en la zona de la más antigua a la más reciente.

#### 4.1.1 Formación Diamante

Ward *et al.* (1973) asigna este nombre al segmento inferior del “Suratá Series” de Dickey (1941), dividiendo la Formación Diamante en tres miembros: Un miembro inferior, constituido por arenitas lodosas de tamaño de grano fino a grueso levemente guijoso, tonalidad rojo grisáceo con intercalaciones de limolitas; un miembro intermedio de lodolitas de tonalidad gris oscuro e intercalaciones de calizas del mismo color; un miembro superior, conformado por calizas de tonalidad gris oscuro ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolitas y arenitas de tonalidad gris a rojo grisáceo.

La información paleontológica y facial sugiere un ambiente depositacional de mar epicontinental (Clavijo *et al.*, 1993) con espesores aproximados de 440 m que suprayacen en discontinuidad estratigráfica a la Formación Floresta e infrayacen discordantemente a la Formación Tiburón, y edades que datan del Paleozoico Superior, desde el Pensilvaniano Medio al Pérmico Medio (310 - 265 Ma) (Ward *et al.*, 1973).

#### **4.1.2 Formación Tiburón**

Nombre asignado por Ward *et al.* (1973) que redefine al segmento superior de “Suratá Series” de Dickey (1941). La Formación Tiburón consta de conglomerados calcáreos, líticos, clasto-soportados, con guijos y gujarros de calizas predominantemente, subredondeados a subangulares y en menor proporción fragmentos de arenitas, chert y rocas volcánicas dentro en una matriz de tonalidad gris calco-arenosa, de tonalidad gris, provenientes de la Formación Diamante. Rabe (1974) le asigna edades de Triásico, con procesos de formación asociados a movimientos epirogénicos ocurridos al final del Paleozoico.

#### **4.1.3 Formación Bocas**

Ward *et al.* (1973) define la Formación Bocas, que toma su nombre de la localidad de Bocas, al norte de Bucaramanga, como una alternancia de limolitas de tonalidad gris verdoso a rojo grisáceo levemente calcáreas, arenitas y arcillolitas calcáreas fosilíferas de tonalidad gris verdoso a gris oscuro, limolitas con nódulos calcáreos y conglomerados de tonalidad gris verdoso. Hacia la parte superior se encuentran capas delgadas de rocas volcánicas. Con un espesor aproximado de 590 m, La Formación Bocas suprayace a la Formación Tiburón e infrayace en continuidad estratigráfica a la Formación Jordán, con edades que datan del Jurásico Inferior según el registro fosilífero, y un ambiente de depositación continental - transicional (Remy *et al.*, 1975).

#### **4.1.4 Formación Jordán**

Se caracteriza por lodolitas y areniscas de grano fino micáceas, con óxidos de hierro y manganeso y ligeramente calcáreas. Presentan laminación plano-paralela (Rocha, 2005). Reconocida por Cediel (1968), consta de 110 metros de espesor compuestos de areniscas de grano

grueso y color gris verdoso con algunas intercalaciones de lutitas verdes, seguido por 200 metros de limolitas y areniscas ferruginosas de grano fino, de color rojizo y bien estratificadas (Rocha, 2005). Hacia la parte superior se intercalan brechas y tobas de composición ácida y de color amarillo, para un ambiente de aguas someras. Se le asigna una edad Jurásica Inferior (Ward *et al.*, 1973).

#### **4.1.5 Formación Girón**

Inicialmente denominada "Girón Series" (Hettner, 1892, en Ward *et al.*, 1973), consiste en una megasecuencia que aflora principalmente al occidente de Bucaramanga y en los alrededores del municipio de Girón, Santander. Cediél (1968) realiza un estudio detallado en la sección tipo del Río Lebrija y describe y mide un total de 4 650 m de espesor.

La Formación Girón reposa en discontinuidad estratigráfica sobre las formaciones Bocas y Jordán e infrayace concordantemente a la Formación Los Santos, y está constituida por arenitas de grano medio, grueso a ligeramente gravoso, de color rojo violáceo a rojo grisáceo, con estratificación cruzada; algunas interestratificaciones de limolitas y lodolitas de color rojo violeta a rojo grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm, confiriéndole un ambiente de sedimentación continental de tipo fluvial a lacustre (Royero y Clavijo, 2001).

#### **4.1.6 Formación Bucaramanga**

La Formación Bucaramanga se caracteriza por presentar geoformas onduladas a suaves con pendientes entre los 2° y 8° (Ingeominas, 2001). Consiste en un depósito cuaternario conformado, de base a techo, por los miembros Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos

(Qblr) (Tabla 1). Estudios previos indican dataciones del Pleistoceno inferior (0.73 Ma) para el inicio de la Pleistoceno medio (0.40 Ma) para el fin de su aporte (Struth *et al.*, 2015, en Ramírez y Franco, 2018), y Pleistoceno inferior (0.8 Ma) con dataciones según análisis de paleomagnetismo (Jiménez *et al.*, 2015). En general, esta unidad se define como un abanico aluvial que desemboca en el frente montañoso controlado por el Sistema de Fallas Bucaramanga - Santa Marta (SFBSM) (Ingeominas, 2008). Otros autores sugieren un ambiente de depositación fluvial tipo río trezado dominado por la energía del medio (tectónica y clima) dentro de una cuenca intramontana (Ramírez y Franco, 2018).

**Tabla 1.**

*Descripción sedimentológica de los miembros de la Formación Bucaramanga.*

Miembro	Características	De Porta (1959)	Vargas y Niño (1992)	(Ingeominas, 2001)	Ramírez y Franco (2018)
Órganos	Litología	Alternancia de cantos rodados y capas de arena de 1 m de espesor. Cantos bien redondeados, bien calibrados.	Depósito de gravas matriz-soportado y grano-soportado, lodoarenosos. Gravassubredondeadas a redondeadas. Presencia de feldespatos alterados en niveles de arcillas arenosas compactas.	Gravas y bloques débilmente consolidados, clasto-soportados (60%) y grano-soportados (40%). El tamaño de las gravas llega a 30 cm. Todos los fragmentos tienen formas redondeadas a subredondeadas, esfericidad baja a media y mal seleccionados. Los lentes y las capas finas corresponden a arenas y arenas arcillosas compactas.	Gravas de guijas y guijarros de moderado a mal seleccionados, muy bien redondeadas, clastosoportadas, bioturbación baja a alta y matriz arenosa a arenolodosa mal seleccionada. Se encuentran interdigitados con capas de arenas a arcilla con espesor variable que se depositan con geometría tabular o lenticular.
	Espesor [m]	200 - 250	170	180	135
	Ambiente	Fluvial.	Facies proximal y media de un abanico aluvial.	Flujo de escombros, flujos torrenciales e interdigitación de corrientes de canal. Parte proximal y media del abanico.	Sistema entrelazado somero de gravas, con múltiples canales de baja sinuosidad y profundidad.
Finos	Litología	Intercalaciones de arenas grises y ocreas, arena lodosa, arena con cantos y arcilla, arcilla arenosa y costras de limolitas. Localmente gravas de 2 a 3 cm de cuarzo, angulares, flotando en material arcilloso.	Arenas arcillosas, arcillas arenosas ligeramente micáceas, gravas y gravas arcillosas. La geometría es tabular y lenticular con variaciones laterales de facies y laminación plano-paralela, cruzada y ondulosa.	Intercalaciones de niveles arcillosos, limoarenoso y arenolimosos, de geometría lenticular, con espesores de 5 a 40 cm, estratificación plano-paralela, cruzada y ondulosa. La base de este miembro es arcillo-limoso de colores grises a verdes. La parte media al tope es una alternancia de niveles arenolimosos y limoarenosos.	Arenas arcillosas de tamaño medio a muy fino, bien a moderadamente seleccionado, matriz arcillosa bien seleccionada y muy cohesiva por altos contenidos de arcilla. Estructura masiva o laminación plano-paralela a ondulosa. Evidente bioturbación de galerías, raíces y materia orgánica.
	Espesor [m]	8 - 10	20	15	13 - 31
	Ambiente	Fluvio-lagunar, ciénagas	Corrientes migratorias de canales trezados poco profundos con flujos de	Ambiente aluvial de intercanales poco profundo, de baja energía. Interdigitaciones de flujos de escombros.	Río trezado dominado por arenas con escorrentía efímera y canales someros y mal definidos.

		escombros de baja intensidad.			
Gravoso	Litología	Cantos heterométricos con matriz arcillo-arenosa, de color rojo amarillento.	Grava arenolodosa y lodoarenosa, subredondeados, mal seleccionada.	Niveles de gravas y gravas lodosas de 15 cm aprox., matriz- soportados. Clastos subangulares a subredondeados en matriz areno-arcillosa ligeramente limosa.	Gravas de guijas y guijarros, clastosoportadas, con niveles de arenas de grano grueso a fino a arcilla. Presencia de raíces y galerías. Alto nivel de oxidación.
	Espesor [m]	± 15	5	8 - 30	5,50
	Ambiente	Fluvial con aporte lateral de derrubios.	Flujo de lodo con caída de bloques procedentes del Macizo de Santander.	Dominio de flujo de escombros.	
Limos Rojos	Litología	Limos rojos, conglomerados de bloques matriz-soportados. Bloques aislados.	Nivel de arcilla gravosa caracterizado por grandes bloques angulares de baja esfericidad de areniscas blancas silíceas.	Arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. Presencia esporádica de bloques angulares de arenisca asociados superficialmente a este miembro.	-
	Espesor [m]	-	5	-	-
	Ambiente	No ligado a la sedimentación de la Formación Bucaramanga dada la discordancia angular entre este miembro y los infrayacentes.	Flujo de lodo acompañado de bloques procedentes del Macizo de Santander.	Flujo de lodo acompañado de bloques procedentes del Macizo de Santander.	

Nota. Modificado de Ramírez y Franco (2018).

#### 4.1.7 Subdivisión del Miembro Órganos

Ingeominas (2004) reconoció inicialmente dos contrastes de resistividad eléctrica para el Miembro Órganos, demarcando dos niveles distintos, con textura fina y gruesa, respectivamente. UIS - AMB (2017) comentan que en el sector de estudio la Formación Bucaramanga está representada por los miembros Órganos Inferior (QbO1), Órganos Superior (QbO2) y Órganos Removido (Qd?), siendo este último un depósito coluvial, producto de deslizamientos. Según los autores, la principal diferencia del miembro superior con el miembro inferior es el cambio en la composición de los clastos, donde el miembro inferior está constituido mayoritariamente por clastos de origen ígneo-metamórfico, mientras que el miembro superior, se compone de clastos de origen sedimentario predominantemente, con presencia de clastos ígneo-metamórficos en menor proporción. A su vez, los tamaños en los clastos en el miembro superior varían principalmente de

guijos a guijarros, mientras en el inferior llegan hasta tamaño bloque. Para efectos de este trabajo, se utilizarán las tres divisiones del Miembro Órganos mencionadas anteriormente.

#### ***4.1.8 Depósitos de ladera***

Esta unidad cartográfica corresponde a depósitos acumulados provenientes de desprendimientos del material de laderas adyacentes debido a procesos gravitatorios (Ingeominas, 2001).

#### ***4.1.9 Depósitos aluviales recientes***

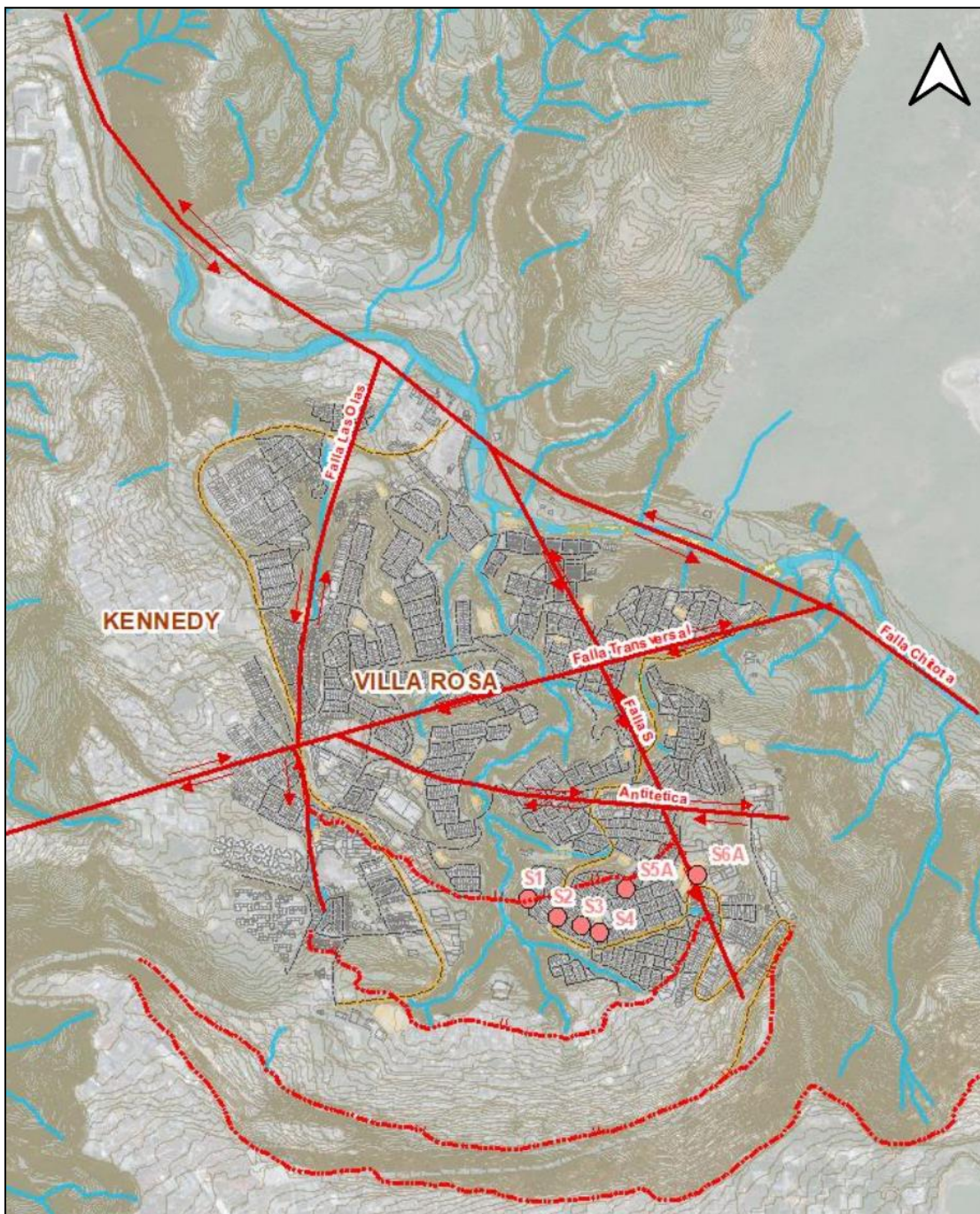
Esta unidad cartográfica corresponde a depósitos acumulados provenientes de desprendimientos del material de laderas adyacentes debido a procesos gravitatorios (Ingeominas, 2001).

### **4.2 Geología estructural**

Para el componente estructural, UIS - AMB (2019) realizó una revisión de la información geológica del área existente, donde se plantearon trazos de falla con base en variaciones de espesor de depósitos, que se establecen al analizar las diferencias en la acumulación según la ubicación de los núcleos, considerando las características de las condiciones de aporte de abanicos aluviales y los sectores respecto de la Falla de Bucaramanga y fallas transversales propuestas en el estudio (Figura 2).

#### **Figura 2.**

*Geología estructural del área de estudio.*



*Nota.* Las líneas continuas indican fallas, principalmente de rumbo, y las líneas discontinuas señalan unas estructuras características de fallas por deslizamiento. Tomado de UIS - AMB (2019).

Se reportó somerización en el sistema de depositación - acumulación hacia el norte del área de estudio, y especialmente hacia el este, según la altura de los contactos determinados en los núcleos, donde las diferencias respecto de la profundidad de basamento y cambios de espesor se pueden explicar siguiendo un sistema riedel, con trazos sintéticos y antitéticos que modificaron la topografía previa a la depositación de las unidades presentes en el sector (UIS - AMB, 2019).

#### ***4.2.1 Sistema de fallas de Bucaramanga***

La zona de estudio presenta un componente estructural principalmente afectado por la Falla Bucaramanga, perteneciente al sistema de Fallas Bucaramanga - Santa Marta como la sección sur de su trazo (Paris *et al.*, 2000), con 220 km de extensión, poniendo en contacto rocas ígneo-metamórficas precámbricas y paleozoicas, con unidades sedimentarias mesozoicas - cenozoicas (Ingeominas, 2001). La Falla Chitota, ubicada al norte del polígono en dirección NW-SE, se considera como una estructura tipo riedel de la Falla Bucaramanga, con una cinemática sinistral (UIS - AMB, 2019).

Otras configuraciones asociadas se expresan a escala local como estructuras en dirección N - NW, como la Falla Las Olas (Vargas y Niño, 1992), con cinemática sinistral normal, y la Falla S, que explica los desplazamientos relativos del contacto entre el miembro Órganos Inferior y Superior en las descripciones de núcleos, y que presenta una cinemática de tipo sinistral inversa (UIS - AMB, 2019).

#### ***4.2.2 Sistema de fallas transversales***

Estas estructuras presentan una dirección general SWW - NEE. De acuerdo con UIS - AMB (2019), estas fallas, que corresponden a las denominadas Falla Transversal y Falla Antitética, se

encuentran asociadas a un antiguo sistema de fallas de tipo dextral y son transversales al sistema de Fallas de Bucaramanga, siendo producto de la distensión en dirección sur que se establece en la región.

#### ***4.2.3 Sistema de fallas por deslizamientos***

UIS - AMB (2019) agrupan en este sistema a un conjunto de estructuras identificadas a partir de análisis fotogeológico (variación de pendientes, orientaciones e información secundaria) y clasificadas como fallas normales, que evidencian la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, con desarrollo de coronas de deslizamiento secuencial.

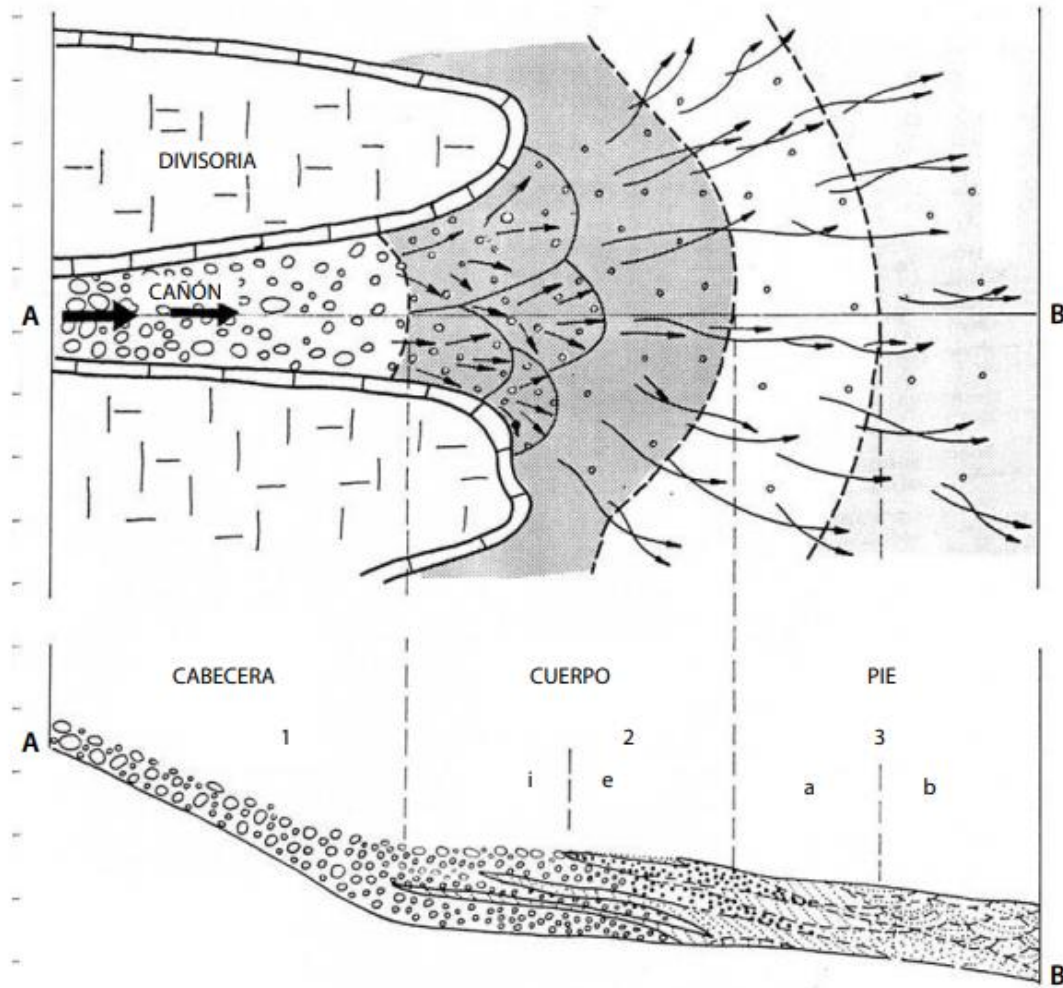
## **5. Marco teórico**

### **5.1 Generalidades de los abanicos aluviales**

Un abanico aluvial es una forma de relieve depositacional originada en la base o pie de un frente montañoso, genéticamente asociada a las descargas sólidas (sedimentos) de un curso de agua (río o quebrada) que drena desde un área topográficamente elevada a un área más baja y plana adyacente (Méndez *et al.*, 2016). Un abanico aluvial consta de tres segmentos: la zona proximal (abanico proximal), zona media (abanico medio) y zona distal (abanico distante), las cuales están conformadas por el ápice, el cañón del abanico y el área media (Nichols, 2009). El ápice se ubica en la parte superior, en el lugar donde sucede el cambio brusco de pendiente en la zona proximal (Figura 3).

#### **Figura 3.**

*Planta esquemática y sección de un abanico aluvial y su distribución de facies*



*Nota.* Los vectores indican la intensidad relativa de los procesos fluviales. Tomado de McGowan y Groat (1971) en Colombo (2010).

El perfil expuesto por el abanico varía, siendo cóncavo hacia arriba, para perfiles radiales, y cóncavo hacia abajo, en perfiles transversales. El cambio lateral de facies es producto de la alta tasa de decrecimiento del tamaño de grano hacia el frente del abanico y el aumento de la proporción de facies de tamaño de grano fino. Los depósitos proximales del abanico se encuentran dominados por gravas probablemente imbricadas y estratificadas, mientras la estratificación cruzada se incrementa con la distancia; por lo general los sedimentos son inmaduros. Para Nilsen (1982), las

secuencias de los abanicos constan de una mezcla de depósitos de flujo de corriente, flujos de escombros, flujos de lodos y depósitos de derrumbe, donde los depósitos por corriente de flujo resultan a partir de los depósitos transportados por tracción, saltación y suspensión por agua y, por otra parte, los depósitos de flujo de lodo se producen a partir de sedimentos en los cuales la matriz (fangosa o lodosa) da soporte a los clastos suspendidos.

### 5.2 Litofacies asociadas a abanicos aluviales

Los abanicos aluviales reúnen litofacies tanto principales como secundarias que representan las condiciones sedimentológicas típicas en sus secuencias depositacionales (Tabla 2).

**Tabla 2.**

*Facies típicas de depósitos de abanicos aluviales según Miall (1977).*

Tipo de facies	Código	Descripción	Interpretación
<b>Facies principales</b>	Gm	Gravas principalmente imbricadas, clasto-soportadas con estratificación subhorizontal pobremente definida.	Barras longitudinales, depósitos de rezagos, depósitos de tamices.
	Gms	Gravas con matriz lodosa sin estratificación interna.	Depósitos de flujo de escombros.
	Gt	Gravas clasto-soportadas con estratificación cruzada en artesa.	Rellenos de canales menores.
	Gp	Gravas con estratificación cruzada planar, gravas clasto-soportadas, gravas matriz-soportadas y arenas (Sp).	Barras linguoides o crecimientos deltaicos a partir de barras más antiguas.
<b>Facies menores</b>	Sh	Arenas con estratificación horizontal.	Flujos en capas planas (régimen de flujo crítico).
	St	Arenas con estratificación cruzada en artesa.	Dunas (régimen de flujo más bajo).

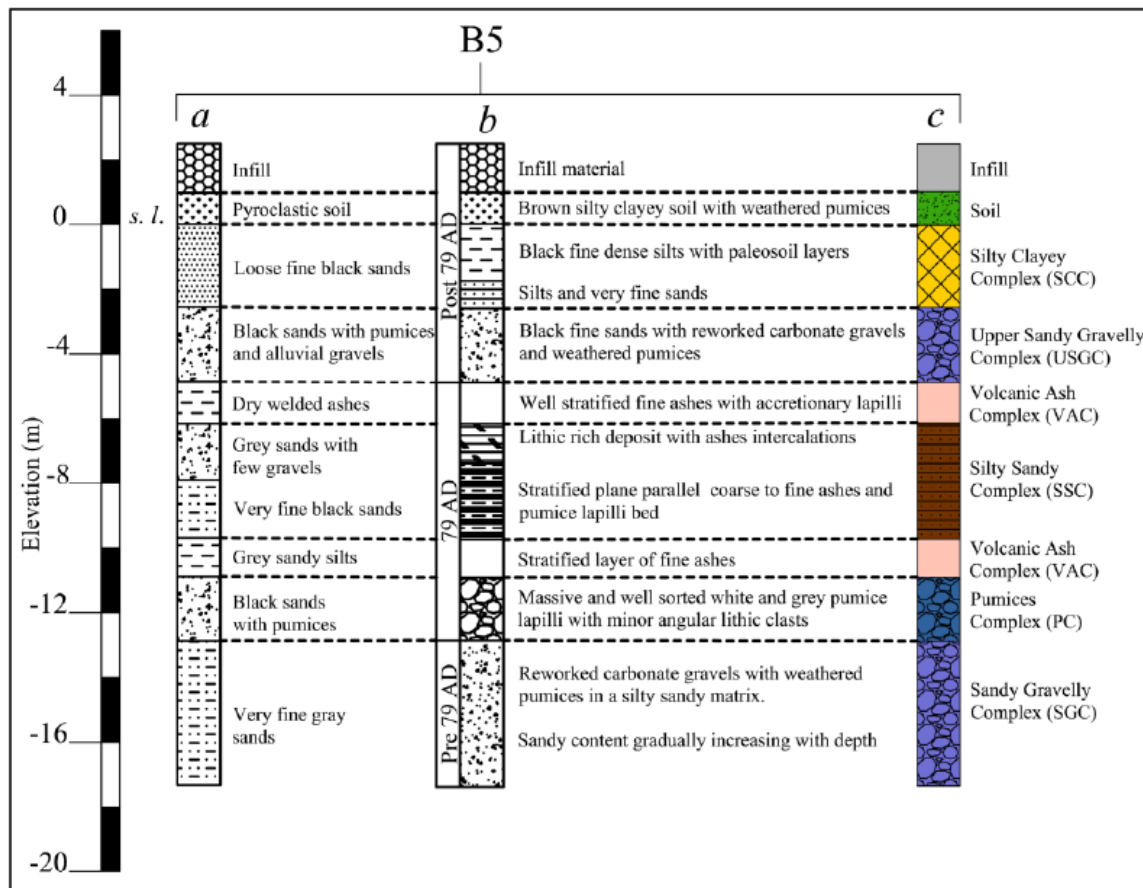
Sp	Arenas con estratificación cruzada planar.	Barras transversales o linguoides, ondas de arena (régimen de flujo más bajo).
Fm	Arenas muy finas con laminación o laminación cruzada, arcilla o lodo.	Depósitos <i>overbank</i> , abandonados o drapeados.
P	Carbonato concrecionado pedogénico.	Suelos con precipitación química.

### 5.3 Definición de hidrofacies

El término de hidrofacies se usa para indicar unidades interconectadas con propiedades hidráulicas relativamente homogéneas (Bierkens, 1996 en De Caro *et al.*, 2017). El enfoque de facies reconoce que la distribución de los tipos de rocas sedimentarias no es aleatoria, sino que ocurre en patrones que reflejan procesos dentro del ambiente de depósito. Las hidrofacies pueden correlacionarse con litofacies, asociaciones de facies o elementos arquitectónicos, donde las características originales del sedimento influyen significativamente en la porosidad y permeabilidad actuales (Figura 4). Sin embargo, la correlación a menudo no es una por una, sino que una hidrofacies dada puede contener más de una facies sedimentológica (Maliva, 2016).

#### Figura 4.

*Ejemplo de una correlación estratigráfica de litofacies e hidrofacies.*



Nota. a) Descripciones de núcleo, b) unidad estratigráfica asociada y c) columna de hidrofacies. Tomado de Di Maio *et al.* (2014).

La definición de hidrofacies se realiza según criterios asociados a parámetros hidrogeológicos, como pueden ser porosidad y permeabilidad, pH o clasificación del agua subterránea según el contenido iónico (Rivas *et al.*, 1993; Hidalgo *et al.*, 2002; Veloso *et al.*, 2013; en Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz, 2020). Mediante los sistemas de hidrofacies se pueden relacionar esquemas geológicos con sistemas hidrológicos y construir unidades hidrogeológicas que permitan establecer la presencia, circulación y composición química de las aguas subterráneas, además de las posibles relaciones existentes con procesos exógenos (Maxey, 1964; Filí, 2001; Monreal *et al.*, 2011; en Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz, 2020).

#### 5.4 Parámetros hidrogeológicos relacionados

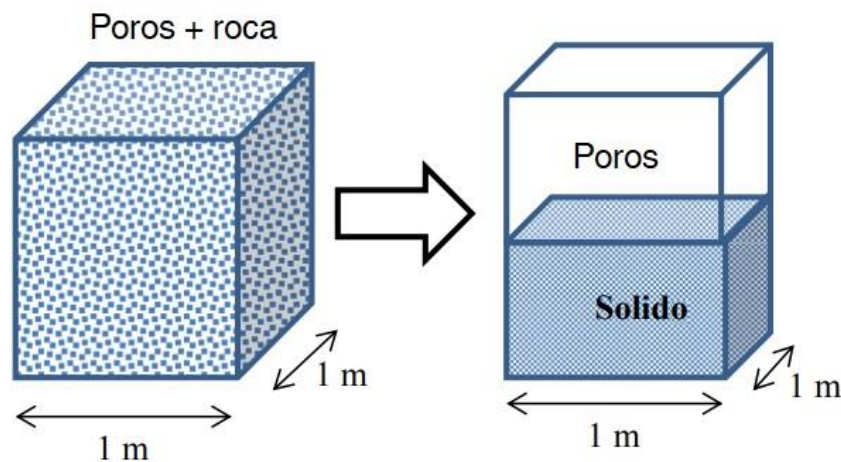
A continuación, se definen los principales parámetros hidrogeológicos que se tienen en cuenta a la hora de definir hidrofacies.

##### 5.4.1 Porosidad

Determina la capacidad de almacenar agua de un acuífero. Se define como el cociente entre el volumen vacío (ocupados por aire o agua) y el volumen total de la roca, indicando la proporción de volumen vacío respecto al total (Figura 5).

**Figura 5.**

*Esquema de representación de la porosidad.*



*Nota.* Modificado de Şen (2014).

### 5.4.2 Porosidad efectiva

Indica la cantidad de espacios porosos interconectados, que permiten el flujo y transmisión de fluidos, y corresponde a la proporción entre el volumen de estos respecto al volumen total de la roca.

### 5.4.3 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica define la facilidad con la que un fluido escapa de un espacio poroso compactado. Matemáticamente, se puede definir como el volumen de agua que se desplaza cuando el gradiente hidráulico es unitario, en una por unidad de tiempo, a través de una unidad de área de sección transversal del acuífero. Las dimensiones de este parámetro corresponden, por tanto, a longitud sobre tiempo, que es equivalente a la dimensión de velocidad en física. En general, el flujo en medios porosos se encuentra principalmente determinado por la ecuación de Darcy (Şen, 2014):

$$Vf = K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

Donde Vf corresponde a la velocidad de filtración de agua subterránea, K es el valor de conductividad hidráulica y  $\Delta h/\Delta l$  corresponde al gradiente hidráulico.

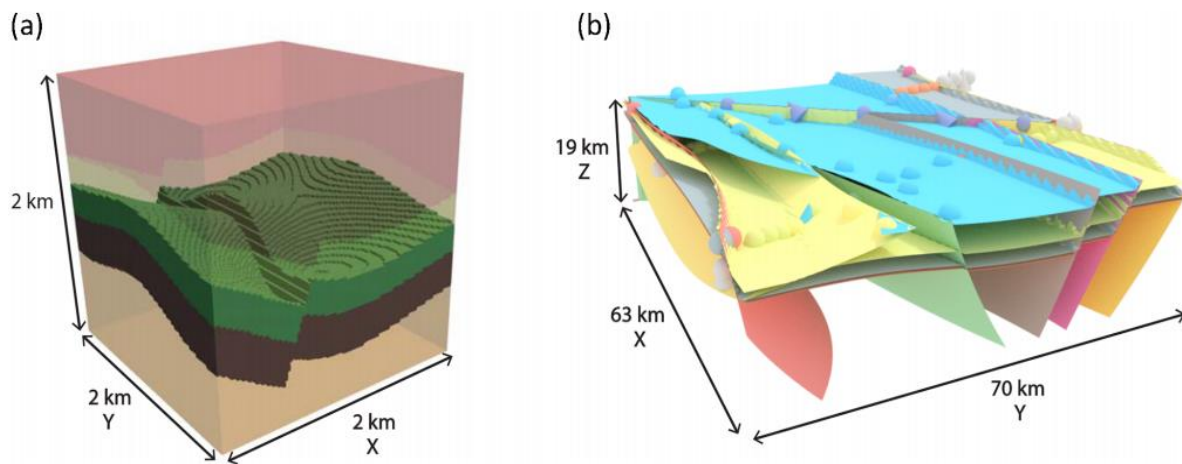
## 5.5 Software GemPy

GemPy consiste en una implementación de código abierto, desarrollado en Python, de un método de modelado geológico implícito basado en un enfoque de campo potencial donde, con base en los postulados de Lajaunie *et al.* (1997), utiliza los principios matemáticos del cokriging universal con librerías matemáticas avanzadas del lenguaje Python (Figura 6), permitiendo la

interpolación directa de secuencias múltiples en un solo campo escalar, a diferencia de los enfoques de modelado basados en superficie, y con la consideración de discontinuidades (por ejemplo, contactos metamórficos, inconformidades) a través de la interacción de múltiples secuencias (De la Varga *et al.*, 2019).

**Figura 6.**

*Ejemplo de modelos generados usando GemPy.*



*Nota.* (a) Modelo sintético que representa una trampa de depósito; (b) Modelo geológico de la cuenca de Perth (Australia) renderizado, donde las esferas y los conos representan los datos de entrada. Tomado de De la Varga *et al.* (2019).

**5.6 Método de cokriging**

El método de interpolación geoestadística conocido como cokriging o cokriging permite considerar una serie de información secundaria, referente a otros atributos relacionados con el principal. Cuando los datos muestrales son escasos o están muy poco correlacionados en el espacio, la estimación mejora sustancialmente cuando se incorpora esa información adicional. El cokriging es sólo una modificación del kriging. La variable principal se estima en un punto mediante una combinación lineal de los datos obtenidos en distintos lugares para las variables

principal y secundaria (una o varias). Una mayor información sobre el krigado y el cokrigado puede obtenerse en Goovaerts (1997) y en Moral-García (2003) (Moral-García, 2004).

## 6. Antecedentes

Diversos estudios sedimentológicos e hidroestratigráficos se han realizado previamente en la Formación Bucaramanga (e.g. Gómez *et al.*, 2015; Lima y Medina, 2015; Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz, 2020). La unidad cuenta con información de análisis paleoclimático, petrografía de clastos, mediciones de paleocorrientes y líneas de levantamiento geofísico que permite hacer evaluaciones preliminares de las condiciones esperadas, favorables o no, sobre las condiciones hidrogeológicas relacionadas directamente con la distribución de hidrofacies.

Gómez *et al.* (2015) caracteriza dos niveles de acuíferos según criterios piezométricos, Profundo y Freático, correspondientes a los miembros Órganos y Gravoso de la Formación Bucaramanga, respectivamente, donde los datos isotópicos e hidroquímicos muestran el avance del flujo desde la zona montañosa hacia los acuíferos a través de la Falla de Bucaramanga, en puntos de recarga de agua con cotas de 1500 m.s.n.m. (para el acuífero freático) y de 3000 m.s.n.m. (para el acuífero profundo), provenientes parcial o totalmente desde la zona del Macizo de Santander, recorriendo largas o cortas distancias. A su vez, los autores reportan diferencias significativas entre edades del agua de los acuíferos, siendo las del acuífero freático aguas nuevas y para el acuífero profundo aguas de muy poca renovación.

La Universidad Industrial de Santander, por medio del Convenio Interadministrativo No. 00324 de 2016 con el Área Metropolitana de Bucaramanga, desarrolló un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en el sector norte de Bucaramanga (informe

geológico publicado en 2017, en adelante UIS - AMB, 2017), que incluye a los barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa y Villa María, con la presentación del componente geológico e hidrogeológico de un sector delimitado dentro del área de estudio del presente proyecto (Figura 7). La interpretación de las descripciones de 7 núcleos de perforación (775,50 metros totales perforados, siendo 660,90 metros de depósitos cuaternarios), determinación de facies y asociaciones de facies, tomografías eléctricas y niveles piezométricos permitió definir y segmentar 4 unidades hidrogeológicas dentro del área de estudio (Tabla 3).

**Tabla 3.**

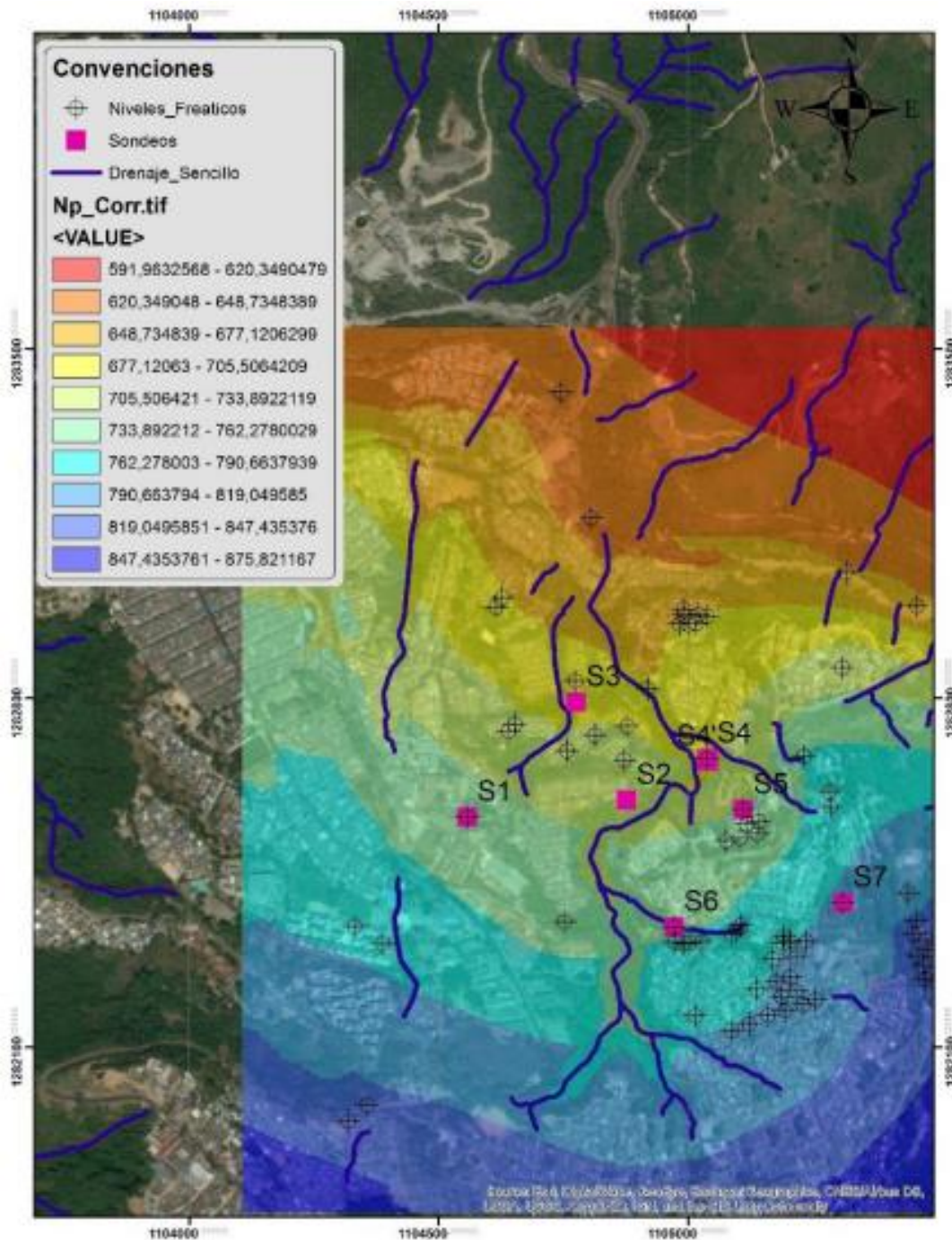
*Unidades hidrogeológicas definidas para un sector del norte de Bucaramanga.*

<b>Unidad hidrogeológica</b>	<b>Unidad litológica</b>	<b>Características</b>
1	Órganos Removido	Generalmente saturado de agua, heterogéneo, estructura caótica, mayor porosidad.
2	Órganos Superior	Depósito fluvioaluvial, denso, permeabilidades bajas.
3	Órganos Inferior	Depósito con tamaños de grano menor, posiblemente basamento hidrogeológico de la unidad superior.
4	Basamento fracturado	Roca fracturada de las formaciones Diamante, Tiburón, Bocas y Girón.

*Nota.* Modificado de UIS - AMB (2017).

**Figura 7.**

*Disposición de los niveles piezométricos dentro del área del proyecto.*

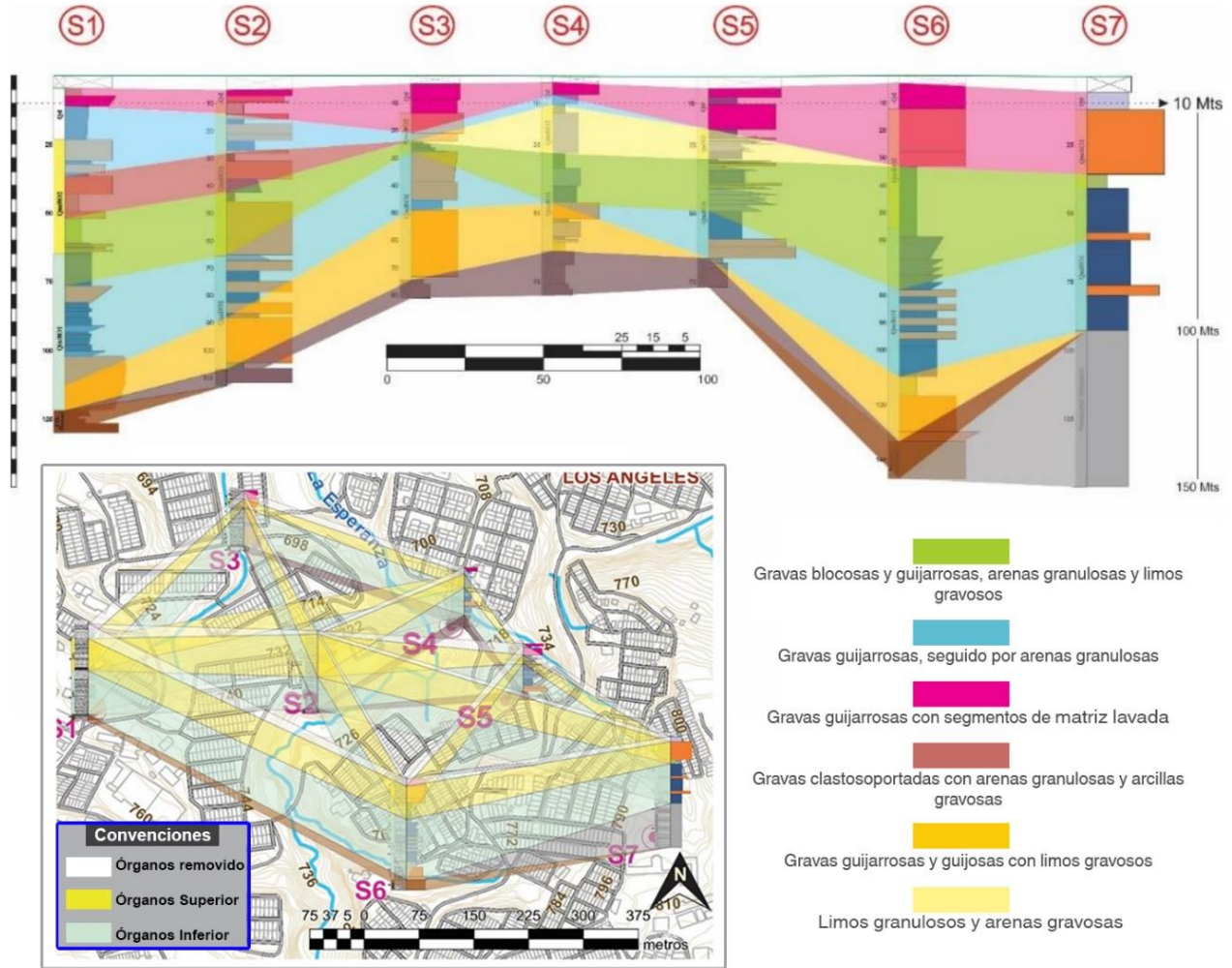


*Nota.* Disposición de los niveles piezométricos dentro del área del proyecto. Los valores S indican la ubicación de los núcleos de perforación a utilizar en este trabajo. Tomado de UIS - AMB (2017).

Con base en estudios geotécnicos y la medición de niveles piezométricos, se observa un gradiente hacia el sur y en dirección hacia la quebrada La Esperanza (Figura 7), clasificadas ésta y las demás quebradas del sector como influentes, que drenan a las unidades hidrogeológicas superficiales o freáticas mediante sistemas de interconexión complejos, no necesariamente definidos, además de la existencia de zonas preferenciales que favorecen el flujo, evidenciado sedimentológicamente en la presencia de materiales lavados sin o con poca matriz en los núcleos de perforación (UIS - AMB, 2017). Adicionalmente, se desarrollaron correlaciones entre asociaciones de facies y correlaciones en diagrama panel de las unidades presentes en el área de estudio, que permiten observar cierta disposición de algunas litofacies en el área interna marcada entre los núcleos de perforación (Figura 8).

**Figura 8.**

*Correlación de las asociaciones de litofacies y correlación estratigráfica en diagrama panel para los núcleos perforados.*



*Nota.* Modificado de UIS - AMB (2017).

Lima y Medina (2015) establecieron los regímenes y ciclos climáticos del miembro Órganos con base en interpretaciones de información sedimentológica, definiendo ambientes de depositación para cada litofacies determinada (Tabla 4). La granulometría de cada segmento, la tendencia de depositación y las estructuras sedimentarias encontradas se registraron, lo que permite entender su evolución geológica, siendo la arquitectura de las facies en el miembro un factor importante para la construcción de modelos de distribución.

**Tabla 4.**

*Ambientes de depositación y regímenes paleoclimáticos interpretados a partir de información de facies del Miembro Órganos.*

<b>Facies</b>	<b>Litología</b>	<b>Arquitectura</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Paleoclima</b>
<b>Gm</b>	Gravas no imbricadas, clasto-soportadas.	Distribución caótica	Barras longitudinales	Precipitaciones torrenciales estacionales
<b>P</b>	Calcreta de coloración blanco-crema	Masiva y tabular	Paleosuelo calcáreo pedogénico	Condiciones de aridez
<b>Fr</b>	Arcillas masivas varicoloreadas	Masivas con desarrollo de surcos	Flujo de canal	Fluctuaciones del nivel freático, precipitaciones moderadas no estacionales
<b>Sh</b>	Arenas varicoloreadas de grano fino a medio	Masivo, estratificación pobre		
<b>Gms</b>	Gravas matriz-soportadas	Gradación normal, ligera imbricación	Flujo de escombros	Fuertes precipitaciones torrenciales estacionales
<b>Gcm</b>	Cantos dispuestos al azar con contacto tangencial	Distribución caótica	Flujo de detritos	Precipitaciones torrenciales estacionales
<b>Pf</b>	Calcreta ferruginosa	Poco espesor, sin variaciones laterales	Sin depositación sedimentaria	Clima tropical

*Nota.* Modificado de Lima y Medina (2015).

Una caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos fue realizada por Ramírez y Hernández (2018) al occidente del municipio, donde se realizó un inventario de facies sedimentarias y su distribución, análisis de química del agua y datos de resistividad en tres líneas de levantamiento geofísico, con las litofacies asociadas y la correlación hidrogeológica definida asignadas a rangos de resistividad (Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Interpretación de las zonas geoeléctricas encontradas en las tomografías del proyecto.*

Facies asociadas	Resistividad (ohm*m)	Correlación hidrogeológica
<b>St - Sp - Sm</b>	40 - 110	Arenas saturadas
<b>Fm - Fl</b>	8 - 40	Arcillas saturadas
<b>Gcm</b>	160 - 550	Gravas saturadas
<b>Fm - Fl</b>	25 - 100	Limos saturados
-	50 - 500	Depósito aluvial

*Nota.* Tomado de Ramírez y Hernández (2018).

Las tomografías de resistividad eléctrica desarrolladas en el Miembro Órganos Superior muestran zonas geoelectricas conductoras (saturadas) con geometría lenticular, correlacionadas con litofacies arenosas de importante porosidad primaria, siendo cuerpos permeables aislados en una matriz impermeable de litofacies de grano fino, donde se comportan como acuíferos colgados embebidos en acuitardos. La hidroquímica, por su parte, marca la presencia de aguas de tipo bicarbonatada cálcica y clorurada sódico-magnésica, relacionadas con fuentes antrópicas (pudiendo ser deficiencias en el sistema de alcantarillado y/o fugas en el sistema de acueducto) en el subsuelo de Bucaramanga (Ramírez y Hernández, 2018).

El Miembro Órganos Inferior fue caracterizado por Contreras y Osma (2018) mediante la revisión, descripción y análisis de los núcleos de perforación (Figura 9), obtenidos por UIS - AMB (2017), donde la distribución porcentual y petrografía de clastos fue base para la evaluación del área fuente del segmento, siendo definida para ésta el Macizo de Santander, en un radio de 18 km. Estas condiciones sedimentológicas permiten entender la dirección de aporte de los sedimentos de la unidad y aportan a la distribución espacial y arquitectura de las capas.

**Figura 9.**

*Columna estratigráfica generalizada para el Miembro Órganos Inferior en el sector norte de Bucaramanga.*

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA SEGMENTO ORGANOS INFERIOR, EN EL SECTOR NORTE DE BUCARAMANGA.

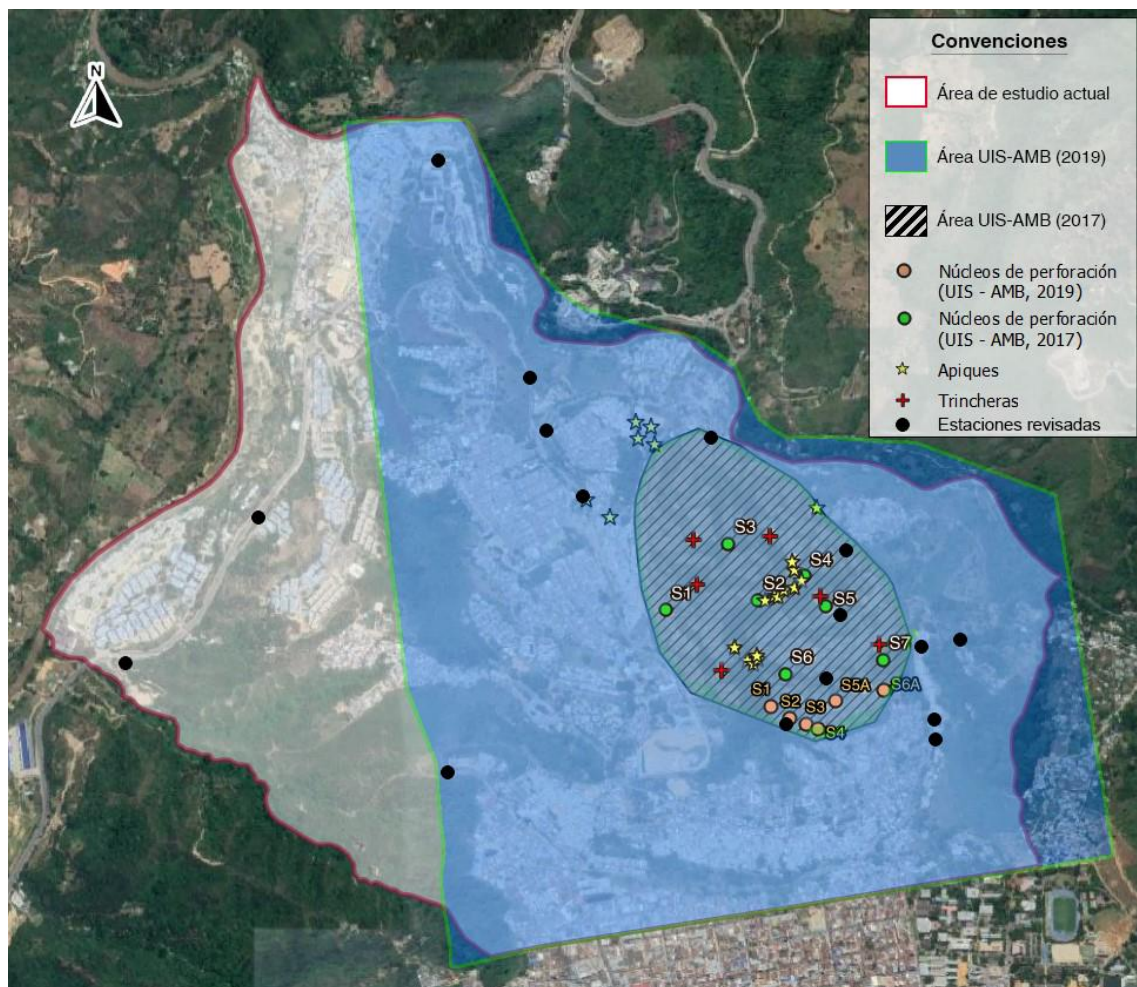
NIVEL (m)	LITOLOGÍA	GRANULOMETRÍA										OBSERVACIONES	Facies	Asociación de facies	Nivel de energía
		LODO		ARENA				GRAVA							
		Arcilla	Limo	Muy Fina	Fina	Mediana	Gruesas	Muy Gruesas	Granulosas	Gujijas	Colgijinos				
58												Limos areno-gravosos.	Flg	1	
												Arenas gruesas a muy gruesas de matriz arenarcillosa.	Smsc		
68												Arenas gruesas a muy gruesas con matriz limosa.	Smf		
												Arenas finas a gruesas con matriz limosa			
												Limo arenoso gravoso.	Flg	2	
												Arenas medias granulosas con matriz arenolodosa.	Sm		
78												Gravas guijosas con matriz arenolimosa. Compuestas por Tonalita, Granitoide rico en cuarzo y Granodiorita	Gms	3	
												Gravas granulosas ligeramente guijosas con matriz areno-arcillosa. Guijos compuestos por Tonalita, Granodiorita y Granitoide rico en cuarzo.	Gmc		
												Gravas granulosas ligeramente guijosas con matriz limoarenosa. Gravos compuestas por Tonalita, Granodiorita.	Gmm		
												Arena media a gruesa ligeramente gravosa	Sp		
											Arena muy fina a fina	Sh			
											Gravas guijarrosas con matriz limoarenosa. Guijos compuestos por Tonalita, Granitoide rico en cuarzo y Neis.	Gmm	4		
107											Limo arenoso ligeramente gravoso. Matriz limosa	Fim			
											Gravas guijarrosas blocosas. Matriz arenosa. Gravos compuestas por Tonalita, Granitoide rico en cuarzo, Monzogranito y Neis.	Gbs			
											Arenas finas a medias ligeramente gravosas.	Sp			
121.5											Gravas guijosas a guijarrosas de matriz limo-arenosa. Compuestas por Granitoide rico en cuarzo, Tonalita y Neis.	Gmm			
											Formación Girón Formación Bocas Grupo Surata (Formación Diamante y Formación Tiburón)				

Nota. Tomado de Contreras y Osma (2018).

Dentro del Convenio Interadministrativo No. 00339 de 2018 entre la Universidad Industrial de Santander y el Área Metropolitana de Bucaramanga, se llevó a cabo el estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle para la construcción de una galería de drenaje como mecanismo de reducción de riesgo por movimientos en masa (informe geológico publicado en 2019, en adelante UIS - AMB, 2019) (Figura 10). Para este proyecto se realizaron 6 perforaciones, con 266 metros totales perforados.

**Figura 10.**

*Áreas de estudio de los proyectos anteriores, con los puntos de núcleos de perforación, apiques y trincheras realizados y estaciones de campo revisadas.*

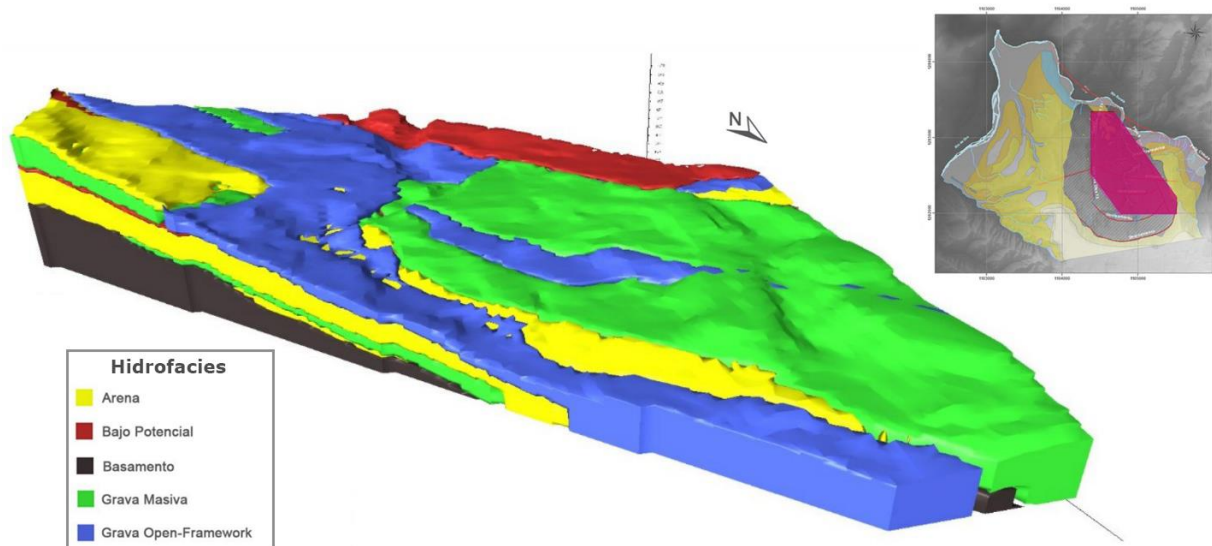


Se realizó un estudio en la zona norte del municipio de Bucaramanga donde se determinó el agua subterránea como detonante de los movimientos en masa, existiendo debilitamiento del suelo por efecto de la presión de poros y distorsión de la geometría de las capas presentes, lo que conlleva una modificación de los sistemas de flujo a una escala de tiempo relativamente rápida (UIS - AMB, 2019). En este estudio se reporta una interfase entre los miembros Órganos Superior e Inferior que permite suponer sistemas de flujo separados localmente interconectados (uno asociado al miembro Órganos Removido y al Miembro Órganos Superior, y otro constituido por el miembro Órganos Inferior y las rocas fracturadas del basamento), principalmente en las zonas de falla donde la productividad a nivel hidrogeológico suele ser mayor.

Finalmente, Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020) realizaron un modelado geométrico de las hidrofacies para un área reducida del sector norte de Bucaramanga con los núcleos de perforación realizados por UIS - AMB (2017), implementando una metodología de relación de litofacies e hidrofacies a través del software Geomodelr, donde quedó registrada la distribución de hidrofacies en la zona de trabajo, estratigráficamente por debajo de los depósitos recientes (Figura 11). Este proyecto es válido como una aproximación al entendimiento de la disposición de las capas en la zona de mayor afectación tectónica, de acuerdo con el modelo estructural. Los resultados de este proyecto muestran la predominancia de una hidrofacies de gravas masivas que favorecen el flujo de aguas subterráneas en el sector. Cabe resaltar las diferencias en el área de estudio de Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020) y la presente investigación.

**Figura 11.**

*Modelo tridimensional de hidrofacies desarrollado por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020).*



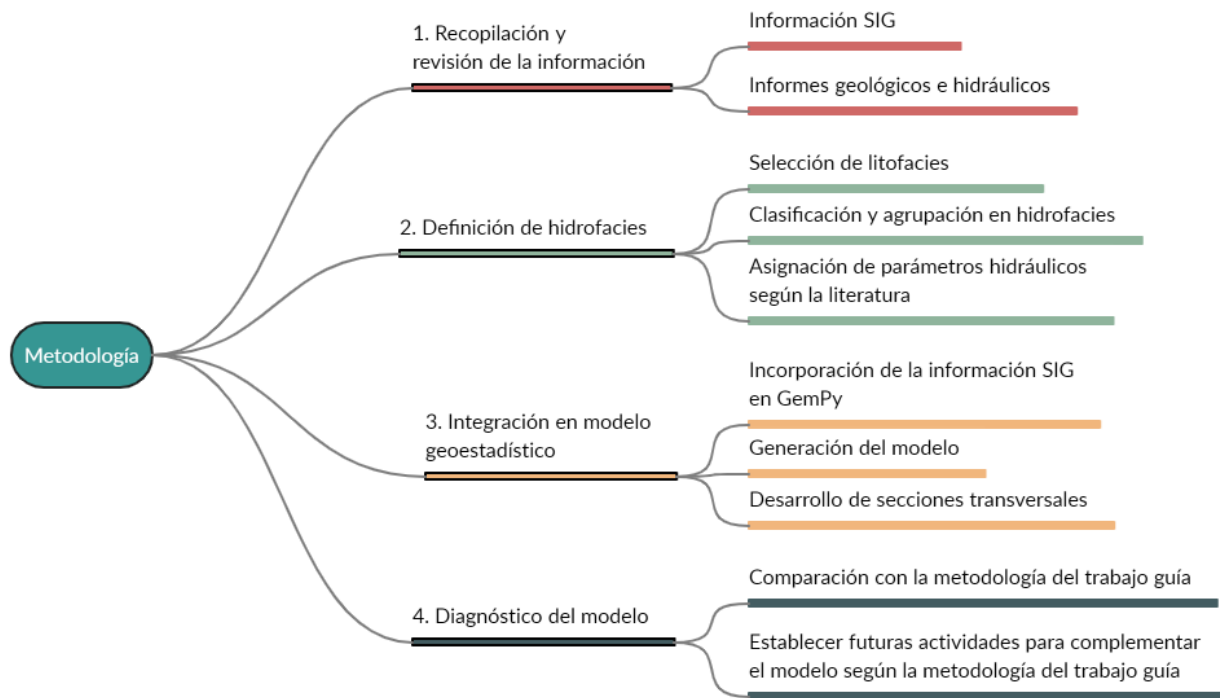
*Nota.* Modelo tridimensional de hidrofacies desarrollado por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020) para una subregión (polígono rosa, ubicado sobre el mapa de localización de la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, marca espacialmente el segmento) del área del proyecto. Esta representación del modelo muestra cuatro hidrofacies, junto con la capa de basamento.

## 7. Metodología

Para el cumplimiento óptimo de los objetivos establecidos se desarrolló una recopilación, clasificación, depuración, procesamiento e integración de la información y las bases de datos de los proyectos desarrollados en el área de estudio (Figura 12).

### Figura 12.

Esquema metodológico donde se representan las fases desarrolladas del presente proyecto.



### 7.1 Recopilación y revisión de la información

Mediante el uso de sistemas de información geográfica de software libre y código abierto (QGIS 3.12.2) se organizó el conjunto de datos georreferenciados en geometrías de puntos, correspondientes a marcas de GPS de reconocimiento y de control, puntos de exploración directa y estaciones de campo; líneas, correspondientes a trazos de falla, coronas de deslizamiento y levantamientos sísmicos y geo-eléctricos para corroborar el comportamiento del subsuelo en algunos segmentos, y polígonos, asociados a la cartografía litológica y geomorfológica.

Posteriormente se llevaron a cabo las actividades de revisión de cartografía de las unidades geológicas presentes en el área de estudio, así como actividades de edición (se hizo corrección de la geometría de polígonos, ajustando las capas de acuerdo a la tendencia topográfica en conjunto con su buzamiento). Se otorgó principal énfasis en los datos obtenidos de estaciones de campo y

reconocimiento de los estudios previos, libretas e informes, fotografías de afloramientos, fotografías aéreas y herramientas tecnológicas de visualización de imágenes panorámicas a nivel de calle (Google Street View) puesto que la logística de la campaña de campo se vio afectada debido a la emisión de decretos nacionales de aislamiento y las recomendaciones epidemiológicas y de sanidad establecidas a raíz de la crisis sanitaria producida por el nuevo coronavirus COVID-19 durante el año 2020.

## **7.2 Definición de hidrofacies**

Con el apoyo bibliográfico de los registros e informes de información geológica e hidráulica obtenida en las campañas de exploración directa de los proyectos realizados por UIS-AMB (2017, 2019), se encontraron dos clasificaciones de litofacies mayoritariamente similares (Tabla 6, Tabla 7), que se procesaron de manera individual y particular. Esto permitió aprovechar mejor las descripciones, convenciones y singularidades sedimentológicas de cada estudio para la posterior correlación con hidrofacies, de acuerdo con el potencial hidrogeológico asociado al componente textural. Se revisaron 931,40 metros de perforación del miembro Órganos de un total 1041,50 metros perforados en estudios previos en la zona, descripciones sedimentológicas de 6 trincheras y 20 apiques, 21 estaciones de campo de proyectos anteriores y revisión de los contactos litológicos para observar el comportamiento y transición entre las litofacies.

Para la asignación o clasificación individual de cada litofacies a una hidrofacies, se realizó una determinación inicial de su potencial hidrogeológico: se tomó en cuenta el tamaño de grano predominante seguido del tamaño de grano secundario y la relación porcentual de estas en cada segmento; también se revisó la presencia o ausencia de matriz, su clasificación textural y la proporción de ésta respecto al armazón.

**Tabla 6.**

*Recopilación de litofacies determinadas para el proyecto UIS - AMB (2017) de acuerdo a información textural.*

<b>Litofacies</b>	<b>Descripción</b>	<b>Litofacies</b>	<b>Descripción</b>
<b>LA</b>	Limo ligeramente arenoso	<b>FSgnp</b>	Limo arenoso ligeramente granuloso
<b>Fcr</b>	Limo calcáreo residual	<b>FSGp</b>	Limo arenoso gravoso con matriz plástica
<b>Fo</b>	Limo negro con materia orgánica	<b>FSGnm</b>	Lodo arenoso granuloso matriz-soportado
<b>FSa</b>	Limo arenoso arcilloso	<b>FGjm</b>	Limo guijoso matriz-soportado
<b>FS</b>	Limo arenoso	<b>FSGn</b>	Limo arenoso granuloso
<b>AF</b>	Arcilla limosa	<b>FSGj</b>	Limo arenoso guijoso
<b>Sf</b>	Arena de grano fino	<b>AGn</b>	Arcilla granulosa
<b>SfLgn</b>	Arena de grano fino lodosa ligeramente granulosa	<b>AGj</b>	Arcilla guijarrosa
<b>SfL</b>	Arena de grano fino lodosa	<b>ASGj</b>	Arcilla arenosa guijarrosa
<b>SfLp</b>	Arena lodosa de gran fino plástica	<b>FA</b>	Limo ligeramente arcilloso
<b>Sff</b>	Arena de grano fino limosa	<b>FGj</b>	Limo guijoso
<b>AS</b>	Arcilla arenosa	<b>FGn</b>	Limo ligeramente granuloso
<b>SLgn</b>	Arena de grano medio lodosa ligeramente granulosa	<b>FGg</b>	Limo granuloso
<b>GGjAclv</b>	Grava guijarrosa arcillosa con matriz parcialmente lavada	<b>LGj</b>	Lodo guijoso
<b>Ggoel</b>	Grava guijarrosa clasto-soportada con matriz lavada	<b>FGnp</b>	Limo granuloso con matriz plástica
<b>GGjcl</b>	Grava guijarrosa clasto-soportada con matriz parcialmente lavada	<b>FSGo</b>	Limo arenoso guijarroso
<b>GGnlv</b>	Grava granulosa con matriz lavada	<b>FGo</b>	Limo ligeramente guijarroso
<b>GGjlv</b>	Grava guijosa con matriz lavada	<b>FGop</b>	Limo guijarroso con matriz plástica
<b>GGjclv</b>	Grava guijosa clasto-soportada con matriz lavada	<b>SmLgo</b>	Arena de grano medio lodosa guijarrosa
<b>SgLv</b>	Arena de grano grueso lavada	<b>SgGj</b>	Arena de grano grueso guijosa
<b>GGjpl</b>	Grava guijarrosa con matriz parcialmente lavada	<b>SfLgj</b>	Arena de grano fino lodosa guijosa
<b>GGnc</b>	Grava granulosa clasto-soportada	<b>ScGjp</b>	Arena guijosa plástica
<b>GBgjc</b>	Grava blocosa ligeramente guijarrosa clasto-soportada	<b>SfAcgjp</b>	Arena de grano fino arcillosa ligeramente guijosa plástica
<b>GBc</b>	Grava blocosa clasto-soportada	<b>SfGj</b>	Arena de grano fino guijosa
<b>GnAcp</b>	Grava granulosa arenosa arcillosa plástica	<b>SGj</b>	Arena guijosa
<b>GGjGbc</b>	Grava guijosa a blocosa clasto-soportada	<b>SmGj</b>	Arena de grano medio ligeramente guijosa

<b>GGoGbc</b>	Grava guijarrosa a blocosa clasto-soportada	Smggn	Arena de grano medio ligeramente granulosa
<b>GGjm</b>	Grava guijosa matriz-soportada	Sfgn	Arena de grano fino ligeramente granulosa
<b>GGoc</b>	Grava guijarrosa clasto-soportada	SgGn	Arena de grano fino granulosa
<b>GGj</b>	Grava guijosa	Sm-GGn	Arena de grano medio granulosa
<b>GGn</b>	Grava granulosa	SmLgn	Arena de grano medio lodosa granulosa
<b>GGjb</b>	Grava guijosa ligeramente blocosa	SmGn	Arena de grano medio granulosa
<b>GGobc</b>	Grava guijarrosa blocosa clasto-soportada	GGjc	Grava guijosa clasto-soportada

*Nota.* Tomado de UIS - AMB (2017).

**Tabla 7.**

*Recopilación de litofacies determinadas para el proyecto UIS - AMB (2019), siguiendo criterios texturales.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>GGo</b>	Grava guijarrosa
<b>GGj</b>	Grava guijosa
<b>GGn</b>	Grava granulosa
<b>GGjLV</b>	Grava guijosa con matriz lavada o parcialmente lavada
<b>AF</b>	Arcilla limosa
<b>L</b>	Lodo
<b>LA</b>	Lodo arcilloso
<b>GGoLV</b>	Grava guijarrosa con matriz lavada o parcialmente lavada
<b>GGjgn</b>	Grava guijosa granulosa
<b>GGjgi</b>	Grava guijosa con gradación inversa
<b>A+L</b>	Arena lodosa en proporción uno a uno
<b>GGjc</b>	Grava guijosa clasto-soportada
<b>ALg</b>	Arcilla ligeramente gravosa
<b>AGj</b>	Arcilla guijosa
<b>SfLGj</b>	Arena de grano fino lodosa guijosa
<b>SLGj</b>	Arena lodosa ligeramente guijosa
<b>SIGg?</b>	Arena lodosa ligeramente gravosa
<b>GGoc</b>	Grava guijarrosa clasto-soportada
<b>A</b>	Arcilla
<b>AmL</b>	Arena de grano medio lodosa
<b>AL</b>	Arena lodosa
<b>LAG</b>	Lodo arenoso gravoso

<b>LGj</b>	Lodo guijoso
<b>LAg</b>	Lodo arenoso de grano medio

*Nota.* Tomado de UIS - AMB (2019).

La agrupación de litofacies y denominación de hidrofacies se realizó siguiendo los parámetros y rangos porcentuales de los diagramas de clasificación textural de Folk (1954) para conservar las propiedades sedimentológicas de cada segmento. Posteriormente, se comparó y relacionó esta clasificación con la clasificación presentada por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020). Para estas hidrofacies se plantearon rangos de porosidad, porosidad efectiva y conductividad hidráulica con base en la información tabulada de estas características para materiales homogéneos y heterogéneos realizada por Vélez Otálvaro (1999).

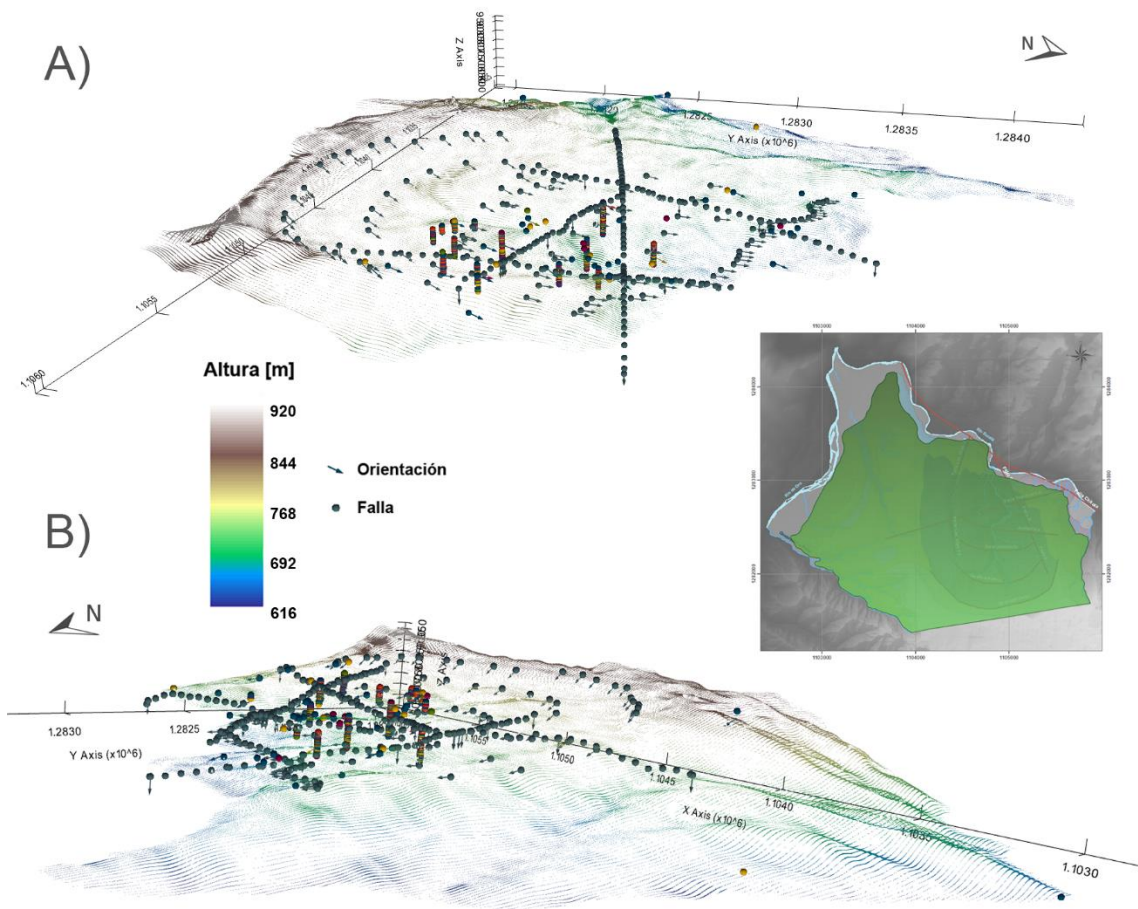
### 7.3 Integración en modelo geoestadístico

El modelo geoestadístico se generó utilizando el software GemPy, escrito en código Python y ejecutado sobre el entorno aplicativo web Jupyter Notebook. Los datos incorporados para la construcción del modelo consistieron en 322 puntos previamente clasificados en hidrofacies, obtenidos de la revisión bibliográfica, estaciones de campo, apiques, trincheras y núcleos de perforación, correspondientes al punto de contacto superior de las hidrofacies; 151 puntos de trazo de falla y datos estructurales, que establecen la distribución y dominio de orientaciones del modelo (Figura 13); cada hidrofacies se definió como una serie particular y distinta para evitar relaciones secuenciales entre éstas. Esta información se recopiló en archivos CSV y posteriormente integrada con una versión modificada de un modelo digital de elevaciones. Este archivo presenta la característica de sólo incluir la extensión espacial del miembro Órganos en el área de estudio,

desde el contacto inferior con las unidades infrayacentes hasta su proyección por debajo de los miembros suprayacentes, para cubrir el área de estudio.

**Figura 13.**

*Visualización de los datos de entrada a interpolar para generar el modelo de hidrofacies en GemPy.*



*Nota.* Los puntos con vectores corresponden a datos de orientación de fallas y control de extensión de estas. Los puntos sin vectores marcan los puntos de hidrofacies cuya cota de altura corresponde a su contacto superior. El modelo digital de elevaciones utilizado corresponde a la superficie del miembro Órganos en su totalidad, señalada en el mapa por el polígono de color verde La figura A

muestra una vista en perspectiva desde el este. La figura B muestra una perspectiva de los datos de entrada desde el oeste.

Los manuales de ejecución, plantillas CSV con el estilo requerido para la lectura del software y portafolio de funciones presentes se encuentran en *gempy.org/documentation*.

Se estableció la relación entre estructuras para el modelo según la relación de corte entre estas, siendo True cuando, para cada fila, la estructura en cuestión es cortada por la estructura respectiva en la matriz de relación (Tabla 8). Posteriormente, el software computó mediante cokriging el modelo tridimensional matemáticamente más probable y se revisó con criterio geológico.

**Tabla 8.**

*Matriz de relación entre estructuras definida según su relación de corte para el modelo a interpolar.*

Estructura	F. Chitota	F. Las Olas	F. S	F. Transversal	F. Antitética	Des. 1	Des. 2	Des. 3
<b>F. Chitota</b>	-	False	False	False	False	False	False	False
<b>F. Las Olas</b>	<b>True</b>	-	False	<b>True</b>	False	False	False	False
<b>F. S</b>	<b>True</b>	False	-	<b>True</b>	<b>True</b>	False	False	False
<b>F. Transversal</b>	<b>True</b>	False	False	-	False	False	False	False
<b>F. Antitética</b>	False	False	False	<b>True</b>	-	False	False	False
<b>Des. 1</b>	False	False	False	False	False	-	False	False
<b>Des. 2</b>	False	False	<b>True</b>	False	False	<b>True</b>	-	False
<b>Des. 3</b>	False	<b>True</b>	<b>True</b>	False	False	<b>True</b>	False	-

*Nota.* Las estructuras ubicadas en las filas se verifican contra las estructuras de las columnas, siendo verdaderas al encontrarse limitada su extensión por estas.

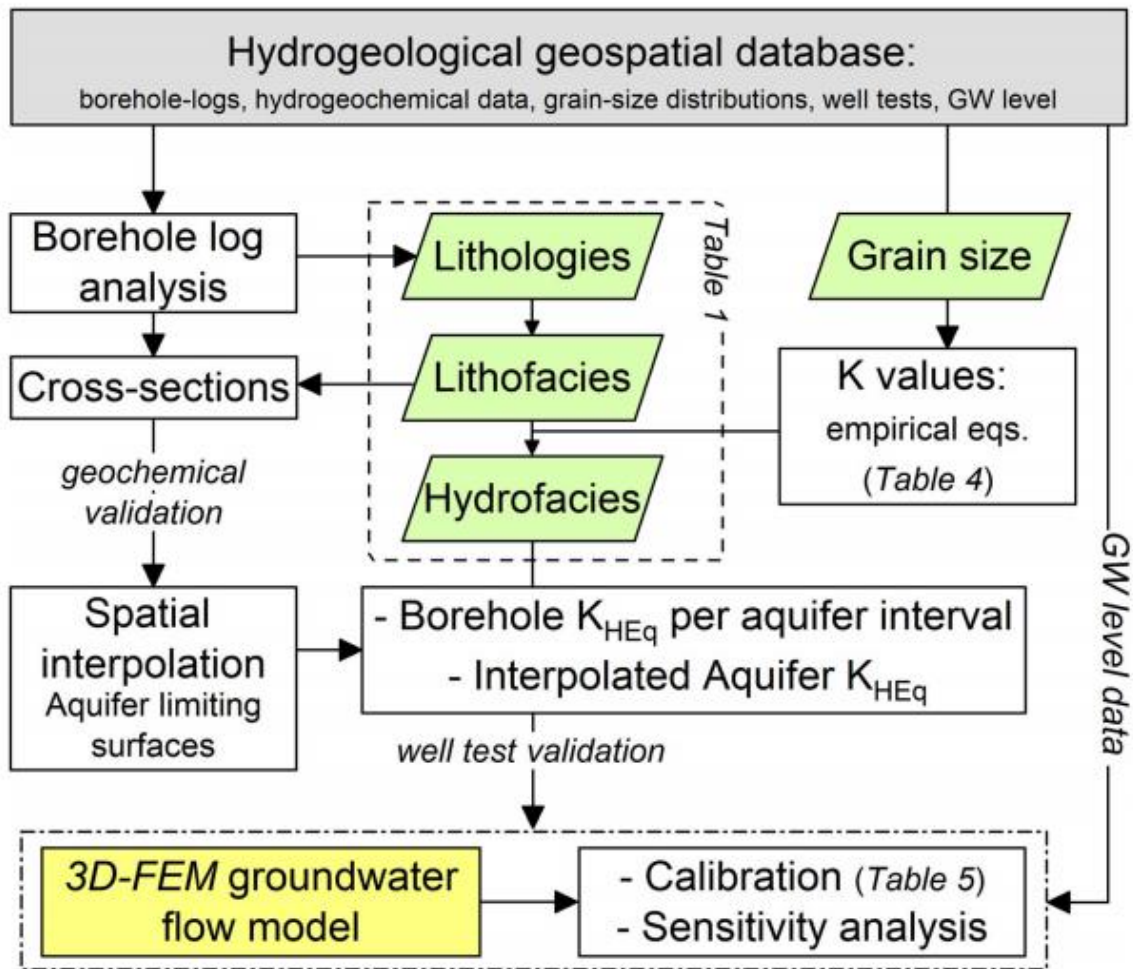
La simulación gráfica de este modelo se desarrolló en un marco de voxels (que corresponden a la subdivisión volumétrica del espacio total de referencia en elementos discretos tridimensionales) de 70 x 70 x 150, es decir, 735000 voxels de procesamiento, que corresponde a la subdivisión volumétrica del espacio total de referencia en elementos discretos tridimensionales. En este sentido, el área de estudio (de 3174 m x 2775 m x 232 m) se subdividió en celdas de 45,34 m x 39,64 m x 1,55 m. Esto permite hacer un énfasis principal sobre el eje de profundidad, de tal forma que cada bloque de análisis represente la hidrofacies predominante en segmentos de 1,55 m por cada núcleo de perforación, dada la escala y el área de la zona de estudio.

#### **7.4 Diagnóstico del modelo**

El diagnóstico del modelo a presentar se realizó siguiendo la metodología desarrollada por De Caro *et al.* (2020), donde se propone un enfoque para la reconstrucción de la geometría del acuífero ubicado bajo el área metropolitana de Milán, Italia, con base en la relación entre litofacies e hidrofacies definidas sedimentológicamente y su correlación espacial para obtener subunidades casi homogéneas a partir de los datos disponibles y conocimiento sedimentológico, entendiéndose como diagnóstico la comparación y ubicación del alcance logrado en este trabajo dentro de la metodología seguida por De Caro *et al.* (2020) (Figura 14), utilizado como guía en la construcción de un modelo final de hidrofacies. Esto permitió finalmente proponer la aplicación de herramientas que contribuyan en la línea de desarrollo del modelo más allá de una aproximación (como fase inicial), por lo que se recomendaron algunas técnicas de calibración, control y monitoreo, que complementen la información hidrogeológica del sector norte de Bucaramanga, Colombia, a partir de los resultados alcanzados, para ampliar el registro hidrogeológico del área de estudio siguiendo una metodología reciente.

**Figura 14.**

*Esquema conceptual del enfoque propuesto para la modelización hidroestratigráfica a escala regional.*



*Nota.* Tomado de De Caro *et al.* (2020).

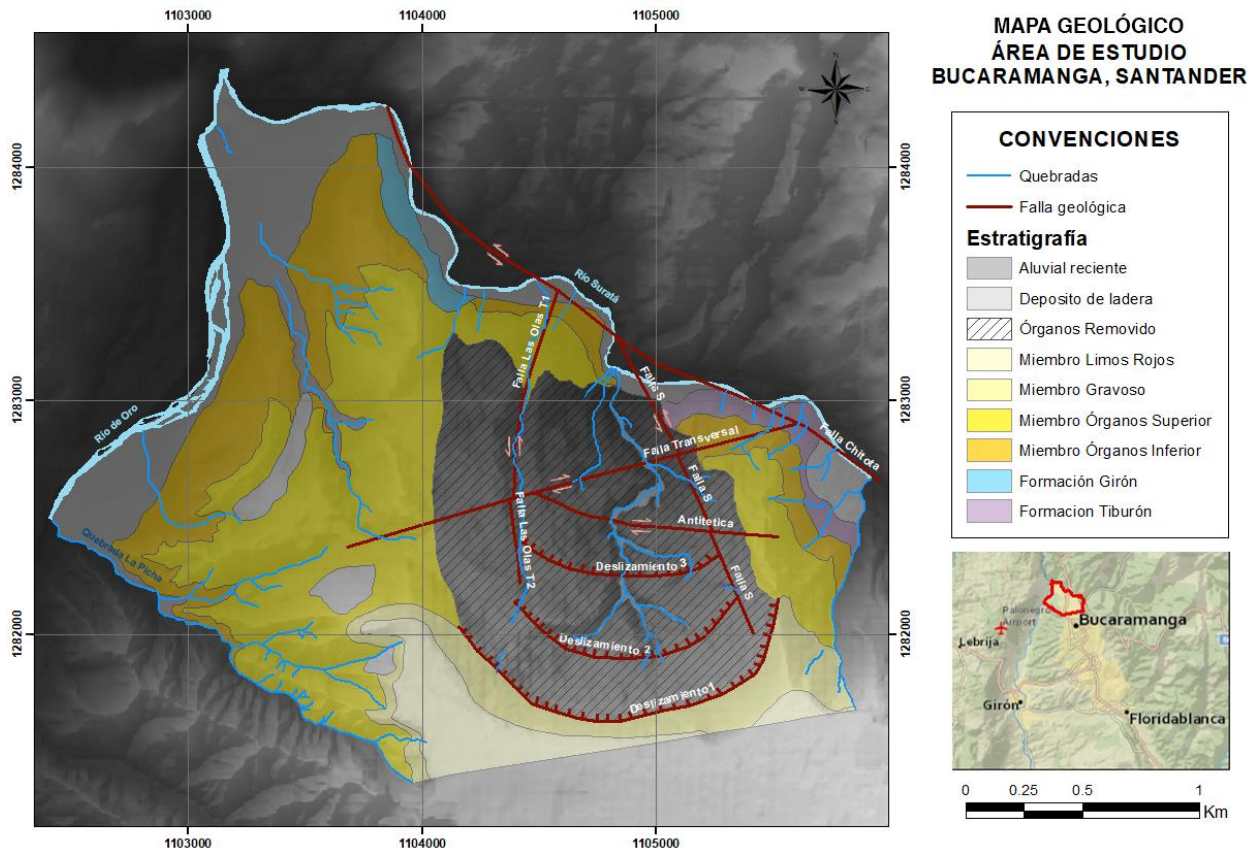
## 8. Resultados

El área de estudio se encuentra sobre la escarpa norte del Abanico Aluvial de Bucaramanga, con un total de 5,90 km<sup>2</sup> (Figura 15). Se denota la predominancia en superficie de las unidades

Órganos Removido y el Miembro Órganos Superior, con áreas de 1,67 y 1,57 km<sup>2</sup>, respectivamente.

**Figura 15.**

*Mapa geológico del área de estudio, a escala 1:5 000.*



*Nota.* El control de la cartografía de acuerdo a factores como la topografía, secciones transversales y buzamiento permitieron ajustar la extensión de las capas, principalmente la del Miembro Órganos, tanto en los contactos infrayacentes como suprayacentes.

### 8.1 Clasificación de hidrofacies en el área de estudio

Se seleccionaron 90 litofacies en total, que corresponden a 66 litofacies definidas en UIS - AMB (2017) y 24 litofacies para los núcleos realizados por UIS - AMB (2019), consignadas en la

Tabla 6 y Tabla 7, respectivamente. En este sentido, se establecieron finalmente seis hidrofacies (Tabla 9), denotadas según la agrupación de características observadas en los datos sedimentológicos.

**Tabla 9.**

*Correlación entre litofacies recopiladas de estudios previos y las hidrofacies determinadas en el área de estudio y su descripción.*

<b>Hidrofacies</b>	<b>Litofacies UIS-AMB (2017)</b>	<b>Litofacies UIS-AMB (2019)</b>	<b>Descripción</b>
<b>Lodos y arcillas (LA)</b>	LA, Fcr, Fo, FSa, FS, AF	AF, L, LA, A	Limos, limos arcillosos, arcillas limosas y limos ligeramente arenosos, con consistencia plástica, variación granulométrica restringida, con ocurrencia nula o atípica de clastos de mayor tamaño no representativos.
<b>Arenas lodosas (AL)</b>	Sf, SfLgn, SfL, SfLp, SFf, AS, SLgn	A+L, AmL, AL, LAg	Arenas de grano muy fino a fino, localmente de grano medio, lodosas, ligeramente granulosas, con escasa o nula ocurrencia de gravas (< 10%). Limos arenosos con proporción de arena > 10%.
<b>Gravas sin matriz (Gsm)</b>	GGjAclv, GGocl, GGjcl, GGnlv, GGjlv, GGjclv, SgLv, GGjpl	GGjLV, GGoLV	Gravas guijosas, guijarrosas y granulosas, localmente arenas de grano muy grueso, con matriz total o parcialmente lavada (poca presencia de matriz, principalmente localizada en la superficie de los clastos o permitiendo un contacto flotante entre estos).
<b>Gravas masivas (GM)</b>	GGnc, GBgjc, GBc, GnAcp, GGjGbc, GGoGbc, GGjm, GGoc, GGj, GGn, GGjb, GGobc, GGjc	GGo, GGj, GGn, GGjgn, GGjgi, GGjc, GGoc	Gravas granulosas, guijosas, guijarrosas, presencia de bloques, clastosoportadas (armazón > 30%), con matriz arenolodosa.
<b>Lodos y arcillas gravosas (LAGr)</b>	FSgnp, FSGp, FSGnm, FGjm, FSGn, FSGj, AGn, AGj, ASGj, FA, FGj, FGn, FGg, LGj, FGnp, FSGo, FGo, FGop	ALg, AGj, LAG, LGj	Limos guijosos, guijarrosos, arenosos gravosos, arcillas guijosas, arenosas guijarrosas, con matriz plástica, con porcentaje de gravas entre 10% y 30%.
<b>Arenas gravosas (AGr)</b>	SmLgo, SgGj, SfLgj, ScGjp, SfAcgjp, SfGj, SGj, SmGj, Smggn, Sfgn, SgGn, Sm-GGn, SmLgn, SmGn	SfLGj, SLGj, SIGg?	Arenas de grano medio a muy grueso, guijosas, guijarrosas, granulosas, con porcentaje de gravas entre 10% y 30%, presencia ocasional de arcillas y limos.

Las correlaciones entre las hidrofacies resultantes con las realizadas por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020) se presentan en la Tabla 10. Dos de estas hidrofacies se relacionan directamente, siendo subcategorías las cuatro restantes, puesto que fue posible identificar diferentes tendencias internas siguiendo los criterios de clasificación.

**Tabla 10.**

*Correlación entre las hidrofacies de estudios previos y la clasificación final.*

Hidrofacies de Klingbeil <i>et al.</i> (1999)	Hidrofacies de Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020)	Clasificación final de hidrofacies
<b>Grava Masiva</b>	Grava Masiva	Gravas masivas ( <b>GM</b> )
<b>Grava Open-Framework</b>	Grava Open-Framework	Gravas sin matriz ( <b>Gsm</b> )
<b>Arena</b>	Arena	Arenas gravosas ( <b>AGr</b> )
		Arenas lodosas ( <b>AL</b> )
-	Bajo Potencial	Lodos y arcillas gravosas ( <b>LAGr</b> )
		Limos y arcillas ( <b>LA</b> )
<b>Grava bimodal</b>	<i>No determinadas en el área de estudio</i>	
<b>Grava P/T/H</b>	<i>No determinadas en el área de estudio</i>	

*Nota.* La correlación se realiza según las condiciones sedimentológicas determinadas en los núcleos de perforación del área de estudio. P: planar, T: tabular, H: horizontal.

La hidrofacies Arena del trabajo de Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020) se subclasificó según el segundo tamaño de grano predominante, que podrían indicar posibles comportamientos diferentes de acuerdo al potencial hidrogeológico, del mismo modo que la hidrofacies Bajo Potencial. Las hidrofacies Grava bimodal y Grava P/T/H de Klingbeil *et al.* (1999) no son determinadas en el área de estudio puesto que no se encontró reportado el desarrollo de estructuras ni rangos granulométricos estrictamente bimodales.

Para el miembro Órganos se tiene, según los núcleos de perforación realizados, una predominancia en poco más del 60% de dos hidrofacies, siendo estas las gravas masivas (GM) y las arenas gravosas (AGr), sobre las 4 hidrofacies restantes (Tabla 11). Los segmentos cuya granulometría es particularmente fina a muy fina, donde la ocurrencia de gravas es nula u ocasional, correspondientes a las hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA), comprenden aproximadamente el 10% del material analizado, repartidos en intervalos más pequeños donde prevalecen las características de sellos o barreras de flujo. El parámetro del espesor por hidrofacies se grafica en la Figura 16. Las hidrofacies de gravas masivas (GM) y arenas gravosas (AGr) son las que presentan mayores intervalos de espesor en el área de estudio, siendo las gravas sin matriz (Gsm) las de menor espesor por capa.

**Tabla 11.**

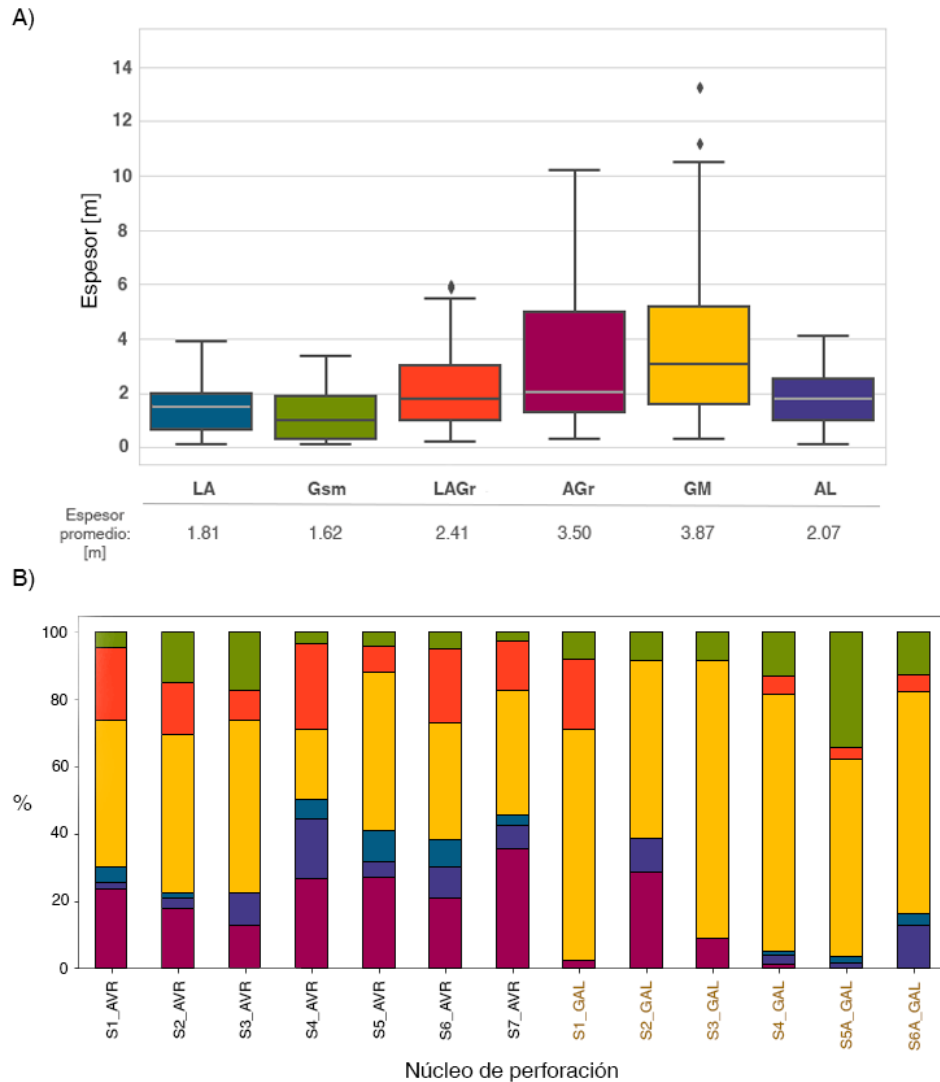
*Proporción de la longitud total de cada hidrofacies determinada en los 13 núcleos de perforación y en cada subdivisión del Miembro Órganos.*

<b>Hidrofacies</b>	<b>Proporción en núcleos [%]</b>	<b>Proporción Órganos Inferior [%]</b>	<b>Proporción Órganos Superior [%]</b>	<b>Proporción Órganos Removido [%]</b>
<b>GM</b>	48,17	40,48	55,44	45,98
<b>AGr</b>	18,05	31,11	10,32	11,38
<b>LAGr</b>	13,73	11,40	17,39	9,74
<b>Gsm</b>	9,92	3,95	9,47	21,95
<b>AL</b>	6,44	8,28	4,49	7,45
<b>LA</b>	3,69	4,78	2,89	3,50

*Nota.* Se revisaron 931,40 metros de miembro Órganos en 1041,50 metros perforados en estudios anteriores.

**Figura 16.**

*Esquemas de visualización de la información de espesores y proporciones de hidrofacies.*

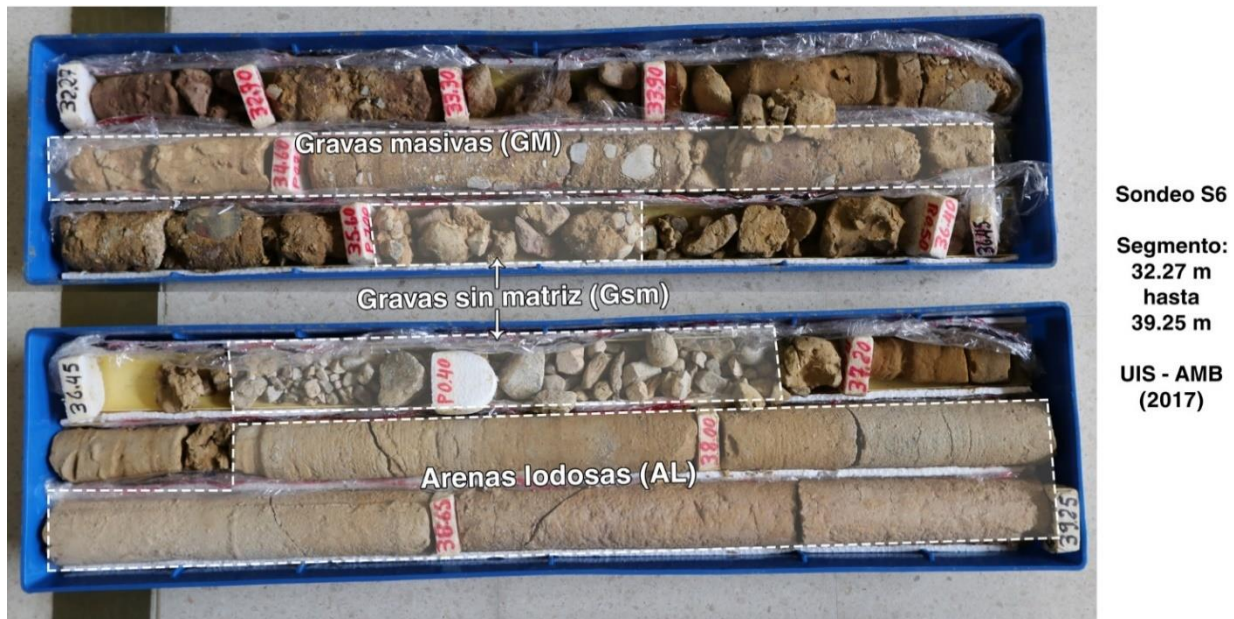


*Nota.* A) Diagrama de cajas para el espesor de las hidrofacies, junto con el espesor promedio de las mismas, en metros. Las hidrofacies de gravas masivas (GM) y arenas gravosas (AGr) presentan mayores intervalos de espesor en el área de estudio, siendo las gravas sin matriz (Gsm) las de menor espesor. B) Gráfico de barras apiladas de la proporción de hidrofacies en cada núcleo de perforación (núcleos AVR: UIS - AMB (2017), núcleos GAL: UIS - AMB (2019)).

La hidrofacies de gravas masivas (GM) corresponde al 48,17% del material analizado, con variaciones de espesor principalmente entre 1,57 m y 5,20 m (50% de las mediciones), y valores mínimo y máximo de 0,30 m y 13,90 m, respectivamente. Esta hidrofacies reúne las características texturales de las gravas típicas, principalmente con tamaños de guijarros y guijos con matriz arenolodosa y ausencia de estructuras desarrolladas. En este mismo sentido, la hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm) equivale al 9,92% del material analizado, para los conjuntos de gravas (principalmente guijos) con matriz total o parcialmente lavada (rangos de espesor entre 0,30 y 1,90 m principalmente, con mínimo de 0,10 m y máximo de 3,92 m), y la hidrofacies de arenas lodosas (AL), con rangos de espesor entre 1,00 m y 2,50 m principalmente (0,10 m y 4,15 m como valores mínimo y máximo) para un total del 6,44% del material analizado. Presenta granos tamaño arena muy fina y fina, localmente de grano medio, lodosas, ligeramente granuladas y con escasa o nula ocurrencia de gravas (Figura 17).

**Figura 17.**

*Visualización de las hidrofacies de gravas masivas (GM), gravas sin matriz (Gsm) y arenas lodosas (AL) en el sondeo S6 desarrollado por UIS - AMB (2017).*

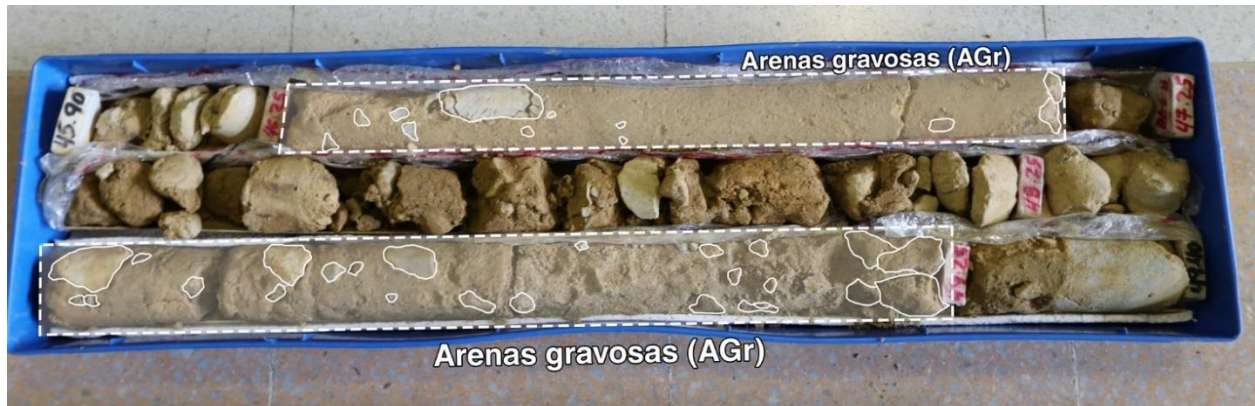


*Nota.* La profundidad del intervalo mostrado está entre los 32,27 m y los 39,25 m de profundidad. Modificado de UIS - AMB (2017).

La hidrofacies de arenas gravosas (AGr) equivale al 18,05% del material de los núcleos perforados, con variaciones de espesor principalmente entre 1,30 m y 5,00 m (50% de las mediciones), y valores mínimo y máximo de 0,30 m y 10,30 m, respectivamente. A esta hidrofacies corresponden los segmentos de arenas de grano medio a muy grueso, guijosas, guijarrosas, granuladas, con porcentaje de gravas entre 10% y 30% y con presencia ocasional de arcillas y limos (Figura 18).

**Figura 18.**

*Visualización de las hidrofacies de arenas gravosas (AGr) en el sondeo S2 desarrollado por UIS - AMB (2017).*



**Sondeo S2**

**Segmento: 45.90 m hasta 49.25 m**

**UIS - AMB (2017)**

*Nota.* La profundidad del intervalo mostrado está entre los 45,90 m y los 49,25 m de profundidad. Modificado de UIS - AMB (2017).

El 13,73% del material perforado del miembro Órganos corresponde a la hidrofacies de lodos y arcillas gravosas (LAGr), con rangos de espesor entre 1,00 m y 3,00 m fundamentalmente (0,20 m y 5,90 m como valores mínimo y máximo). En esta hidrofacies se reúnen los segmentos de limos guijosos, guijarrosos, limos arenosos gravosos, arcillas guijosas, arenosas guijarrosas, con matriz plástica y con porcentaje de gravas entre el 10% y 30% (Figura 19).

**Figura 19.**

*Visualización de las hidrofacies de lodos y arcillas gravosas (LAGr) en el sondeo S3 desarrollado por UIS - AMB (2017).*

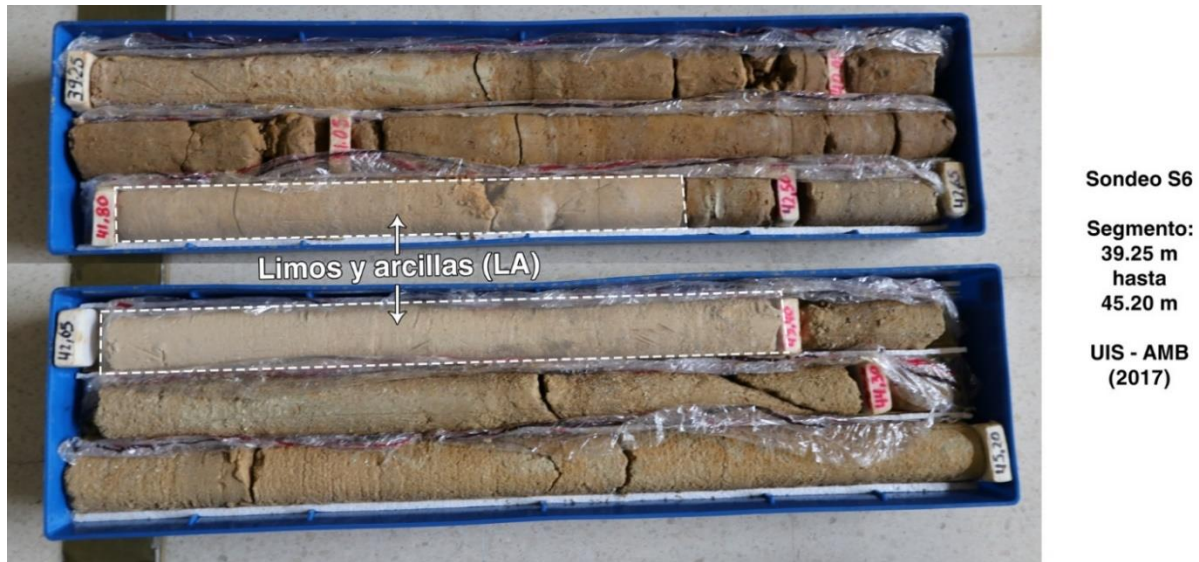


*Nota.* La profundidad del intervalo mostrado está entre los 68,60 m y los 74,50 m de profundidad. Modificado de UIS - AMB (2017).

A la hidrofacies de limos y arcillas (LA) corresponde el 3,69% del material perforado del miembro Órganos, con rangos de espesor entre 0,65 m y 2,00 m principalmente (50% de las mediciones), y valores mínimo y máximo de 0,10 m y 3,90 m, respectivamente. A esta hidrofacies corresponden los intervalos de limos, limos arcillosos, arcillas limosas y limos ligeramente arenosos, con consistencia plástica, variación granulométrica restringida, con ocurrencia nula o atípica de clastos de mayor tamaño no representativos, capaces de establecer segmentos de sellos y de barreras de flujo (Figura 20).

**Figura 20.**

*Visualización de las hidrofacies de limos y arcillas (LA) en el sondeo S6 desarrollado por UIS - AMB (2017).*



*Nota.* La profundidad del intervalo mostrado está entre los 39,25 m y los 45,20 m de profundidad. Modificado de UIS - AMB (2017).

Para las hidrofacies establecidas se sugieren unos rangos de valores teóricos de porosidad, porosidad efectiva y de conductividad hidráulica, consignados en la Tabla 12, que se determinaron con base en los valores planteados por Vélez Otálvaro (1999) para distintos materiales, según su rango granulométrico. Paralelamente también se muestra el promedio de los valores de conductividad hidráulica medidos experimentalmente en algunas muestras de núcleos de perforación del área de estudio, realizados por UIS - AMB (2017, 2019), asociado con la hidrofacies respectiva a la que pertenece.

**Tabla 12.**

*Rangos de porosidad, porosidad efectiva y conductividad hidráulica K propuestos para las hidrofacies determinadas, con base en los valores planteados por Vélez Otálvaro (1999).*

Hidrofacies	Porosidad (%)	Porosidad efectiva (%)	K teórico (m/s)	K experimental* (m/s)	Potencial hidrogeológico
-------------	---------------	------------------------	-----------------	-----------------------	--------------------------

<b>Gravas masivas (GM)</b>	25 - 40	10 - 20	$1 - 10^{-3}$	$6,51 * 10^{-8}$	Acuífero
<b>Gravas sin matriz (Gsm)</b>	25 - 50	> 25	$10^2 - 10^{-2}$	-	
<b>Arenas gravosas (AGr)</b>	36 - 40	20 - 25	$10^{-2} - 10^{-3}$	$1,29 * 10^{-8}$	Acuitardo
<b>Arenas lodosas (AL)</b>	35 - 50	5 - 20	$10^{-3} - 10^{-7}$	-	
<b>Lodos y arcillas gravosas (LAGr)</b>	35 - 40	5 - 25	$10^{-3} - 10^{-7}$	-	Acuícludo
<b>Limos y arcillas (LA)</b>	40 - 70	3	$<10^{-7}$	$6,17 * 10^{-10}$	

*Nota.* Los valores de K experimental corresponden a ensayos de permeabilidad realizados por UIS - AMB (2017) en algunas muestras de núcleos de perforación.

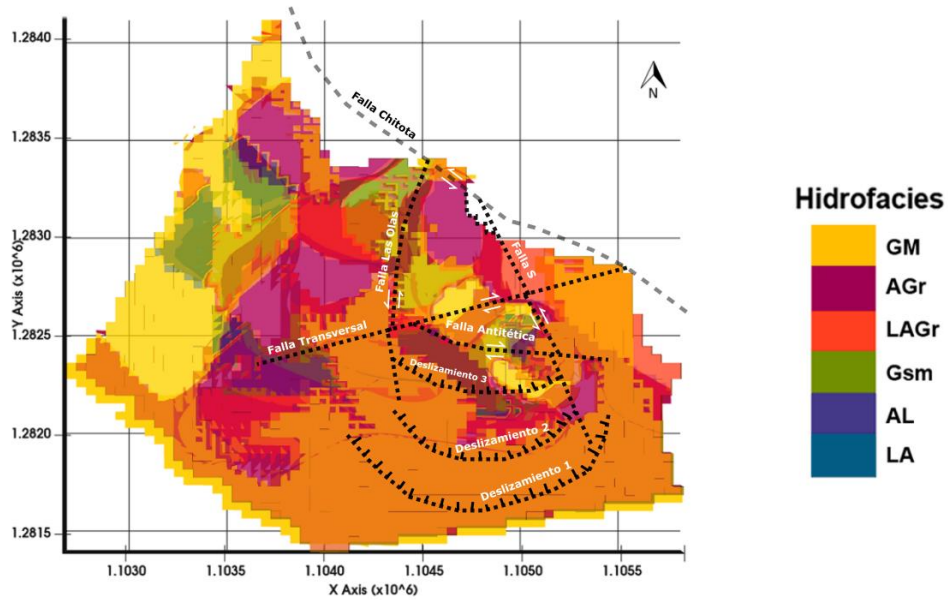
## 8.2 Modelo de hidrofacies

El modelo geoestadístico, generado a partir de datos de exploración directa, muestra la distribución de hidrofacies para el miembro Órganos matemáticamente más probable en el área de estudio, a nivel de superficie (Figura 21) y en profundidad (Figura 22 y Figura 23). Estas hidrofacies definen diferentes sectores según el potencial hidrogeológico mediante el análisis de distribución de tamaños de grano para asignar propiedades hidráulicas preliminares a las capas (Tabla 12). Para este modelo se incorporaron 322 puntos georreferenciados de hidrofacies.

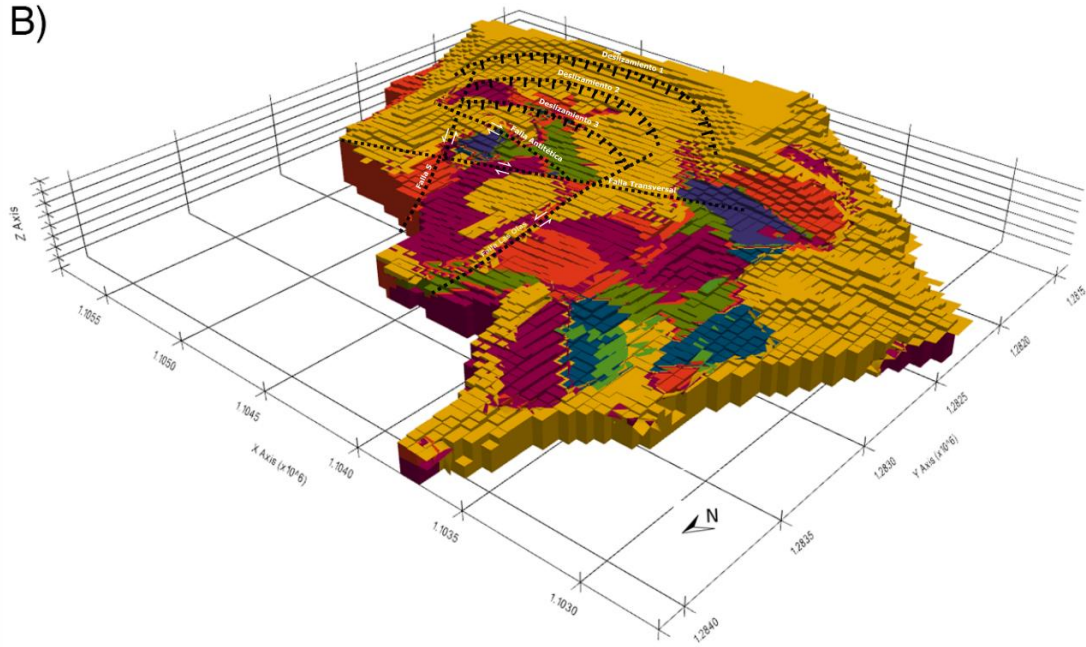
### Figura 21.

*Modelo de hidrofacies generado para el sector norte de Bucaramanga.*

A)



B)



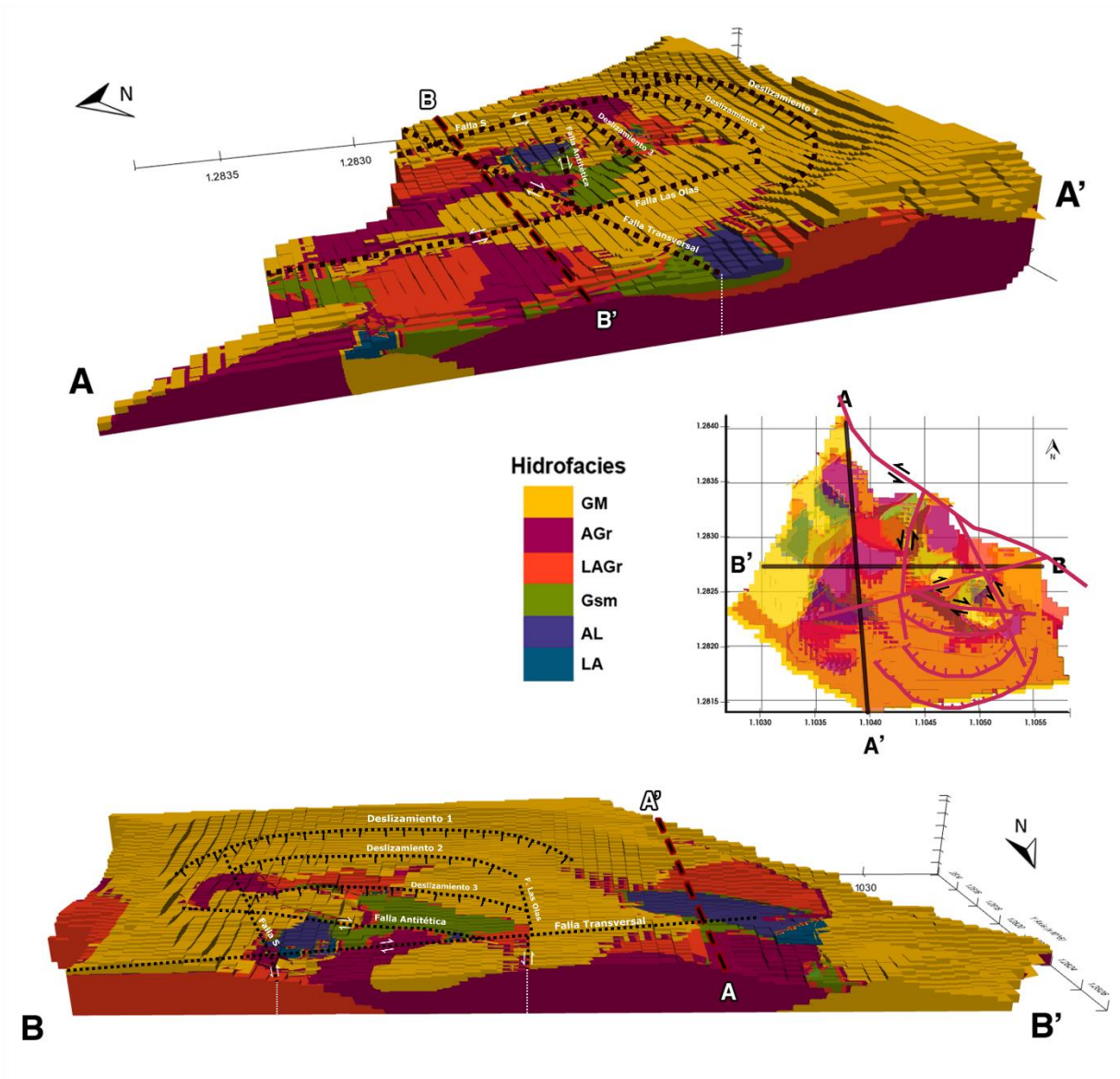
Nota. A) Esquema en planta de las capas con una transparencia del 70%. B) Representación en perspectiva de los 735 000 voxels del modelo de hidrofacies, asignados individualmente a una hidrofacies particular, con dimensiones unitarias de 45,34 m x 39,64 m x 1,55 m.

Este resultado muestra y establece a la hidrofacies de gravas masivas (GM) como la clase con mayor distribución a nivel de superficie. En la Figura 21a se muestra una representación en planta del modelo generado en esquema de voxels con transparencia del 70%, que permite visualizar preliminarmente la distribución geométrica de las hidrofacies en profundidad. Con 735000 voxels de cálculo, el área de estudio se clasificó puntualmente según la hidrofacies predominante (Figura 21b).

En un corte realizado en dirección N-S sobre la sección de mayor longitud (sección A-A') se destaca la ocurrencia de niveles con vocación acuífera (hidrofacies GM, AGr y Gsm), los cuales en algunos sectores configuran un solo sistema y en otros se encuentran separados hidráulicamente por la presencia de la hidrofacies LAGr, donde las capas que infrayace la hidrofacies LAGr configuran acuíferos semiconfinados (Figura 22). La sección A-A' muestra una geometría acanalada de las hidrofacies, cuya interacción hacia el oeste denota un dominio de capas con potencial acuífero en el subsuelo del área de estudio, visible en un corte realizado en dirección E-W (sección B-B'). Así mismo, cortes realizados sobre el sector de ocurrencia de deslizamientos (Figura 23) parecen mostrar posibles tendencias asociadas a estos, de la misma forma que con las fallas presentes en el área de estudio. En general, se destaca una correlación continua en las hidrofacies ubicadas cerca al contacto entre los miembros Órganos Superior y Órganos Removido, definido implícitamente como la mayor superficie de deslizamiento.

**Figura 22.**

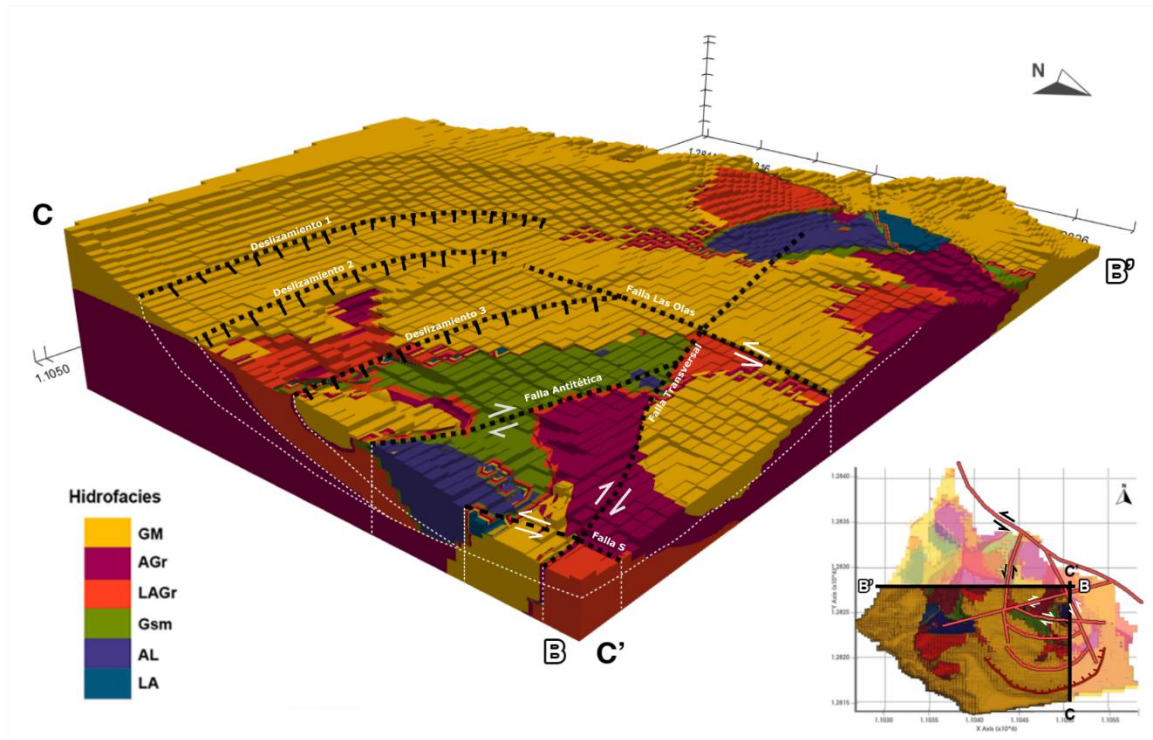
*Representación de dos secciones transversales realizadas en el modelo.*



*Nota.* El corte A-A' destaca la distribución espacial longitudinal de una capa de hidrofacies de arenas gravosas, cuya geometría acanalada logra representarse sobre el corte B-B'.

**Figura 23.**

*Secciones transversales B-B' y C-C' del modelo.*



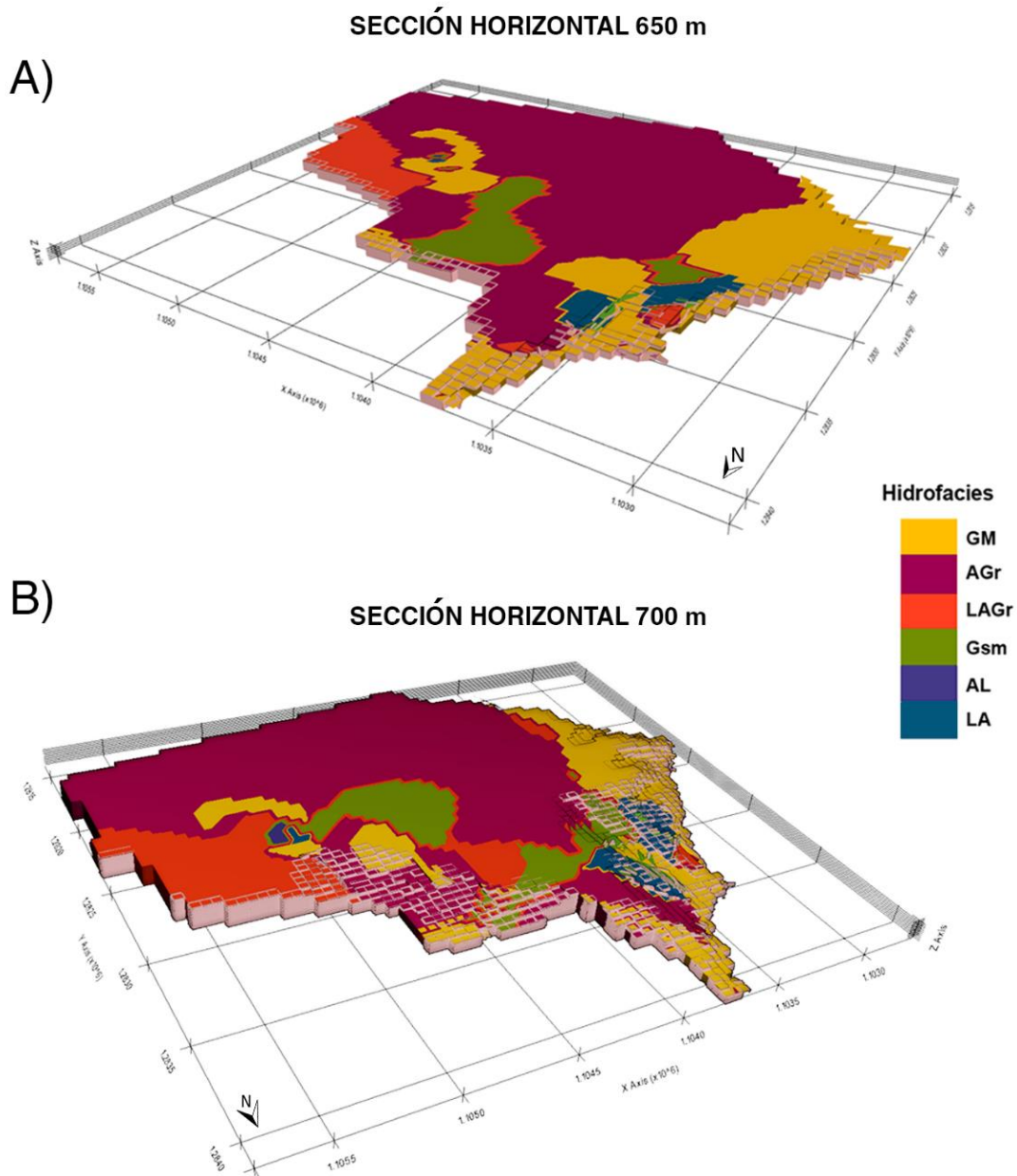
*Nota.* La sección C-C' en dirección N-S se ubica dentro de la zona de ocurrencia de deslizamientos, donde se destacan posibles tendencias marcadas según estos, aunque en general se destacan correlaciones continuas de hidrofacies entre los miembros Órganos Superior y Órganos Removido. Se destaca un posible control estructural por el contacto casi vertical entre un segmento de gravas masivas (GM) y lodos y arcillas gravosas (LAGr), por donde se traza una falla de rumbo. La sección E-W corresponde al corte B-B' de la Figura 22.

Además de las secciones transversales se realizaron 4 secciones horizontales que permiten observar la distribución espacial de las capas. La primera sección horizontal se realizó sobre la cota de 650 metros (Figura 24a), donde se observa un dominio de arenas gravosas (AGr), principalmente hacia el sur del área de estudio, con ocurrencia local de lodos y arcillas gravosas (LAGr) y gravas masivas (GM), estando esta última presente hacia el oeste. Los segmentos de

hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA) son aislados y con poca proporción de extensión respecto a las otras hidrofacies. Estos segmentos pueden aumentar considerablemente su extensión entre los 650 y 700 metros de profundidad, donde la transición entre el miembro Órganos Inferior y Superior es marcado por un intervalo de capas lodosas. La hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm) se muestra hacia el oeste de la zona donde ocurren fallas por deslizamientos, extendiéndose hacia el norte. Sobre esta zona también se observan capas interconectadas de hidrofacies de gravas masivas (GM) de aproximadamente 0,50 km<sup>2</sup>, con geometría concorde a las fallas de deslizamiento. En la cota 700 (Figura 24b) se identifican segmentos, intercalados horizontalmente, de hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm) y lodos y arcillas gravosas (LAGr), que pueden condicionar relativamente la aptitud del medio y establecer posibles patrones en el transporte de aguas subterráneas. Sobre este plano las gravas masivas (GM) son aisladas y las hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA) aumentan su extensión al norte, siguiendo geometrías alargadas semejantes a barras longitudinales. El segmento principal de arenas gravosas (AGr) parece reducir progresivamente su extensión, adaptándose a la topografía hacia el oeste del área.

**Figura 24.**

*Secciones horizontales realizadas en profundidad 650 - 700.*

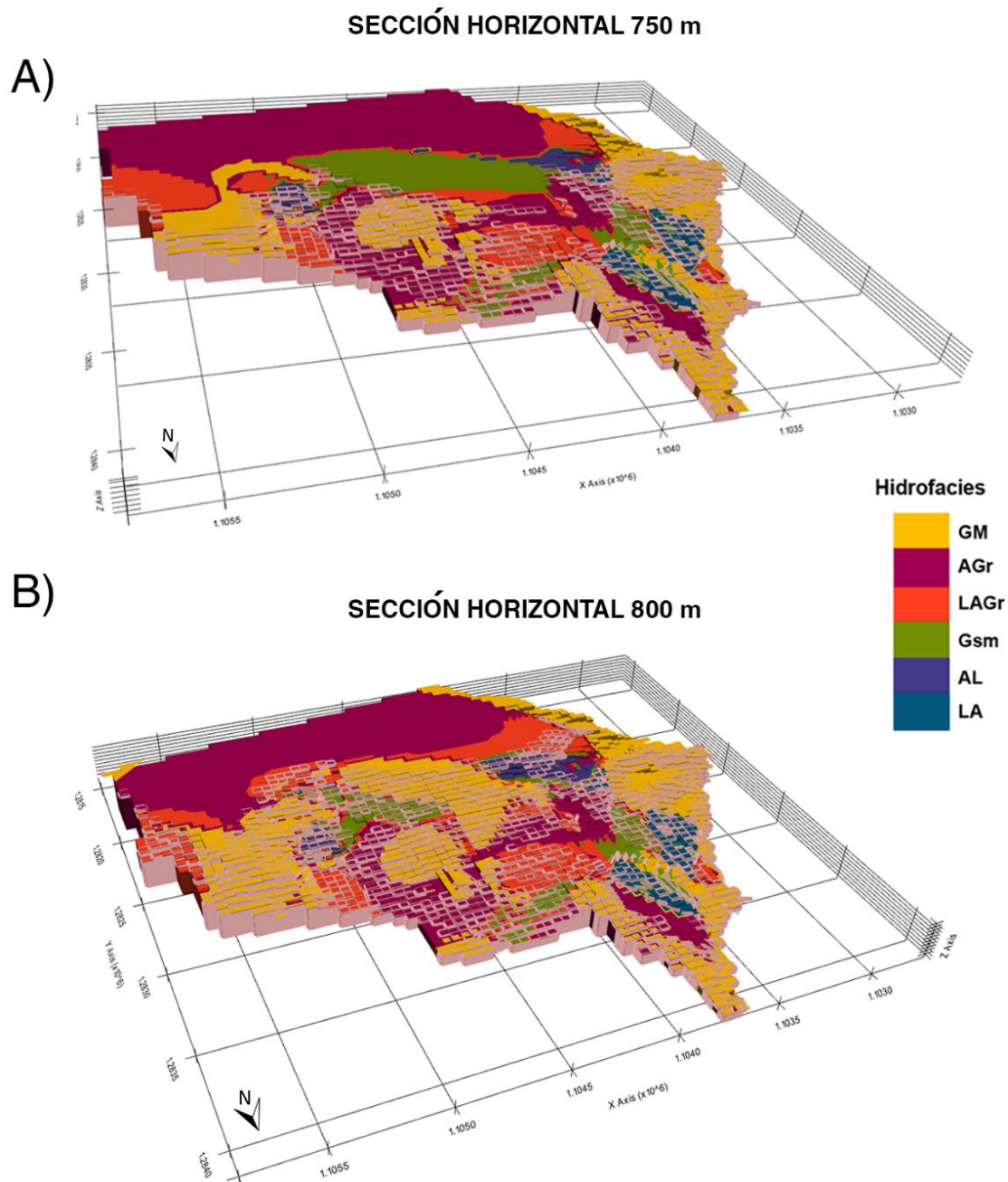


*Nota.* A) Sección horizontal sobre la cota de los 650 metros, B) Sección horizontal sobre la cota de los 700 metros. En ambas secciones se destaca la distribución de la hidrofacies de arenas gravosas (AGr) sobre el área de estudio, además de la ocurrencia de capas de gravas masivas (GM) y segmentos aislados de las hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA).

Las gravas sin matriz (Gsm) adquieren una disposición longitudinal aislada hacia el centro del área de estudio a la altura de 750 metros (Figura 25a), donde podrían marcarse segmentos interconectados de esta hidrofacies, con capas horizontales de menos de 50 metros de espesor. La distribución espacial de las hidrofacies hacia el norte se vuelve compleja, con la principal ocurrencia de gravas masivas (GM) y arenas gravosas (AGr) que configuran superficialmente el norte de Bucaramanga con características de acuífero que localmente se podrían clasificar como semiconfinado por la presencia de algunos niveles de acuitardos (hidrofacies LAGr). Sobre la cota de 800 metros (Figura 25b), la hidrofacies de arenas gravosas (AGr) se encuentra reducida hacia el sur, adyacente a capas aparentemente aisladas de lodos y arcillas gravosas (LAGr) siguiendo el contorno topográfico. Hacia el centro y oriente del área de estudio las hidrofacies de gravas masivas parecen adaptarse a los saltos topográficos presentes. No se observan segmentos importantes de gravas sin matriz (Gsm) a esta altura, donde los pocos que se destacan parecen relacionarse a la disección por el paso de quebradas.

**Figura 25.**

*Secciones horizontales realizadas en profundidad 750 - 800.*



*Nota.* A) Sección horizontal sobre la cota de los 750 metros, B) Sección horizontal sobre la cota de los 800 metros. La configuración de hidrofacies resulta compleja, principalmente en las hidrofacies con menor potencial hidrogeológico. La hidrofacies de arenas gravosas (AGr) presenta una reducción en su distribución espacial respecto con secciones más profundas.

### 8.3 Diagnóstico del modelo de hidrofacies

Haciendo un diagnóstico, con base en la metodología de De Caro *et al.* (2020) para escalas relativamente regionales, del modelado de hidrofacies desarrollado, este modelo desarrolló la interpolación espacial inicial de la superficie límite de acuíferos, donde posteriormente debe estar en calibración permanente, explotando todo el nuevo conocimiento sedimentológico del área que permita actualizar o incluso reclasificar litológicamente las hidrofacies. En este sentido, este trabajo logra alcanzar la fase inicial de un proyecto de caracterización hidroestratigráfica. Se sugiere, según la metodología, realizar una integración de nuevos modelados en el área con diferente enfoque multidimensional (principalmente registros de núcleos en modelos 1D e interpretación de cortes y secciones en modelos 2D) y analizar la hidroquímica del sistema de aguas subterráneas presente, a diferentes profundidades, como criterio de interpretación donde se puedan ver interdependencias entre capas.

La definición de condiciones óptimas de contorno consiste en ser el próximo paso ante la construcción continua del modelo, teniendo en cuenta los factores geológicos e hidráulicos presentes, como establecer una condición de frontera de nivel piezométrico constante en el tiempo, considerando los límites hidrológicos del área de estudio. A su vez, es indispensable hacer progresivamente una parametrización hidrogeológica de estas unidades, con base en relaciones empíricas (como valores tentativos de conductividad hidráulica con base en características como la distribución de tamaño de grano, diámetro efectivo o coeficiente de uniformidad) y validadas por ensayos de muestras (como valores de conductividad hidráulica mínima, máxima y promedio para cada hidrofacies), siguiendo inicialmente modelos estáticos de flujo de aguas subterráneas para estudiar los componentes principales del sistema de flujo, permitiendo mostrar posibles diferencias hidráulicas dentro de las mismas litofacies, que sugieran subdividir las litofacies en

subclases y reagrupar las hidrofacies según estas propiedades hidráulicas (De Caro *et al.*, 2020). Siguiendo la metodología, realizar y comparar diferentes pruebas de ensayos en acuíferos combinados como pruebas de bombeo a tasa constante a largo plazo y pruebas de bombeo escalonadas hacia la periferia del área de estudio permiten complementar y entender la interacción del sistema de aguas subterráneas con la aptitud de las capas interpoladas determinadas en los límites de borde. Esta información debe integrarse con datos de monitoreo del nivel freático y modelos de recarga y evapotranspiración, así como usos del suelo (para entender la recarga asociada al suelo) y determinar a qué dato de entrada es más sensible el sistema.

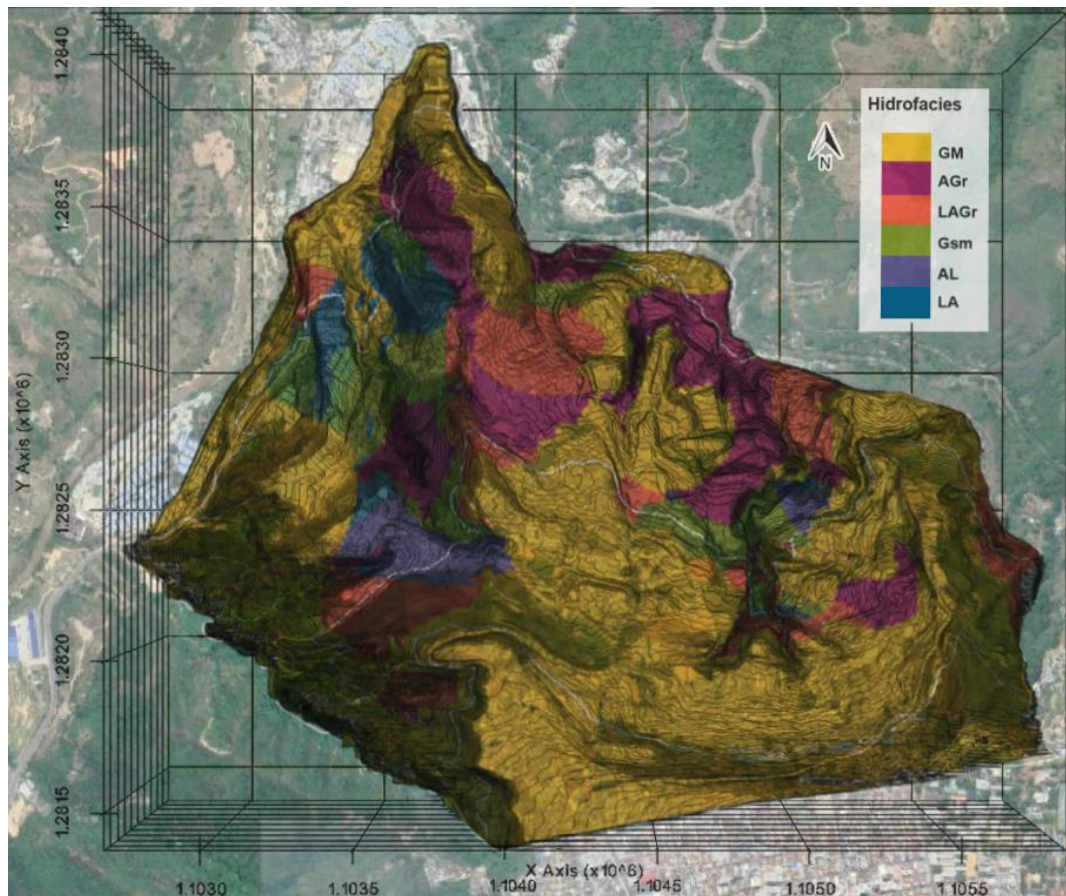
## 9. Discusión

El modelo generado para el sector norte de Bucaramanga muestra, en superficie, una predominancia de la hidrofacies de gravas masivas (GM), lo cual es de esperarse dadas las condiciones sedimentológicas de gravas típicas, características de los ambientes que se han reportado para la unidad. Los registros y descripciones de litofacies presentan variaciones que pueden interpretarse como intercalaciones entre niveles con granulometrías gruesas y finas, que se manifiestan directamente sobre la incidencia de la variación de hidrofacies, principalmente entre las capas de gravas sin matriz (Gsm) y lodos y arenas gravosas (LAGr), donde la presencia de estas últimas sobre las hidrofacies Gsm configuran acuíferos semiconfinados. Para el área de estudio, la definición de cada hidrofacies como una serie distinta e independiente, con constante repetición a lo largo de cada núcleo de perforación, permite observar distribuciones aisladas. Con esto en principio, la hidrofacies de arenas gravosas (AGr) consiste en ser la segunda hidrofacies representativa del área de estudio, sobre los lodos y arcillas gravosas (LAGr). Las gravas sin matriz

(Gsm), que podrían definirse como segmentos con algún evento de remoción de material particular fino (que, teóricamente, permite que la conductividad hidráulica en éstos sea significativamente mayor que en otras hidrofacies, dándole connotaciones de áreas con mayor aptitud de dispersión, velocidad de flujo, e incluso de áreas susceptibles a futuros eventos de remoción) se encuentran sobre la zona de deslizamientos y hacia el NW del área de estudio (Figura 26).

**Figura 26.**

*Representación exclusiva de la hidrofacies en superficie, superpuesto con una imagen satelital de Google Satellite.*



En este mismo sector, se observan segmentos de arenas lodosas (AL) y de limos y arcillas (LA), que parecen ajustarse siguiendo la cota de nivel 650 m, donde estas características sedimentológicas pueden imprimirle localmente al miembro Órganos ligeras condiciones de sello.

En el área de estudio, las fallas parecen ser mecanismos que marcan un desarreglo en profundidad de las hidrofacies más que una configuración superficial. Es probable que el algoritmo asuma este comportamiento con base en el modelo digital de elevaciones incorporado, cuya incidencia u ocurrencia no es del todo clara en la mayoría de las estructuras. La definición de estos trazos de falla se realizó principalmente con base en los saltos de topografía de los contactos entre unidades encontrados en los núcleos de perforación, por lo que se sugiere complementar estos análisis con información de campo con enfoque estructural y modelos de elevaciones con mayor resolución a nivel de pixel, que también permita hacer una revisión de la ocurrencia de fracturas y su caracterización en dado caso, para complementar los insumos de los modelos hidrogeológicos subsiguientes.

Los cortes realizados en profundidad muestran el desarrollo de capas interconectadas de hidrofacies de gravas masivas (GM), así como el aumento directamente proporcional de la extensión de las arenas gravosas (AGr) con la profundidad, hacia el sur del área de estudio. Sólo localmente aparecen capas de hidrofacies con propiedades de sello, que no parecen afectar ni condicionar en mayor medida la aptitud del medio. Sin embargo, hacia el oriente la hidrofacies de lodos y arcillas gravosas es predominante en profundidades mayores a los 750 metros de altura, donde podría marcarse un significativo efecto de barrera hidrogeológica. Se sugiere corroborar y ampliar la información sedimentológica de este segmento y profundidad, con el objetivo de determinar una distribución de hidrofacies más detallada y precisa, que permita caracterizar mejor cómo es la interacción y la aptitud en esta zona, adyacente a áreas con topografías más elevadas y

fracturadas, y que pueden tener un papel importante en la recarga de aguas subterráneas en el área de estudio.

La hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm), cuyas características sedimentológicas le confieren un potencial hidrogeológico de acuífero, se dispone en capas de significativa extensión en el centro - sur del área de estudio. Es posible que estas capas correspondan a segmentos horizontales espacialmente independientes entre sí o que existan conexiones internas entre estas, donde la aptitud del medio al flujo de aguas subterráneas es, en principio, significativamente mayor. En ambos casos, la existencia de esta hidrofacies puede ser de interés en estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante la ocurrencia de deslizamientos.

Los valores de conductividad hidráulica experimentales y teóricos mostrados en la Tabla 12 para cada granulometría distan considerablemente, aunque muestran comportamientos similares en cuanto a cómo es la aptitud de cada hidrofacies contra las otras. Esto puede deberse a las condiciones de enterramiento y variaciones granulométricas que presentan las muestras in situ.

Es importante resaltar el avance en el asentamiento de la población humana sobre el área de estudio, donde trabajos de urbanización, construcción de edificaciones y en general proyectos que modifiquen el subsuelo afectan directamente la configuración más superficial de éste. Por tanto, resulta arriesgado establecer el panorama del modelo superficial mostrado en la Figura 26 como la configuración actual real de las hidrofacies en superficie en términos de zonas de recarga/descarga. Así mismo, cabe resaltar que la mayor parte de las quebradas y arroyos presentes en el área de estudio se encuentran intervenidos y canalizados. Aunque las condiciones sedimentológicas se preservan en el tiempo, se pueden presentar modificaciones en los sistemas de flujo y transporte de aguas subterráneas, dado el forzamiento de nuevos patrones de descarga.

Este modelo, calculado como solución a la base de datos georreferenciada ingresada al software GemPy para el modelo digital de elevaciones estipulado, puede ser integrado y trabajado como una aproximación al modelo de hidrofacies del sector norte, puesto que la mayor densidad de puntos localizados y estipulados se encuentra hacia el SEE, donde se desarrollaron los proyectos anteriores y que a su vez son insumos de este trabajo. Se recomienda consolidar una base de puntos georreferenciados más extensa, abarcando toda la zona de manera uniforme y a distancia constante, siguiendo aproximadamente la misma densidad de datos por área, principalmente de núcleos de perforación y apiques y trincheras, junto con un aumento en la densidad de voxels.

Haciendo la comparativa con respecto al modelo geométrico de hidrofacies previamente desarrollado por Gómez-Arroyo y Sánchez-Ortiz (2020), se destaca que el componente estructural a nivel de trazo condiciona también la extensión de las capas de hidrofacies. Por ejemplo, este modelo pareciese condicionar a las gravas Open-Framework, que en este trabajo denominamos Gravas sin matriz (Gsm). Sin embargo, los métodos de interpolación utilizados son diferentes, el área de cómputo es menor y a la fecha no se habían desarrollado otras campañas de exploración directa. Así mismo, se destaca que el componente estructural es similar a nivel conceptual pero la arquitectura de fallas es distinta.

## 10. Conclusiones

Con la selección de 90 litofacies, correspondientes a 66 litofacies definidas en UIS - AMB (2017) y 24 litofacies para los núcleos realizados por UIS - AMB (2019), se establecieron seis hidrofacies: gravas masivas (GM), gravas sin matriz (Gsm) y arenas gravosas (AGr), clasificadas según su potencial hidrogeológico como acuíferos; arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas gravosas

(LAGr) como acuitardos; y limos y arcillas (LA) como acuicludos. Se recomienda determinar las propiedades de porosidad y conductividad hidráulica mediante pruebas experimentales para cada una de las hidrofacies, que permitan caracterizar mejor los parámetros hidráulicos de estas unidades. En igual medida, se sugiere corroborar y ampliar la información sedimentológica en este segmento, con el objetivo de determinar, con mayor precisión, la interacción y la distribución de estas capas.

El modelo geoestadístico generado permitió determinar la distribución de hidrofacies, para el miembro Órganos, matemáticamente más probable en el área de estudio. Sobre la cota de 650 metros se observa un dominio de arenas gravosas (AGr), principalmente hacia el sur del área de estudio, con ocurrencia local de capas de lodos y arcillas gravosas (LAGr) y gravas masivas (GM). Los segmentos de hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA) son aislados y con poca proporción de extensión respecto a las otras hidrofacies. Estos segmentos pueden ser considerablemente mayores entre los 650 y 700 metros de profundidad, donde la transición sedimentológica entre el miembro Órganos Inferior y Superior es marcado por un intervalo de capas lodosas. La hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm) se observa hacia el oeste de la zona donde ocurren fallas por deslizamientos. Sobre esta zona también se observan capas interconectadas de hidrofacies de gravas masivas (GM) de aproximadamente 0,50 km<sup>2</sup>, con geometría concorde a las fallas de deslizamiento. En el corte realizado a los 700 metros se identifican segmentos, intercalados horizontalmente, de hidrofacies de gravas sin matriz (Gsm) y lodos y arcillas gravosas (LAGr), que pueden condicionar relativamente la aptitud del medio y establecer posibles patrones en el transporte de aguas subterráneas. Sobre este plano las gravas masivas (GM) son aisladas y las hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas (LA) aumentan su extensión al norte. A la altura de 750 metros, las gravas sin matriz (Gsm) adquieren una disposición longitudinal aislada

hacia el centro del área de estudio, donde podrían marcarse segmentos interconectados de esta hidrofacies, con capas horizontales de menos de 50 metros de espesor. La distribución espacial de las hidrofacies hacia el norte se vuelve compleja, con la principal ocurrencia de gravas masivas (GM) y arenas gravosas (AGr) que configuran superficialmente el norte de la ciudad de Bucaramanga con características de acuífero. Sobre la cota de 800 metros, la hidrofacies de arenas gravosas (AGr) se encuentra reducida hacia el sur, adyacente a capas aparentemente aisladas de lodos y arcillas gravosas (LAGr) siguiendo el contorno topográfico. Hacia el centro y oriente las hidrofacies de gravas masivas parecen adaptarse a los saltos topográficos presentes. En general, en varios sectores del área de estudio las hidrofacies con aptitud de acuíferos se encuentran conectadas hidráulicamente (no se evidencia presencia notable de sellos que las desconecten), configurando posiblemente un solo sistema acuífero. Estos acuíferos pueden ser localmente semiconfinados dada la presencia de las hidrofacies de arenas lodosas (AL) y lodos y arcillas gravosas (LAGr) sobre capas de arenas gravosas (AGr), gravas sin matriz (Gsm) y gravas masivas (GM).

Aunque las condiciones sedimentológicas se preservan en el tiempo, se pueden presentar modificaciones en los sistemas de flujo y transporte de aguas subterráneas, dado el forzamiento de nuevos patrones de descarga. Se recomienda validar esta información con actividades de monitoreo de nivel piezométrico a lo largo de toda la zona de estudio, que complementen la interpretación de la configuración hidrogeológica en el sector.

Con el diagnóstico realizado al modelo de hidrofacies generado, siguiendo el esquema metodológico de De Caro *et al.* (2020), se recomienda realizar una integración de modelados en el área con diferente enfoque multidimensional (tal como registros de núcleos en modelos 1D e interpretación de cortes y secciones en modelos 2D) y analizar la hidroquímica del sistema de

aguas subterráneas presente, a diferentes profundidades. En este mismo sentido, se recomienda hacer progresivamente una parametrización hidrogeológica de las unidades, con base en relaciones empíricas y validadas por ensayos de muestras. Esta información debe integrarse con datos de monitoreo del nivel freático y modelos de recarga y evapotranspiración, así como usos del suelo, que permitan caracterizar mejor el área de estudio en términos hidrogeológicos.

### Referencias Bibliográficas

- Bierkens, M. F. P. (1996). Modeling Hydraulic Conductivity of a Complex Confining Layer at Various Spatial Scales. *Water Resources Research*, 32(8), 2369–2382. <https://doi.org/10.1029/96WR01465>
- Colombo, F. (2010). Abanicos aluviales: Secuencias y modelos de sedimentación. In A. Arche (Ed.), *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (pp. 131–183). Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Contreras, J., & Osma, A. (2018). *Caracterización del segmento Órganos Inferior en el Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) en el norte de Bucaramanga*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- De Caro, M., Crosta, G. B., Frattini, P., Perico, R., & Volpi, G. (2017). Hydrofacies reconstruction of glaciofluvial aquifers and groundwater flow modeling in a densely urbanized area under changing climatic conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. (in Review)*.
- De Caro, M., Perico, R., Crosta, G. B., Frattini, P., & Volpi, G. (2020). A regional-scale conceptual and numerical groundwater flow model in fluvio-glacial sediments for the Milan Metropolitan area (Northern Italy). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100683. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100683>
- De la Varga, M., Schaaf, A., & Wellmann, F. (2019). GemPy 1.0: open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development*.
- De Porta, J. (1959). La Terraza de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, 3, 5–13.
- Di Maio, R., Fabbrocino, S., Forte, G., & Piegari, E. (2014). A three-dimensional hydrogeological-geophysical model of a multi-layered aquifer in the coastal alluvial plain of Sarno River

- (southern Italy). *Hydrogeology Journal*, 22(3), 691–703.
- Filí, M. F. (2001). *Síntesis Geológica e Hidrogeológica del noroeste de la provincia de Entre Ríos-República Argentina Geology and hydrogeology of northwestern Entre Ríos province-Argentina*. 112, 25–36. [http://www.igme.es/boletin/2001/112\\_esp\\_1-2001/1-SINTESIS.pdf](http://www.igme.es/boletin/2001/112_esp_1-2001/1-SINTESIS.pdf)
- Folk, R. L. (1954). The Distinction between Grain Size and Mineral Composition in Sedimentary-Rock Nomenclature. *The Journal of Geology*, 62(4), 344–359. <https://doi.org/10.1086/626171>
- Gómez-Arroyo, M., & Sánchez-Ortiz, O. (2020). Modelado geométrico de hidrofacies aplicado al sector norte de Bucaramanga, Santander, Colombia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(4), 101–135.
- Goovaerts, P. (1997). Geostatistics for Natural Resource Evaluation. In *Technometrics* (Vol. 42).
- Hidalgo, M., Rey, J., & Dueñas, J. (2002). *Visita al área minera de Linares –Hidrogeología del sector*. [http://aguas.igme.es/igme/publica/lib108/pdf/lib108/in\\_n13.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/lib108/pdf/lib108/in_n13.pdf)
- Ingeominas. (2001). Zonificación Sismogeotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. *Subdirección de Amenazas Geoambientales*, 290.
- Ingeominas. (2004). Modelo Geológico Geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga. In *Informe Técnico de Olga de Bermúdez y Luis Vásquez*.
- Ingeominas. (2008). Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga.
- Ingeominas. (2009). *Informe hidrogeológico del Macizo de Santander*.
- Klingbeil, R., Kleineidam, S., Asprien, 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. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(99\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(99)00067-6)
- Lajaunie, C., Courrioux, G., & Manuel, L. (1997). Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, 29(4), 571–584.
- Lima, M., & Medina, J. (2015). *Evolución climática registrada y estratigrafía del Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- Maliva, R. G. (2016). *Aquifer characterization techniques*. Springer.
- McGowan, J. H., & Groat, C. G. (1971). Van Horn Sandstone, West Texas: An alluvial fan model for mineral exploration. *Rep. Invest*, 72.
- Miall, A. D. (1977). Lithofacies Types and Vertical Profile Models in Braided River Deposits: A Summary. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 5, 597–604. [http://archives.datapages.com/data/dgs/005/005001/597\\_cspgsp0050597.htm](http://archives.datapages.com/data/dgs/005/005001/597_cspgsp0050597.htm)
- Moral-García, F. J. (2003). *La representación gráfica de las variables regionalizadas: geoestadística lineal*. Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones.
- Moral García, F. J. (2004). Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistemas*, 13(1), 0. <https://doi.org/10.7818/582>
- Nilsen, T. H. (1982). *Alluvial fan deposits*.
- Ramírez, A., & Franco, M. (2018). *Reconstrucción paleoambiental de los miembros Órganos, Finos y Gravoso de la Formación Bucaramanga en el área metropolitana de Bucaramanga*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.
- Ramírez, J., & Hernández, O. (2018). *Caracterización hidroestratigráfica del Miembro Órganos*

*de la Formación Bucaramanga en la zona occidental del municipio de Bucaramanga, Santander.* Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.

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. <https://doi.org/10.3989/egeol.93493-4348>

Şen, Z. (2014). *Practical and applied hydrogeology*. Elsevier.

UIS, & AMB. (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).*

UIS, & AMB. (2019). *Estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle, para la construcción de una galería de drenaje en el barrio La Esperanza II del municipio de Bucaramanga, como medida para la reducción del riesgo por movimientos en masa profundos.*

Vargas, G., & Niño, A. (1992). *Geología y geotecnia de la escarpa noroccidental de la meseta de Bucaramanga.* Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander.

Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas*. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8387>

Veloso, F., Navarrete, R., Soria, A., & Meléndez, M. (2013). Estudio de afloramiento de escala intermedia como almacén geológico (Aliaga, provincia de Teruel). *V Congreso Cretácico de España*, 136–139.