Modelo Hidrogeológico Numérico de la Zona Norte de la Meseta de Bucaramanga, Santander

Silvia Elizabeth García Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Recursos Hídricos y Saneamiento

Ambiental

Director

Jineth Sayri Castañeda Quijano

M.Sc en Geología Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2022

# Dedicatoria

A Jorge, colega, guía y amigo.

A mis padres, siempre incondicionales.

No olvides que lo que llamamos hoy realidad fue imaginación ayer.

José Saramago

# Contenido

Introducción
1. Objetivos
1.1 Objetivo General
1.2 Objetivos Específicos
2. Marco Referencial
2.1 Localización del área de estudio16
2.2 Antecedentes
2.3 Marco Geológico
2.3.1 Estratigrafía
2.3.1.1 Formación Tiburón (TRPt)
2.3.1.2 Formación Girón (Jg)
2.3.1.3 Formación Bucaramanga
2.3.1.4 Depósitos aluviales (Qal)
2.3.1.5 Terrazas bajas (Qt1)
2.3.1.6 Depósitos de ladera (Ql)
2.4 Tectónica
2.4.1 Falla de Bucaramanga
2.4.2 Falla del Suárez
2.4.3 Falla Chitota
2.4.4 Sistema de fallas Transversales

2.4.5 Falla Las Olas	
2.5 Geomorfología	
2.5.1 Procesos Morfodinámicos	
2.5.1.1 Inventario de procesos morfodinámicos.	
2.6 Hidrogeología	31
3. Metodología	32
3.1 Fase 1: Análisis temático y diagnóstico de datos	33
3.2 Fase 2: interpretación de imágenes	34
3.2.1 Mapa de pendientes	35
3.2.2 Mapa geológico	36
3.2.3 Superficie de falla del deslizamiento	36
3.2.4 Geofísica	39
3.3 Fase 3: Trabajo de campo	41
3.4 Fase 4: Desarrollo y validación del modelo	42
3.4.1 Modelo hidrogeológico conceptual	42
3.4.2 Modelo hidrogeológico numérico	43
3.4.3 Calibración	45
4. Resultados y análisis de resultados	46
4.1 Descripción del modelo	46
4.1.1 Modelo hidrogeológico conceptual	46
4.1.2 Geometría y discretización	54
4.1.3 Condiciones de contorno	56
4.1.4 Recarga por infiltración	58

4.1.5 Parámetros hidráulicos	
4.1.6 Piezometría	60
4.2 Calibración	61
4.3 Niveles piezométricos	65
4.4 Balance hídrico	67
5. Discusión	68
6. Conclusiones	
7. Recomendaciones y Limitaciones	72
Referencias Bibliográficas	73
Apéndices	

# Lista de Tablas

# Pág.

Tabla 1	Movimientos en masa área de estudio
Tabla 2	Unidades hidrogeológicas área de estudio
Tabla 3	Clasificación de la información
Tabla 4	Unidades hidrogeológicas
Tabla 5	Conductividad hidráulica
Tabla 6	Información piezométrica
Tabla 7	Conductividad hidráulica Calibración 1 62
Tabla 8	Conductividad hidráulica Calibración 2
Tabla 9	Conductividad hidráulica Calibración 3 62
Tabla 1(	) Indicadores estadísticos de calibraciones
Tabla 11	Balance de masas del sistema

# Lista de Figuras

Pág.

7

Figura 1 Localización área de estudio 16
Figura 2 Partes de un deslizamiento
Figura 3 Mecanismos de falla de falla de un deslizamiento en un relieve
Figura 4 Localización movimientos en masa zona de estudio
Figura 5 Esquema general de trabajo
Figura 6 Comparación entre mapas de pendientes
Figura 7 Localización de perfiles topográficos y sondeos de perforación (DEM)
Figura 8 Gráfica del perfil topográfico 5, sondeos (S1-2, S5a-2 y S5a-2) y línea de tendencia . 38
Figura 9 Superficie de falla del deslizamiento DEM
Figura 10 Tomografía eléctrica AA <sup>´</sup>
Figura 11 Fotografía del Miembro Gravoso 41
Figura 12 Fotografía escarpe principal deslizamiento
Figura 13 Deslizamiento del área de estudio en vista 3D 48
Figura 14 Mapa geológico de la zona Norte de Bucaramanga 50
Figura 15 Perfil geológico Sección AA <sup>2</sup>
Figura 16 Perfil geológico BB <sup>2</sup>
Figura 17 Perfil hidrogeológico Sección AA´
Figura 18 Perfil hidrogeológico BB <sup>2</sup>
Figura 19 Geometría del modelo hidrogeológico (vista planta) 55
Figura 20 Niveles piezométricos [m.s.n.m.]
Figura 21 Límite de altura piezómetrica constante (CHD)

Figura 22	Límites tipo dren (DRN)	57
Figura 23	Valores de recarga por infiltración para el modelo estacionario	58
Figura 24	Mapa de localización de piezómetros	61
Figura 25	Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 1	64
Figura 26	Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 2	64
Figura 27	Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 3	65
Figura 28	Piezometría simulada en estado permanente UHG1	66
Figura 29	Piezometría simulada en estado permanente UHG2	66
Figura 30	Piezometría simulada en estado permanente UHG3	67

# Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Calibración 1	
Apéndice B. Calibración 2	79

10

## Resumen

Título: Modelo hidrogeológico numérico de la Zona Norte de la Meseta de Bucaramanga,

Santander\*

Autor: Silvia Elizabeth García Gómez\*\*

Palabras Clave: Modelo hidrogeológico numérico, deslizamiento, Modflow / ModelMuse

# **Descripción:**

Los movimientos en masa se presentan con frecuencia en la zona norte de la meseta de Bucaramanga. Esta situación ha promovido la realización de estudios que se han centrado en identificar factores geotécnicos y geológicos que los ocasionan, con el fin de realizar las medidas preventivas y las correcciones correspondientes para prevenir desastres por deslizamientos en la comunidad afectada. Dichos estudios evidencian la influencia sísmica y el agua subterránea como los factores identificados que producen inestabilidad en los taludes del área de interés. Debido a esto, en este estudio se realizó un aporte al conocimiento hidrogeológico de la zona mediante la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual y numérico a partir del uso del software MODFLOW mediante la interfaz ModelMuse. La construcción del modelo hidrogeológico inició con la elaboración de la cartografía geológica del área correspondiente a la microcuenca La Esperanza, mediante fotointerpretación y con el uso de información secundaria disponible, en donde se identificó un gran deslizamiento sobre el cual han construido viviendas. Posteriormente, se procedió a la realización del modelo hidrogeológico conceptual, y con base en este, se implementó el modelo numérico hidrogeológico en estado permanente, con su respectiva calibración. Como resultado del desarrollo del modelo numérico del sistema acuífero del área de estudio y la bondad del ajuste de su calibración, se indica que éste reproduce adecuadamente la piezometría del sistema y ayuda a la interpretación de la información del flujo subterráneo para futuros estudios.

<sup>\*</sup> Trabajo de Grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recuros Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: MSc Jineth Sayri Castañeda Quijano

#### Abstract

11

Title: Numerical hydrogeological model of the North Zone of the Bucaramanga Plateau, Santander

Author(s): Silvia Elizabeth García Gómez\*\*

Key Words: Numerical hydrogeological, model, landslide, Modflow / ModelMuse

### **Description:**

Mass removal movements occur frequently in the northern area of the Bucaramanga plateau. This situation has promoted the development of studies that have focused on identifying geotechnical and geological factors that cause them, in order to carry out preventive measures and the corresponding corrections to prevent landslide disasters in the affected community. These studies show the seismic influence and the groundwater as the identified factors that produce instability in the slopes of the interest area. Due to this study, a contribution was made to the hydrogeological knowledge of the area through the elaboration of the conceptual and numerical hydrogeological model from the use of the MODFLOW / ModelMuse software. The model construction began with La Esperanza micro-basin geological cartography, through photo-interpretation and with the use of available secondary information, where a large landslide was identified on which they have built houses. Subsequently, the conceptual hydrogeological model, with its respective calibration. As a result of the development of the underground aquifer numerical model in the area and the goodness of the adjustment of its calibration, indicates that it adequately reproduces the system piezometry and helps the interpretation of the underground flow information for future studies.

<sup>\*\*</sup>Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Adviser: Msc Jineth Sayri Castañeda Quijano.

#### Introducción

La zona norte de la meseta de Bucaramanga se encuentra afectada por la inestabilidad geológica del terreno en el que se encuentra localizada y presenta complicaciones en algunos barrios debido a movimientos en masa. Desde sus inicios en el año 1980, el proyecto de construcción de viviendas sin cuota inicial del norte presentó agrietamientos en algunas edificaciones (Ingeniería de Suelos Ltda, 2000). Esta situación de vulnerabilidad expone a sus habitantes ante la inminente probabilidad de un desastre natural por deslizamientos, que a la fecha se han presentado en menor escala, obligando a demoler algunas edificaciones para evitar pérdidas humanas.

Frente a este escenario, la Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) realizó una serie de estudios para determinar el problema geotécnico y geológico, con el fin de realizar las medidas preventivas y las correcciones correspondientes que garantizaran la estabilidad de la zona (CDMB, 2010; CDMB, 1991; Ingeniería de Suelos Ltda, 1998, 2000)

Además, es preciso señalar que diversos documentos históricos acerca de la sismicidad del territorio colombiano muestran que, en varias ocasiones, el departamento de Santander ha sido el epicentro de algunos sismos que en ciertas oportunidades afectaron la ciudad de Bucaramanga, causando averías, agrietamientos en edificaciones y alarma en ciertos sectores de la ciudad, (INGEOMINAS, 1997). De igual manera, la zona norte de Bucaramanga se ha clasificado como zona de alto riesgo sísmico (Rondón & Cho, 2005). Sumado a lo anterior, estudios recientes indican que los eventos descritos anteriormente persisten en la actualidad, y sus factores detonantes

se encuentran relacionados con la localización de la ciudad, pues se encuentra en una zona de actividad sísmica alta (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2009; SGC & GEM, 2020), influenciada principalmente por la falla Bucaramanga y la falla del Suárez, las cuales "deben ser consideradas como fallas activas, probablemente sismogénicas y capaces de producir sismos en el futuro" (Diederix et al., 2008), e influenciada por el nido sísmico de Bucaramanga (CDMB, 2010; INGEOMINAS, 2009; SGC & GEM, 2020), el cual presenta actividad frecuente y es la fuente responsable de aproximadamente el 60% de los sismos registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), (INGEOMINAS, 2001).

Sumado a esto, las características geológicas de los suelos presentes en el municipio, contribuyen a que "aumente la vulnerabilidad y por ende el riesgo por deslizamientos y erosión progresiva en las laderas de esta región", lo cual está altamente relacionado con que en la zona norte del municipio de Bucaramanga se han encontrado afloramientos de agua subterránea (Hubach Eggers, 1952; Ingeniería de Suelos Ltda, 2000), cuyo flujo proviene del Macizo de Santander (Gomez et al., 2015) y ocasiona sobresaturación del suelo de la meseta, lo cual juega un papel desestabilizante de los taludes del área de estudio, (Universidad Industrial de Santander, UIS & Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, AMB, 2017; CDMB, 2010b; Isidro et al., 2011).

Considerando que la zona norte es afectada por un gran deslizamiento (Ingeniería de Suelos Ltda, 2000; INGEOMINAS, 2001; UIS & AMB, 2017) y que uno de los más comunes desencadenantes de estos movimientos en masa es la saturación de agua en las capas permeables (acuíferos) por infiltración de aguas lluvias, mal manejo de aguas de escorrentía y aguas servidas, lo cual aumenta el peso de la ladera y lubrica las superficies de inestabilidad del terreno (Ingeniería de Suelos Ltda, 2000), se pretende con este estudio hacer un aporte que ayude a conocer el

comportamiento hidrogeológico de la zona y que sirva para apoyar las decisiones relativas a la gestión del agua subterránea mediante la elaboración de un modelo hidrogeológico numérico.

Los modelos numéricos de aguas subterráneas tienen como objetivo representar de una manera simplificada los sistemas de flujo del agua subterránea, de esta manera, ayudan a estudiar y comprender la complejidad del sistema acuífero real y, asimismo, reproducen o simulan de una forma aproximada los factores que actúan sobre el sistema (Anderson et al., 2015).

En este contexto, es necesario contar con una herramienta (MODFLOW) capaz de modelar el agua subterránea de la zona de estudio correspondiente a la microcuenca Zanjón de Regadero, popularmente conocida como La Esperanza, la cual se encuentra ubicada en el departamento de Santander, hacia el norte del municipio de Bucaramanga, y comprende los barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa y Villa María (ver Figura 1).

# 1. Objetivos

# 1.1 Objetivo General

Aportar al conocimiento hidrogeológico del norte de Bucaramanga como factor de incremento de los movimientos en masa.

# **1.2 Objetivos Específicos**

Consolidar el nivel base cartográfico a escala 1:2000, de la microcuenca Zanjón de Regadero (La Esperanza).

Construir el modelo hidrogeológico conceptual y lógico de la zona de estudio, consolidando la información secundaria y la adquisición de nuevos datos en campo.

Construir al menos tres escenarios de simulación calibrados para el modelo numérico hidrogeológico en estado permanente de la zona de estudio.

# 2. Marco Referencial

# 2.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra localizada al norte del Municipio de Bucaramanga, en los barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa y Villa María, como se indica en la Figura 1.

# Figura 1

Localización área de estudio.



Nota. Localización de la Zona Norte del departamento de Bucaramanga, Santander. Elaboración propia. QGIS.org, 2022. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. http://www.qgis.org Los movimientos en masa que se han presentado a través del tiempo en la zona de interés dieron origen a estudios e investigaciones que la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), ha realizado con el fin de estabilizar las zonas afectadas, siendo necesario en algunos casos, reubicar familias y viviendas.

El Servicio Geológico Nacional en 1952 por intermedio de Enrique Hubach en un informe presentado a la alcaldía de Bucaramanga encontró que las aguas subterráneas eran uno de los factores erosivos perjudiciales que afectaban a los deslizamientos "La capa de conglomerados es de gran resistencia, contra la erosión y el deslizamiento, y defendería la ciudad adecuadamente a no ser porque las aguas de lluvia y las subterráneas socavan su substrato arcilloso" (Hubach, 1952a). De igual manera, recomendó recolectar estas aguas junto con las de lluvia y alcantarillado en dos túneles soportados por la base acuífera de la capa conglomerada en que reposa Bucaramanga y "el caudal conjunto se llevaría luego por el lecho afianzado de la quebrada Seca hacia el río de Oro." (Hubach, 1952). De hecho, para controlar la rata de movimiento del deslizamiento producido en el año 1984, la CDMB construyó sistemas de subdrenaje profundo, y adicionalmente, instaló piezómetros para determinar niveles freáticos en los barrios El Mirador y la Esperanza (Ingeniería de Suelos Ltda, 1998).

Es preciso señalar que un gran aporte para la problemática presente fue el estudio realizado para la predicción de niveles freáticos a partir de la precipitación y su influencia en la estabilidad de taludes de Gómez (1990), en donde se concluyó que, en las fuertes temporadas invernales, los niveles freáticos sufren un ascenso, y, en consecuencia, se producen deslizamientos con una ocurrencia cercana a los dos meses después de la lluvia (Antolínez, 2014).

Con el fin de considerar el agua subterránea como fuente de abastecimiento para la zona metropolitana de Bucaramanga, en el año 2002 se desarrolló el proyecto "Modelo Hidrogeológico Básico de Bucaramanga", por parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga AMB (Antolínez, 2014), en el cual se realizaron los estudios pertinentes y se obtuvo idea de la geometría geológica, y se identificaron algunas zonas con condiciones para la formación de acuíferos. Asimismo, la empresa Ingeniería de Suelos Ltda. propuso mediante una asesoría geotécnica, unidades hidrogeológicas para la zona de estudio.

Adicionalmente, un estudio realizado por Gómez y Anaya (2004) entre los años 2002 y 2003, permite observar que la recarga a los acuíferos de Bucaramanga es proveniente de la zona de montaña principalmente. Además, en el año 2003 el grupo en Predicción y Modelamiento Hidroclimático GPH realizó un muestreo isotópico para estudiar el fenómeno de la recarga a los acuíferos de Bucaramanga, identificando la presencia de aguas subterráneas en las rocas ígneas y metamórficas de gran parte del Macizo de Santander, debido a la permeabilidad secundaria ocasionada por el sistema de fallas presente, lo cual ha dado lugar a un potencial acuífero (citado en UIS & AMB, 2017)

En cuanto a la Meseta de Bucaramanga y sus alrededores, según Bermúdez y Vásquez (2004), se concluyó que existe un acuífero superior que corresponde al Miembro Gravoso de la Fm Bucaramanga y puede extenderse a lo largo de la meseta. Por otra parte, también se identificó un acuífero profundo, correspondiente al Miembro Órganos de la misma formación, el cual tiene valores de permeabilidad media (Bermoudes & Vásquez, 2004).

De igual modo, el modelo numérico del flujo de agua subterránea realizado por Antolínez 2014, identificó dos acuíferos: el acuífero superficial correspondiente al Miembro Gravoso de la formación Bucaramanga, para el cual se asignó el Miembro finos como basamento del acuífero y

el acuífero profundo, el cual corresponde al Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, para el cual se asignó la Formación Girón como el basamento debido a sus características de baja permeabilidad.

Asimismo, el convenio UIS-AMB, en el cual se realiza el estudio titulado: "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)" identificó para el modelo hidrogeológico conceptual 4 unidades hidrogeológicas, de las cuales, en la Formación Bucaramanga se identificaron tres unidades hidrogeológicas: la primera unidad corresponde al Miembro Órganos Removido, el cual se encuentra generalmente saturado y se caracteriza por su heterogeneidad y estructura caótica de porosidad más alta que el resto de las unidades. La segunda unidad corresponde al Miembro Órganos superior, el cual es un depósito fluvio-torrencial denso con permeabilidades bajas. La tercera unidad corresponde al Miembro Órganos Inferior, el cual es un depósito de muy baja permeabilidad que el anterior y, el cual se considera que puede funcionar como el basamento del acuífero Órganos Superior. Y, Por último, la cuarta unidad definida como roca fracturada del basamento, constituida por la formación Diamante, Tiburón, Bocas y Girón. Por otra parte, respecto a la dirección del flujo de agua subterránea en la zona norte de Bucaramanga, se concluye que está fuertemente condicionada por la topografía y que es de sur a norte, siendo la fuente de recarga la meseta de Bucaramanga. (AMB & UIS, 2017).

Adicionalmente, la UPB y la CDMB realizaron una evaluación de la calidad del agua, para la cual se clasificó (según diagramas de Piper) en: agua bicarbonatada cálcicas y/o magnésicas en el barrio Lizcano y Villa Rosa, Clorada y/o sulfatada para el barrio Mirador y Sulfatada y/o Clorada cálcica y/o magnésica en los padres Somascos, lo cual sugiere que el agua subterránea de la zona de estudio está siendo contaminada (citado en AMB & UIS, 2017).

#### 2.3 Marco Geológico

## 2.3.1 Estratigrafía

**2.3.1.1 Formación Tiburón (TRPt).** Ward, et al. (1973) le asignaron una edad correspondiente al Triásico. Constituida por conglomerados calcáreos, líticos, granosoportados, con fragmentos de guijos y guijarros (2-10 cm) de calizas predominantemente, subredondeados a subangulares y en menor proporción fragmentos de areniscas, cherts y rocas volcánicas, dentro de una matriz arenoso-calcárea, de color gris y de grano fino, provenientes de la infrayacente Formación Diamante (Royero & Clavijo, 2001a). El espesor total de la formación puede alcanzar entre 450 a 500 m (Vargas & Niño, 1992).

**2.3.1.2 Formación Girón (Jg).** La edad asignada a esta Formación es Jurásica Superior (Vargas & Niño, 1992). Constituida por capas de conglomerados con guijos de cuarzo blanco lechoso redondeados, areniscas conglomeráticas intercaladas con lodolitas violáceas, y areniscas de grano medio a grueso de composición cuarzofeldespática con colores que varían de crema verdoso a rojizo (Vargas & Niño, 1992).

**2.3.1.3 Formación Bucaramanga.** La edad de la Fm Bucaramanga corresponde al Plio-Pleistoceno según las direcciones paleomagnéticas del estudio de (Jiménez et al., 2015) y de acuerdo con las dataciones paleomagnéticas publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez (INGEOMINAS, 2010). Considerada como un importante depósito sedimentario que morfológicamente corresponde a un abanico aluvial erosionado (Diederix et al., 2008), posiblemente asociado en su mayor parte al río Suratá (Vargas & Niño, 1992), acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre el cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el cerro de Palonegro y el río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2º y 7º, y una extensión aproximada de 60 a 80 km2, y es disectada por varias quebradas, la mayoría afluentes del río de Oro, conformando un drenaje dendrítico subparalelo. (INGEOMINAS, 2010). Sin embargo, estudios como el de (Solano, 2016), en el cual se indican variaciones espaciales en la composición de clastos hacia el sur de la formación, y, como indican (García & Añez, 2017; Tesón et al., 2015) en la reconstrucción de la paleo-red de drenaje, se sugiere que la Formación Bucaramanga, corresponde a un ambiente de ríos trenzados, cuyos aportes principales provienen del curso antiguo del Sogamoso y del Chicamocha y posiblemente del aporte lateral de los ríos Frío, Hato del Oro y Suratá (García & Añez, 2017). Teniendo en cuenta las clasificaciones hechas por Hubach (1952) y Niño y Vargas (1992), la Formación Bucaramanga se divide de base a techo en los siguientes miembros: miembro Órganos (Qbo), miembro Finos (Qbf), miembro Gravoso (Qbg) y miembro Limos Rojos (Qblr). Miembro Órganos (Qbo): definido por Hubach (1952), Según Niño y Vargas (1992), este miembro tiene un espesor aproximado de 170m y corresponde a una serie de capas gruesas a muy gruesas que texturalmente se componen de gravas matrizsoportadas y granosoportadas, lodoarenosas y arenolodosas, subredondeadas a redondeadas, mal calibradas. Adicionalmente presenta niveles de espesor

variable que están compuestos por arcillas arenosas con trazas de materia orgánica. Su ambiente de depositación se asocia con flujos de escombros fluidos característico de la zona proximal de un abanico dominado por corrientes.

En la zona de estudio, el miembro Órganos se divide en dos: *El Miembro Órganos Inferior* (Qmboi), el cual está compuesto principalmente por clastos que varían desde guijarros a bloques, de composición ígneo-metamórficas (Contreras & Osma, 2018), depósito clastosoportado a matriz soportado, con intercalaciones de arenas ligeramente gravosas. Algunos clastos alcanzan el tamaño bloque en este miembro. *El Miembro Órganos Superior* (Qmbos) es similar al miembro Órganos Inferior, pero su gran diferencia consiste en la composición de los clastos, que varían de guijos a guijarros, predominantemente sedimentarios para este miembro y en menor proporción ígneo-metamórficos (UIS & AMB, 2017).

*Miembro Finos (Qbf)*: definido por Hubach (1952). Según Vargas y Niño (1992), este miembro tiene un espesor aproximado de 20m. Corresponde a capas finas de geometría tabular y lenticular, compuesta por arenas arcillosas, arcillas arenosas y gravas subangulares a subredondeadas moderadamente calibradas. Su ambiente de depositación corresponde a depósitos de corrientes permanentes y migratorias de canales trenzados (Vargas & Niño, 1992).

*Miembro Gravoso (Qbg):* definido por Niño y Vargas (1992), este miembro corresponde a gravas arenolodosas y lodoarenosas con un espesor promedio entre 8 y 30m (INGEOMINAS, 2001). Estas gravas son subredondeadas y mal calibradas. Su ambiente de depositación se asocia a un flujo de lodo y escombros viscosos.

*Miembro Limos Rojos (Qblr):* definido por Julivert (1961). Según Vargas y Niño (1992), este miembro corresponde a un nivel de arcilla gravosa, con grandes bloques angulares de baja esfericidad (compuestos de areniscas blancas silíceas) con un espesor máximo de 35m. Su

23

ambiente de depositación se asocia a un flujo de lodo acompañado de caída de bloques procedentes del macizo de Santander (Vargas & Niño, 1992).

**2.3.1.4 Depósitos aluviales (Qal).** De edad Cuaternaria. Localizados principalmente en los valles y llanuras de inundación del río Suratá y en las quebradas que fluyen sobre la escarpa occidental de la meseta de Bucaramanga.(Vargas & Niño, 1992). Este depósito está compuesto por gravas y cantos de areniscas de grano medio a grueso, silíceas, de color claro, areniscas conglomeráticas, lodolitas rojizas y una proporción menor de cantos de rocas ígneas (INGEOMINAS, 2002). (Aldana & Ariza, 2000).

**2.3.1.5 Terrazas bajas (Qt1).** De edad Cuaternaria. Este depósito aluvial reciente se localiza en la parte baja de la escarpa norte y está conformado por arenas, conglomerados heterolíticos guijarros y guijos ígneos graníticos, ortoneises, migmatitas y rocas sedimentarias en matriz de arena gruesa limosa en menor proporción, (Aldana & Ariza, 2000).

**2.3.1.6 Depósitos de ladera (Ql).** De edad Cuaternaria. Este tipo de depósito está conformado por bloques, cantos y gravas heterolíticas, los cuales corresponden a lutitas, areniscas, neis, cuarzo, dispuestos de forma irregular y embebidos en una matriz limo-arcillosa de color amarilla a marrón, resultado del gran movimiento existente en el Miembro Órganos de la Fm Bucaramanga (Aldana & Ariza, 2000).

La región nororiental de Colombia presenta una alta complejidad geológica. Lo anterior se atribuye a la actividad tectónica compresiva producto de la convergencia de las placas tectónicas Nazca y suramericana, las cuales dieron origen al sistema orogénico andino (INGEOMINAS, 2005). Como resultado de este ambiente tectónico, el municipio de Bucaramanga se encuentra afectado estructuralmente hacia el este por el sistema de fallas de Bucaramanga y por el sistema de fallas del Suárez al oeste, las cuales convergen al norte (H Ward D. E., 1974; Vargas & Niño, 1992; Velandia, 2017). Estos rasgos estructurales característicos se describen a continuación:

#### 2.4.1 Falla de Bucaramanga

Es el rasgo estructural más evidente y de gran extensión que cruza la región centro-oriental del Departamento de Santander, en dirección aproximada N20°W, con alto ángulo de buzamiento (H Ward D. E., 1974) cuyo trazo rectilíneo se expresa claramente en imágenes de satélites y fotografías aéreas (Royero & Clavijo, 2001b; Vargas & Niño, 1992) . Es considerada un sistema de fallas de rumbo, con movimiento sinestral, cuyo desplazamiento es calculado por Campbell (1965) y Tschanz, et al. (1969, 1974) en unos 100 a 110 km; de igual manera, se define que tiene una componente vertical importante, responsable del levantamiento del Macizo de Santander (Julivert, 1963).

24

## 2.4.2 Falla del Suárez

Esta falla se extiende por una longitud de unos 120 km (Vargas & Niño, 1992) desde Barbosa al sur hasta la Falla de Bucaramanga-Santa Marta 5 km al norte de la capital santandereana; su trazo tiene una dirección N20°E y N25°E. Es una falla inversa de ángulo alto, con una componente vertical importante (Royero & Clavijo, 2001).

#### 2.4.3 Falla Chitota

Se define como un lineamiento que controla el cambio en el rumbo del rio Suratá. Su trazo tiene rumbo NW y es considerada con una falla de rumbo sinestral y componente normal (Mora Ortiz, 2019).

#### 2.4.4 Sistema de fallas Transversales

Estas fallas son el resultado del movimiento sinestral de la falla Bucaramanga y el movimiento local dextral de la falla del Suárez (zona de extensión), cortan la Fm Bucaramanga en sentido NE-SW y NE-WSW con cinemática dextral normal (Mora Ortiz, 2019; Vargas & Niño, 1992).

#### 2.4.5 Falla Las Olas

Posee rumbo aproximado N-S, controlando el curso de la quebrada Las Olas. Esta falla se ha asociado como una falla de rumbo dextral (Aldana & Ariza, 2000; UIS & AMB, 2017).

#### 2.5 Geomorfología

La zona comprende el gran abanico aluvial de Bucaramanga, conocido comúnmente como la terraza de Bucaramanga, depósito formado por escombros y materiales de aluvión, producto de la morfología influenciada significativamente por el río Suratá y, a su vez, por una importante actividad tectónica (INGEOMINAS, 2001). Asimismo, según Diederix et al. (2008) esta cuenca neotectónica presenta confinamiento por sus fallas activas (falla Bucaramanga y falla del Suárez) y no alcanzó a desarrollar la forma típica semicircular.

Asimismo, el área de interés se encuentra ubicada sobre la margen lateral norte del Abanico que delimita el flanco sur de la cuenca del Río Suratá (Diederix et al., 2008) caracterizado por un escarpe de alta pendiente (Aldana & Ariza, 2000), correspondiente al gran deslizamiento de la zona norte de Bucaramanga (Antolínez, 2014).

#### 2.5.1 Procesos Morfodinámicos

La morfodinámica permite entender cómo se relacionan las unidades geomorfológicas y el factor de movimiento, el cual es el responsable del origen del fenómeno de movimiento en masa (Aldana & Ariza, 2000).

En cuanto a la zona de estudio, el escarpe Norte está afectado por un desplazamiento rotacional, "en donde la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento" (Suárez, 2009), ver Figura 2. Los deslizamientos consisten en movimientos en masa hacia abajo de un talud, influenciados por procesos de erosión (denudacionales, antrópicos, gravitacionales etc.), estos movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos. De igual manera, los mecanismos de falla de un deslizamiento (Figura 3) están controlados por múltiples factores que afectan su comportamiento y que son necesarios para explicar técnicamente la inestabilidad de un talud: litología, tectónica, geomorfología, meteorización, clima e hidrología, pendiente y relieve, hidrogeología, sismicidad, cobertura vegetal, afectaciones antrópicas y el factor tiempo.

#### Figura 2

#### Partes de un deslizamiento



*Nota*. El gráfico representa un deslizamiento de tipo rotacional y sus componentes. Adaptado de Deslizamientos. Volumen 1: Análisis geotécnico (p.4), por J Suárez, 2009, UIS.

## Figura 3

Mecanismos de falla de falla de un deslizamiento en un relieve



*Nota*. El gráfico representa un relieve con un deslizamiento de tipo rotacional y sus mecanismos de falla. Adaptado de Deslizamientos. Volumen 1: Análisis geotécnico (p.4), por J Suárez, 2009, UIS.

2.5.1.1 Inventario de procesos morfodinámicos. Es importante destacar que, en el año 2006, el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el cual permite consultar los movimientos en masa ocurridos en Colombia, identificó geoformas (principalmente coluviones) en el área de estudio (ver Figura 4).

Los movimientos en masa presentes en el área de estudio corresponden a movimientos de flujo y reptación asociados al Miembro Órganos de la Fm. Bucaramanga y han causado daños en edificios y carreteras de la zona. En la Tabla 1 se presenta el inventario de movimientos en masa identificados en la zona de estudio.

# Tabla 1

ID	Tipo Movimiento	Latitud	Longitud	Litología Asociada	Geoforma	Daños
1	Flujo de tierra	7° 8'	-73° 7'	Depósito coluvial	Coluviones	Edificios
		38.37"	23.77"	sobre la Fm		
				B/manga, Miembro		
•	<b>T</b> 7 1 .			Organos	<b>a</b> 1 ·	
2	Volcamiento	7° 8' 29.27"	-73°7	Depósito coluvial	Coluviones	Edificios
	flexural de	38.37	23.77	sobre la Fm		
	roca			Órganos		
3	Eluio de tierra	7° 8'	-73° 7'	Material coluvial de	Laderas	Carretera
5	i iujo de tierra	7 0 56.27"	22.95"	poco espesor sobre	mily	Carretera
		00.27	22.90	Fm B/manga.	inclinadas	
				Miembro Órganos		
4	Flujo de tierra	7° 9'	-73° 7'	Material coluvial	Coluviones	Carretera
		3.47"	27.95"	sobre Fm B/manga,		
				Miembro Órganos		
5	Flujo de tierra	7° 8'	-73° 7'	Coluvión	Coluvión	Carretera
		55.28"	46.48"	proveniente de Fm		
				B/manga, Miembro		
6		70.01	720 71	Organos	C - I i	Commentering
6	Flujo de tierra	/° 8 26.61"	-/3°/ 55 9/"	Deposito coluvial	Coluviones	Carretera
		30.01	55.84	Sobre Fin B/manga, Miombro Órganos	<i>!</i>	
7	Volcamiento	7° 8'	-73° 7'	Deposito coluvial	Coluviones	Carretera
/	flexural de	36.61"	55 84"	sobre Fm B/manga	?	Carretera
	roca	20101	22101	Miembro Órganos	•	
8	Flujo de tierra	7° 9'	-73° 7'	Coluvión	Coluvión	Carretera
	5	12.73"	48.53"	proveniente de Fm		
				B/manga, Miembro		
				Órganos		
9	Flujo de lodo	7° 9'	-73° 7'	Fm B/manga,	Lomos	Sin daños
		19.96"	52.49"	Miembro Organos	denudacion	registrado
10	<b>T</b> 7 1 .	<b>7</b> 0 01			ales	S C: 1 ~
10	Volcamiento	10.00	-73°7	Fm B/manga,	Lomos	Sin danos
	flexural de	19.96	52.49	Miembro Organos	denudacion	registrado
11	Rentación	7° 8'	-73° 7'	Em R/manga	Hondonada	s Sin daños
11	Solifluxión	41 22"	48 27"	Miembro Órganos	s	registrado
	Somuzion	71.44	70.27	Minemore Organos	U	s
12	Reptación	7° 8'	-73° 7'	Fm B/manga.	Hondonada	Edificios
	Solifluxión	42.06"	44.23"	Miembro Órganos	S	

Movimientos en masa área de estudio

29

ID	Tipo Movimiento	Latitud	Longitud	Litología Asociada	Geoforma	Daños
13	Reptación	7° 8'	-73° 7'	Material coluvial y	Coluviones	Sin daños
	Solifluxión	59.88"	39.07"	de botaderos sobre	/ Laderas	registrado
				Fm B/manga,	denudacion	S
				Miembro Órganos	ales	
14	Reptación	7° 9'	-73° 7'	Material coluvial y	Escarpes	Sin daños
	Solifluxión	0.72"	33.21"	de botaderos sobre	denudacion	registrado
				Fm B/manga,	ales /	s
				Miembro Órganos	Coluviones	
15	Reptación	7° 9'	-73° 8' 9.2"	Fm B/manga,	Flujo de	Sin daños
	Solifluxión	25.11"		Miembro Órganos	detritos	registrado
						S

# Figura 4

Localización movimientos en masa zona de estudio



Nota. Movimientos en masa reportados en el 2006 para la Zona Norte, SIMMA 2006, (SGC)

30

El agua subterránea en la zona de estudio está asociada al acuífero profundo correspondiente al Miembro Órganos de la Formación Bucaramanga, (Bermoudes & Vásquez, 2004; de Bucaramanga & de Santander, 2017; Gómez et al., 2015b; UIS & AMB, 2017).

Según el estudio de UIS & AMB (2017), en la zona se identificaron 4 unidades hidrogeológicas: la primera unidad hace referencia al denominado Órganos Removido, el cual se caracteriza por material heterogéneo, generalmente saturado, y con porosidad más alta que el resto de las unidades. Las siguientes unidades derivan de la Formación Bucaramanga, siendo entonces la segunda unidad hidrogeológica el acuífero profundo, que corresponde al Miembro Órganos Superior, con permeabilidades bajas (Antolínez, 2014), la cual suprayace al Miembro Órganos Inferior, considerado como la tercera unidad hidrogeológica, la cual consiste en un depósito, con permeabilidades muy bajas (Gómez & Anaya, 2004), y por último, puesto que las formaciones Diamante, Tiburón y Bocas no tienen un espesor definido, se decidió que estas unidades en conjunto funcionan como el basamento del acuífero del área de este estudio (Tabla 2).

#### Tabla 2

Unidad Geológica	Espesor aproximado [m]	Comportamiento hidrogeológico
Órganos Removido	-	Acuífero
Órganos Superior	8-56	Acuífero
Órganos Inferior	37-77	Acuitardo
Fm Diamante, Fm Tiburón, Fm	-	Acuifugo
Bocas, Fm Girón		

Unidades hidrogeológicas área de estudio

#### 3. Metodología

La construcción de un modelo hidrogeológico numérico está soportada por un modelo conceptual, el cual representa de una manera simplificada los aspectos físicos e hidrogeológicos más relevantes del sistema a evaluar con base en la información disponible y su respectivo análisis (Anderson et al., 2015). Asimismo, el modelo numérico y su confiabilidad depende de la integración teórica definida en el modelo conceptual.

La Figura 5 muestra un esquema general de la metodología empleada para el desarrollo de este trabajo, el cual consiste en tener una fuente de datos que son procesados siguiendo una metodología para luego obtener los resultados requeridos.

#### Figura 5



#### Esquema general de trabajo

De modo que, para elaborar la construcción del modelo propuesto se desarrollaron las fases que se describen a continuación:

#### 3.1 Fase 1: Análisis temático y diagnóstico de datos

En esta primera fase se realizó la recopilación y el análisis de la información, mediante la revisión de antecedentes e información secundaria consultados en el grupo de investigación GEOMATICA, además de la información de la base de datos meteorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA, imágenes satelitales, documentos técnicos y publicaciones, tesis de grado, entre otros.

Posteriormente, se realizó la clasificación y análisis de la información recopilada (Tabla 3), en la cual se hizo la depuración de la información que se consideró necesaria para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual y numérico.

Así que, para el caso de imágenes satelitales, se utilizó la información de la imagen de radar del satélite ALOS sensor PALSAR, la fotografía aérea de la CDMB (1967), y la fotografía de dron del grupo Geomática. Con respecto a la información geológica, se utilizó la cartografía existente de diversas fuentes: mapas geológicos, pozos de sondeo e informes técnicos y proyectos de grado realizados en la zona de interés. Igualmente, se utilizó la información geológica de las tomografías del grupo Geomática, (confidenciales). También, la información hidrogeológica se obtuvo de los niveles piezométricos registrados en la zona.

Finalmente, se utilizó la información hidrológica de los datos de series sistemáticas en el tiempo que fueron procesadas por el grupo Geomática según los datos meteorológicos de las estaciones del IDEAM.

# Tabla 3

Información	Categoría	Descripción	Fuente
Imágenes Satelitales /	Elevación	Imagen de Radar	Alos Palsar -
Fotografías Aéreas	Interferometría	12.5x12.5	JAXA
	Elevación	Fotografía Aérea	CDMB 1967
	Fotogrametría	0.5x0.5	
		Fotografía Dron	Geomática
Geológica	Mapas Geológicos	Cartografía geológica a	Geomática /
		diferentes escalas.	Tesis de grado
	Pozos de sondeo	Estratigrafía de pozo	Geomática
Geofísica	Tomografías	Línea representativa	Geomática
Hidrogeológica	Piezómetros	Pozos con niveles	Geomática
		piezométricos	
Hidrológica	Datos Meteorológicos	Series sistemáticas en	IDEAM /
		el tiempo	Geomática

Clasificación de la información

# 3.2 Fase 2: interpretación de imágenes

En esta fase se realizó la interpretación de imágenes mediante el uso del Sistema de Información Geográfica Spring DB, software libre desarrollado por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil, con el cual se analizó una fotografía de dron, una imagen de radar y una fotografía aérea para identificar unidades litológicas, geomorfológicas y rasgos estructurales del área de estudio. De igual manera se utilizó el software libre QGIS, principalmente para la generación de los mapas temáticos del área de estudio. De igual manera se utilizó el software libre QGIS, principalmente para la generación de los mapas temáticos del área de estudio.

## 3.2.1 Mapa de pendientes

Mediante el procesamiento del modelo digital de elevación DEM (Digital Elevation Model, por sus siglas en inglés) de la imagen de radar ALOS PALSAR AP\_26214\_FBS\_F0130\_RT1 con resolución de 12.5m y de la fotografía aérea CDMB (1967) con resolución de 0.5m se generaron los modelos numéricos del terreno (MNT) y con estos, se realizó el procesamiento para la generación del mapa de pendientes de cada imagen (Figura 6).

Luego, debido a que la escala de trabajo de este proyecto es 1:2000, se realizó una comparación entre los mapas generados, con el fin de elegir una imagen de buena calidad y alta resolución. Como resultado de ello, se escogió la fotografía aérea CDMB (1967) como la imagen más adecuada para realizar la cartografía geológica del área.

#### Figura 6

Comparación entre mapas de pendientes



*Nota.* Mapas de inclinaciones elaborados mediante el procesamiento de datos de elevación de: (a) ALOS PALSAR- JAXA (2011) y (b) CDMB (1967).

# 3.2.2 Mapa geológico

Mediante el uso del software Spring DB y el mapa de pendientes del modelo de elevación digital CDMB (1967), se hizo la fotointerpretación y la integración de la información disponible para elaborar la cartografía geológica a escala detallada 1:2000 de la zona de interés. Para esto, se tuvo en cuenta la información geológica (cortes geológicos, estratigrafía, fallas y lineamientos) desarrollada por el grupo de investigación Geomática.

La interpretación cartográfica de superficie estuvo enfocada principalmente a la elaboración de la delimitación de la unidad denominada Depósito de deslizamiento (depósitos recientes). Dicha unidad corresponde a los depósitos resultado del gran deslizamiento de la zona norte, reportado en los estudios mencionados anteriormente, el cual a su vez presenta procesos morfodinámicos y movimientos en masa de menor tamaño.

#### 3.2.3 Superficie de falla del deslizamiento

Teniendo en cuenta que el modelo geológico conceptual se basa en que la zona de interés está afectada por un gran deslizamiento, se utilizó como una restricción geológica este movimiento en masa y se procedió a generar la respectiva superficie de falla. Lo anterior, se realizó con el objetivo de establecer la topografía de esa superficie, y poder construir la geometría de los Depósitos recientes.

Para elaborar dicha superficie se trazaron 11 cortes topográficos (perfiles) con dirección EW en el modelo de elevación digital (CDMB 1967). De esos 11 perfiles, 5 se trazaron coincidiendo con la ubicación de algunos pozos de sondeo para poder amarrar en profundidad, los

36
topes geológicos del Miembro Órganos Superior (superficie de falla del deslizamiento) con los perfiles topográficos Figura 7.

### Figura 7

Localización de perfiles topográficos y sondeos de perforación (DEM)



Luego se realizó la exportación de los cortes perfiles topográficos en archivo CSV y se creó un archivo en Excel con los datos respectivos (coordenadas X, Y, Z), en el cual se generaron las gráficas de cada perfil topográfico y de los sondeos cercanos a ellos. Una vez obtenida esta gráfica se generó la línea de tendencia, que para este caso corresponde a una línea polinómica de grado 2, que concuerda con la superficie de falla típica de un deslizamiento rotacional, para la cual se reemplazaron los valores X, Y y Z de cada punto del perfil dando como resultado una nueva línea que corresponde a la superficie de falla del deslizamiento (Figura 8), la cual se ajustó teniendo

como punto de control los sondeos, con los valores en profundidad del tope del miembro Órganos Superior.

### Figura 8



Gráfica del perfil topográfico 5, sondeos (S1-2, S5a-2 y S5a-2) y línea de tendencia

Finalmente, cuando se ajustaron todas las líneas de superficie de falla, se procedió a exportar este archivo en formato CVS para ser cargado en el software Spring DB, y mediante un interpolador se generó el archivo de isolíneas, las cuales permitieron la generación del nuevo modelo numérico del terreno, con el cual se generó el DEM correspondiente a la superficie de falla del deslizamiento (Tope Miembro Órganos superior) ver Figura 9.

Superficie de falla del deslizamiento DEM



La base del miembro Órganos Superior se generó empleando la misma metodología, pero, con las profundidades existentes para el tope del miembro Órganos Inferior reportadas en los sondeos de perforación (Geomática).

#### 3.2.4 Geofísica

Para establecer la geometría de las unidades geológicas en profundidad, y junto a la información de los topes de cada unidad litoestratigráfica de los sondeos de perforación se utilizó información geofísica hecha por el grupo Geomática para complementar el control espacial de las unidades geológicas en profundidad. La Figura 10 muestra la continuidad del depósito de deslizamiento, con resistividades bajas que pueden ser el resultado de presencia de agua o material arcilloso. De igual manera se identifica la continuidad de los Miembros Órganos Superior e Inferior, la cual también se identificó en el estudio de (Gómez & Anaya, 2004) los cuales le asignaron resistividades 7 y 29 ohm-m.

Mediante la integración de la interpretación geofísica y la geología subsuperficial de los pozos de sondeo, se identifican la continuidad y la profundidad de las unidades geológicas correspondientes a los depósitos de deslizamiento con un espesor aprox. 20m, el Miembro Órganos Superior con un espesor aprox. 60m y también la identificación del Miembro Órganos Inferior.

## Figura 10

Tomografía eléctrica AA´



Nota. Unidades geológicas interpretadas para la tomografía eléctrica AA'. (UIS & AMB, 2017)

### 3.3 Fase 3: Trabajo de campo

El trabajo de campo para esta zona consistió en hacer un reconocimiento (control) para complementar la fotointerpretación del gran deslizamiento presente en la zona. De igual manera se verificó la presencia del Miembro Gravoso (Formación Bucaramanga) en afloramiento expuesto en inmediaciones de la corona del deslizamiento, el cual se caracterizó por la presencia de cantos subredondeados de hasta (18cm) en matriz arcillo-arenosa de color pardo amarillento (Figura 11). Del mismo modo, se hizo el reconocimiento de algunos puntos de control del deslizamiento (corona y escarpe principal) ver Figura 12.

El trabajo en la zona es complicado debido a que en la zona hay muchas construcciones de viviendas e infraestructura vial y cobertura de vegetación. Además, existe una problemática de inseguridad que dificulta el trabajo de campo.

#### Figura 11



Fotografía del Miembro Gravoso



Fotografía escarpe principal deslizamiento

#### 3.4 Fase 4: Desarrollo y validación del modelo

En esta fase se definió el modelo hidrogeológico conceptual y con base en este se definió el modelo numérico hidrogeológico como se describe a continuación:

#### 3.4.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos (Anderson et al., 2015). Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y

su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga (IDEAM, 2018).

Para llevar a cabo la construcción de este modelo, se definieron las características principales del sistema real mediante la compilación, revisión detallada e interpretación de la información disponible, esto permitió comprender y conceptualizar el funcionamiento hidrogeológico del sistema para su posterior modelado.

#### 3.4.2 Modelo hidrogeológico numérico

Con el objetivo de representar de una manera simplificada el modelo conceptual de este proyecto y para obtener una buena predicción, teniendo en cuenta que las variables de este modelo no son aleatorias, se eligió un modelo matemático determinístico para este sistema.

Para ello, se utilizó el software MODFLOW 2005, el cual es un código libre utilizado para la modelación 3-D de flujo en medios porosos saturados para régimen transitorio y estacionario sugerido para modelar aguas subterráneas de diferencias finitas y que es dominio público (Harbaugh, A.W., Langevin, C.D., Hughes, J.D., Niswonger, R.N., and Konikow, 2017). Desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), ampliamente utilizado y validado en estudios hidrogeológicos. La discretización espacial en MODFLOW se logra considerando acuíferos reales como un sistema de malla conformado por celdas, las cuales son caracterizadas en términos de filas (i), columnas (j), y capas (k). Cada celda se considera uniforme con respecto a sus propiedades. Hay un punto por celda denominado nodo, en el cual es calculada la cabeza; dependiendo de la ubicación de los nodos se pueden tener dos configuraciones: bloque central (los nodos están en el centro de las celdas) y punto central (los nodos están en la intersección de las celdas); el flujo de agua subterránea es simulado por MODFLOW usando solo la configuración de bloque central de diferencias finitas (McDonald et al., 1988).

El flujo del agua subterránea de densidad constante en tres dimensiones en un medio poroso cualquiera se describe matemáticamente mediante el balance de masa y la ley de Darcy representada en la ecuación 1 (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{XX} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$
(1)

Donde los parámetros de la ecuación son las conductividades hidráulicas Kx, Ky y Kz (para cada eje cartesiano), h es la cabeza en el acuífero, W es el flujo por unidad de volumen que representa fuentes o sumideros de agua, Ss el coeficiente de almacenamiento específico y t es el tiempo (Harbaugh, 2005).

ModelMuse trabaja mediante el código MODFLOW que funciona mediante "paquetes", donde cada uno de ellos se especializa en solucionar un aspecto del modelo, facilitando así el desarrollo de una propiedad en específico. El software MODELMUSE es una interfaz gráfica de usuario (GUI) para MODFLOW-2005, está basado en un sistema de grillas para definir el área y las capas, lo que permite al usuario definir el tamaño del acuífero o sistema de aguas subterráneas, así como también el número de capas, que pueden ser de composición variada (confinadas, no confinadas o una combinación de ambas) (Calsina, Yesi & Chejje, 2017).

Es preciso señalar que, para realizar la elaboración del modelo numérico de este proyecto, se definió el sistema como un régimen permanente, el cual es independiente del tiempo y se asume como estado natural en donde las entradas y salidas del sistema se encuentran en equilibrio.

Además, la recarga del sistema se ingresó mediante las condiciones de contorno asignadas a través del paquete de recarga (Recharge, RCH) y el paquete de altura piezométrica constante (Time-Variant Specified-Head, CHD). El paquete de RCH simula la precipitación que percola al sistema mediante una distribución real de la recarga y el paquete CHD se usa para fijar el valor del nivel piezométrico en las celdas del modelo seleccionadas. Asimismo, las descargas del sistema hacen referencia a los ríos y quebradas más relevantes definidos como una condición de contorno mediante el paquete de dren (Drain, DRN) el cual se encarga de eliminar el agua del acuífero con velocidad proporcional a la diferencia entre la carga hidráulica en el acuífero y las celdas con elevación fija (elevación del dren) o lo que se denomina cota de salida. Si la carga hidráulica del acuífero está por debajo de la elevación del dren, entonces este no tiene efecto sobre el acuífero (GIDAHATARI, n.d.)

#### 3.4.3 Calibración

Para determinar si el modelo determinístico de agua subterránea representa la realidad del sistema, se comparan las observaciones de datos de campo de las respuestas del acuífero con los valores calculados por el modelo, y dicha comparación debe tener un error aceptable. Según lo anterior, el objetivo de la calibración consiste en minimizar la diferencia entre los datos observados y los datos calculados y ajustarlos (IGME, 2002).

En la elaboración de la calibración de este modelo se realizaron simulaciones en estado estacionario, variando las permeabilidades (método prueba y error) para buscar que los valores de niveles piezométricos observados se ajustaran a los valores calculados. La calibración se llevó a cabo mediante el uso del módulo HOB, con el cual se asignaron los puntos de observación MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005).

La evaluación cuantitativa de la calibración se realiza mediante el cálculo estadístico del error medio (EM), el error medio absoluto (EMA) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), los cuales se definen a continuación en las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (cal_i - obs_i)$$
<sup>(2)</sup>

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |cal_i - obs_i|$$
(3)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (cal_i - obs_i)^2}{n}}$$
(4)

Donde,

N es el número total de puntos observados

 $cal_i$  son los valores calculados.

 $obs_i$  son los valores observados.

#### 4. Resultados y análisis de resultados

### 4.1 Descripción del modelo

#### 4.1.1 Modelo hidrogeológico conceptual

Para realizar el modelo hidrogeológico conceptual (MHC), se procedió a realizar la delimitación del área de estudio teniendo presente la escala de trabajo 1:2000. A partir de la

integración de la información disponible, se realizó la interpretación de la geología de superficie y subsuperficie mediante el uso de fotointerpretación y el procesamiento de las imágenes, sondeos de perforación, tomografías y cortes geológicos. Como resultado, se realizó la cartografía geológica de la zona y se procedió a realizar la construcción del respectivo modelo conceptual, base del MHC como se describe a continuación:

La microcuenca La Esperanza se encuentra localizada en el norte de Bucaramanga y yace sobre un deslizamiento de tipo rotacional (Ingeniería de Suelos Ltda., 1998, 2000) con la característica superficie de falla cóncava "cuchara" como se identificó en la Figura 13 (a y b), con alturas que varían desde aprox. 942 m.s.n.m. en la corona hasta 638 m.s.n.m. en su pata. A su vez, en la zona se identifican otros deslizamientos sucesivos con escarpes secundarios producto del movimiento principal de rotación.

En consecuencia, para realizar la cartografía geológica de la zona, se tuvo en cuenta que el área del deslizamiento corresponde a la unidad geológica Depósito de deslizamiento (Qde) en el cual se identificó una Falla de Hundimiento, una serie de fallas concéntricas y cóncavas en la dirección del movimiento y diversos lineamientos que fueron cartografiados en el mapa geológico (Figura 14).

Deslizamiento del área de estudio en vista 3D



Nota. Representación en 3D del deslizamiento (a) y esquema de un deslizamiento (b).

Por otro lado, con el uso del software Spring y mediante la generación del modelo del mapa de pendientes, se hizo la respectiva interpretación para realizar la cartografía geológica, haciendo énfasis en la delimitación del gran deslizamiento. Como resultado de dicha interpretación y con la integración de información secundaria, se identificaron las siguientes unidades geológicas: Terrazas Bajas (Qal1), Depósitos Aluviales (Qal), Depósitos de Ladera (Ql), Depósito Deslizamiento (Qde), Fm Bga Miembro Limos Rojos (Qblr) Fm Bga Miembro Gravoso (Qbg), Fm Bga Miembro Órganos (Qbo), según se muestra en el mapa (ver Figura 17).

Igualmente se identificaron las fallas de la zona de interés, las cuales ya han sido interpretadas en estudios anteriores, pero en algunos casos fueron modificadas según la interpretación de las imágenes satelitales de este proyecto. Por consiguiente, se identificaron las fallas de rumbo sinestral: Falla Chitota, y la Falla Las Olas, la falla de rumbo dextral: Falla transversal, y como resultado del movimiento en masa se tuvo en cuenta la Falla de Hundimiento.

Adicionalmente, para conocer el comportamiento geológico en profundidad, se elaboraron las secciones transversales AA´ y BB´ (ver Figura 15 y Figura 16), teniendo en cuenta que la superficie de falla del deslizamiento corresponde al tope del miembro Órganos Superior y que, por ende, conserva dicha geometría.

Debido a que no hay claridad en la distribución espacial, espesores e interpretaciones de las formaciones Diamante, Tiburón y Bocas, estas se consideraron una sola unidad denominada Roca (Basamento hidrogeológico).

Mapa geológico de la zona Norte de Bucaramanga



50

Perfil geológico Sección AA´



## Figura 16

Perfil geológico BB´



Para la construcción del MHC se definieron tres unidades hidrogeológicas (ver Figura 17 y Figura 18): La unidad hidrogeológica 1 (UHG1), la cual pertenece al depósito de deslizamiento (Qd), el cual está conformado por material heterogéneo correspondiente a bloques, cantos y gravas heterolíticas, dispuestos de forma irregular y embebidos en una matriz por lo general limo-arcillosa y areno-arcillosas, la cual corresponde a un acuífero libre.

La unidad hidrogeológica 2 (UHG2), la cual está separada de la UHG1 por sus características composicionales, corresponde al Miembro Órganos Superior de la Formación Bucaramanga, depósito fluvio-torrencial denso, compuesto por gravas arenosas y arenas gravosas, con tamaños de clastos que varían principalmente de guijos a guijarros, con presencia mayoritaria de clastos de origen sedimentario y en menor proporción clastos de composición ígneas y metamórfica, el cual presenta permeabilidades bajas y está definido como el acuífero profundo del área.

Y finalmente la unidad hidrogeológica 3 (UHG3), que corresponde al Miembro Órganos Inferior, está constituida predominantemente por clastos que varían de tamaño guijo hasta bloques de hasta 1m, con intercalaciones de arenas ligeramente gravosas. La composición de los clastos indica que estos proceden en su mayoría de rocas metamórficas e ígneas embebidos en una matriz areno arcillosa. Esta unidad presenta permeabilidades muy bajas, motivo por el cual se ha considerado un Acuitardo que actúa como el sello del acuífero Órganos Superior para este estudio.

Las formaciones Girón y Tiburón no tienen interpretación de continuidad en profundidad, además, son de muy baja permeabilidad, por tal motivo, y debido a que el Miembro Órganos Inferior, por su comportamiento de acuitardo, se definió como el sello del acuífero Órganos Superior para este estudio, se consideró que estas unidades geológicas harán parte de la unidad 3 (UHG3).



Perfil hidrogeológico Sección AA´

## Figura 18

Perfil hidrogeológico BB´



### 4.1.2 Geometría y discretización

Con el fin de establecer las condiciones naturales "reales" del sistema en equilibrio, se realizó una simulación inicial del modelo en estado permanente, en donde se consideraron la precipitación y el aporte lateral de la meseta como entradas al acuífero y el Río Suratá y las Quebradas como salidas del sistema.

Para la elaboración del modelo se definieron 3 unidades hidrogeológicas (UHG): el depósito de deslizamiento, con comportamiento de acuífero, definido como la UHG1, para la cual el techo corresponde a la topografía del terreno y su base a la superficie de falla del deslizamiento rotacional. La UHG2, que corresponde al Miembro Órganos Superior, la cual tiene un comportamiento de acuífero y suprayace a la UHG3, que corresponde al miembro Órganos Inferior y a la Fm Girón, las cuales debido a su baja permeabilidad, se consideraron para este estudio como una sola unidad hidrogeológica con un comportamiento de Acuitardo (Tabla 4).

#### Tabla 4

Unidades hidrogeológicas

Comportamiento	Nomenclatura
Acuífero	UHG1
Acuífero	UHG2
Acuitardo	UHG3
	Comportamiento Acuífero Acuífero Acuitardo

Por medio del procesamiento del DEM, el respectivo análisis geológico (trabajo de campo, columnas estratigráficas y sondeos) y análisis geofísico desarrollado para la zona por el grupo de investigación GEOMATICA (UIS, 2019), se establecieron los espesores aproximados de las capas para el modelo, en los cuales se definió un valor de 20m para el Depósito Deslizamiento, 60m para

el Miembro Órganos Superior y debido que el Miembro órganos Inferior tiene comportamiento de baja permeabilidad (acuitardo), se definió que esta unidad junto a las Formaciones Girón y Tiburón (acuifugo), actuarían como la unidad sello del acuífero Órganos Superior.

Por otra parte, Modflow permite definir las propiedades hidráulicas homogéneamente para cada celda, de esta manera, la discretización para este modelo corresponde a celdas cuadradas de 100 x 100 m de lado, con un total de 25 filas y 28 columnas cuya representación se puede observar en la Figura 19 y Figura 20.

## Figura 19

Geometría del modelo hidrogeológico (vista planta)



Niveles piezométricos [m.s.n.m.]



#### 4.1.3 Condiciones de contorno

Los límites del modelo describen el intercambio de flujo, entradas y salidas de agua, los cuales dependen de los datos disponibles, la topografía y la geología de la zona.

Para la elaboración del presente modelo, el límite sur se consideró como una entrada al sistema, correspondiente al escarpe de la meseta del norte de Bucaramanga (Figura 21). Este límite fue simulado mediante la condición CHD, la cual permite ubicar puntos donde la cabeza hidráulica es constante.

Límite de altura piezómetrica constante (CHD)



Los límites norte, este y oeste se consideraron salidas del sistema (Figura 22). Estos fueron definidos de la siguiente manera: al norte Río Suratá, al este Quebrada La Esperanza y al oeste las demás quebradas presentes en la zona. Estos límites funcionan como drenes, los cuales son simulados a través de la condición para drenes (DRN).

## Figura 22

Límites tipo dren (DRN)



58

### 4.1.4 Recarga por infiltración

La recarga utilizada en el modelo se ha tomado del estudio UIS (2019). Este estudio determinó el valor de la recarga por infiltración debido a la precipitación a partir del estudio de hidrología hecho para la zona (UIS, 2017) en el cual se hizo el procesamiento y análisis meteorológico de la estación del IDEAM 23195040 UNIV IND SANTANDER.

El valor estimado de recarga es de 50 mm/año = 0.000136986 m/día = 1.5855e-9 m/s, asimismo, debido a la impermeabilidad, se considera que la infiltración es nula en los lugares en donde hay edificaciones (UIS, 2019). La Figura 23 muestra los valores de la recarga por infiltración del modelo en estado estacionario.

#### Figura 23

Valores de recarga por infiltración para el modelo estacionario



#### 4.1.5 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos de entrada se asignan a cada formación geológica y corresponden a su composición litológica: Depósitos Deslizamiento UHG1 (Qde), el Miembro

Órganos superior UGH2 (Qmbos) y el Miembro Órganos Inferior UHG3 (Qmboi). Adicionalmente, por considerarse zonas de posible conductividad, se asignan también valores a cada una de las fallas de la zona de estudio.

Los valores de conductividad hidráulica (K) se expresan en m/d y fueron tomados del estudio (UIS, 2019), los cuales se calcularon a partir de la ecuación de Richards resuelta por el software FEFLOW por medio de la opción de modelo empírico, a partir del esquema de parametrización según la ecuación de Van Genuchten.

Este método es muy estable para calcular la conductividad relativa (Kr) y saturación efectiva (Se), la cual se asigna según los valores de porosidad ( $\eta$ ), Porosidad efectiva (Sy) y retención específica (Sr), los cuales se interpretaron en UIS (2019) acorde al modelo conceptual, datos recolectados en inventarios de puntos de agua y valores de referencia para las diferentes litologías de acuerdo a la literatura (Hamill y Bell, 1986; Morris y Johnson, 1967; Domenico y Sxhwartz, 1998; Fetter, 2001; Freeze y Cherry, 1979; Sanders, 1998; Smith y Weathcraft, 1993).

Los parámetros definidos se observan en la Tabla 5 a continuación:

#### Tabla 5

Unidad hidrogeológica	Kx – Ky [m/s]	Kz [m/s]
Depósitos Deslizamiento	1.4E-07 m/s	1.4E-08 m/s
Miembro Órganos Superior	4.9E-06 m/s	4.9E-07 m/s
Miembro Órganos Inferior	1.0E-08 m/s	1.00E-09
Falla 1 Hundimiento	8.7E-06 m/s	8.7E-07 m/s
Falla 2 Hundimiento	1.8E-06 m/s	1.8E-07 m/s
Falla 3 Chitota	9.1E-06 m/s	9.1E-07 m/s
Falla 4 Transversal	1.2E-06 m/s	1.2E-07 m/s
Falla 5 Las Olas	9.2E-06 m/s	9.2E-07 m/s

Conductividad hidráulica

### 4.1.6 Piezometría

Los datos de piezometría inicial son necesarios para poder resolver numéricamente las ecuaciones de flujo subterráneo en un modelo matemático. En la zona de estudio se han instalado algunos piezómetros para controlar la evolución de los niveles freáticos.

Para la elaboración de este modelo se tuvieron en cuenta 8 puntos de monitoreo de agua subterránea con información a 2019 como se muestra en la Tabla 6, su distribución espacial se observa en la Figura 24.

Es importante tener en cuenta que existe incertidumbre en los registros de niveles piezométricos pues no se cuenta con un diseño confiable de medición e instalación de estos, lo cual ocasiona que el proceso de calibración tenga diferencias con los puntos monitoreados, además, los puntos de monitoreo no se encuentran distribuidos en toda la zona de estudio, esto hace que se incremente la incertidumbre del modelo, pues hay zonas sin información disponible (UIS, 2019).

#### Tabla 6

Información piezométrica

Piozómotro	Feto	Norto	Cota	Nivel Piezométrico
I lezoineti o	Lste	Norte	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
P1	1104558.67	1282562.1	749	727.9
P2	1104963.55	1282329.5	761	757.6
P3	1105313.8	1282408.9	797	787.8
P4	1105088.38	1282383.3	767	758.3
P5	1105354.42	1282257.6	814	811.3
P6	1105394.22	1282281.3	813	796.6
P7	1104681.46	1282534.5	744	740.8
P8	1105235.91	1282551.5	767	764

60



Mapa de localización de piezómetros

### 4.2 Calibración

Para que un sistema sea permanente es porque existe un equilibrio entre sus ingresos y sus salidas, por consiguiente, el comportamiento hidráulico del acuífero es simulado si la recarga y la descarga son semejantes a lo largo del tiempo.

El proceso de calibración del modelo numérico en estado permanente se realizó mediante las múltiples ejecuciones del modelo, las cuales permitieron obtener la simulación de tres escenarios probables, en los cuales se modificó la conductividad hidráulica a partir de los valores iniciales establecidos (ver Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9).

Como se puede observar en la Tabla 7, en la calibración 1 se incrementaron los valores de conductividad de las UHG1 y UHG2 (Anexo 1). Para la calibración 2 se asignó un solo valor de conductividad para la falla de hundimiento 1 y 2 (Anexo 2), y en general se disminuyeron los

valores de permeabilidad de las fallas (Tabla 8). Y, para la calibración 3 sólo se modificaron los valores de conductividad Kx de la UHG1 para la cual se aumentó su valor y de igual manera para la UHG2, a la cual se le disminuyó su valor (Tabla 9).

#### Tabla 7

Conductividad hidráulica Calibración 1

Parámetro	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
Depósito Deslizamiento (UHG 1)	6.65E-06	1.99E-06	1.38E-06
Miembro Órganos Superior (UHG 2)	2.66E-05	1.55E-05	1.54E-06
Miembro Órganos Inferior (UHG 3)	1.00E-08	1.09E-08	9.94E-10

#### Tabla 8

Conductividad hidráulica Calibración 2

Parámetro	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
Falla 1 Hundimiento	1.17E-06	6.54E-06	2.18E-06
Falla 2 Hundimiento	1.17E-06	6.54E-06	2.18E-06
Falla 3 Chitota	9.62E-07	9.47E-07	7.21E-07
Falla 4 Transversal	2.43E-06	3.38E-05	8.52E-07
Falla 5 Las Olas	7.67E-07	1.05E-06	6.99E-07

### Tabla 9

Conductividad hidráulica Calibración 3

Parámetro	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
Depósitos cuaternarios (Capa 1)	6.1E-05	6.1E-05	1.4E-08
Miembro Órganos Superior (Capa 2)	4.9E-09	4.9E-09	4.9E-07
Miembro Órganos Inferior (Capa 3)	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-9

Para evaluar el ajuste de las calibraciones del modelo, se calculó el error medio (EM), el error medio absoluto (EMA) y la raíz del error cuadrático (RMC), el cual es un buen indicador de

error para el modelado y es considerado un error aceptable si es menor al 10% (Anderson M.P. y Woessner W.W., 1992). Hay que tener en cuenta que la modelación y sus calibraciones están sujetas a la escasez de datos piezométricos, los cuales permiten determinar con mayor exactitud los valores de conductividad.

En consecuencia, de los tres escenarios calibrados, las calibraciones 1 y 2 son las menos adecuadas ya que tienen un RMC del 10%. Mientras que, la calibración 3, tuvo un mejor ajuste con un EM de -6,7m, EMA de 8,18m y RMC normalizada de 9,2%. Considerando los datos disponibles para el desarrollo del modelo, estos valores de calibración son aceptables, pues se ajustan a la condición de EM inferior a 0,5m y RMC menor al 10% (Tabla 10).

Adicionalmente, el error de balance de masas es del 0.01%, el cual es otro parámetro que indica que el error de la simulación es admisible si está alrededor del 1%.

#### Tabla 10

Calibración	EM	EMA	RMC
1	-0,29	9,04	10,03
2	0,38	9,88	10,98
3	-6,70	8,18	9,23

Indicadores estadísticos de calibraciones

Por otra parte, en la representación gráfica de los resultados de los niveles piezométricos de las calibraciones (Figura 25, Figura 26 y Figura 27), se muestra que los valores tienen una tendencia lineal, lo cual indica una correlación razonable entre los valores observados y los simulados. Asimismo, se observa que los niveles piezométricos simulados para las calibraciones 1 y 2 presentan un mayor incremento comparados con la calibración 3.

Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 1



## Figura 26

Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 2





Gráfico de valor observado vs valor simulado Calibración 3

#### 4.3 Niveles piezométricos

Como resultado de la simulación numérica en estado permanente se obtuvieron los niveles piezométricos para cada capa (unidad hidrogeológica) simulada mediante el paquete de observación de niveles piezométricos (HOB) en ModelMuse.

En la piezometría simulada se puede observar las alturas piezométricas resultantes para las diferentes capas del modelo. Las alturas piezométricas oscilan entre 599,684 y 1019,97 m.s.n.m., donde las de mayor altura están localizadas en la zona del escarpe del norte de Bucaramanga. El sistema está representado de la siguiente manera: la capa 1 que corresponde al Depósito Deslizamiento (ver Figura 28), la capa 2 que corresponde al Miembro Órganos Superior (ver Figura 29) y la capa 3 que corresponde al Miembro Órganos Inferior (ver Figura 30).

Piezometría simulada en estado permanente UHG1



## Figura 29

Piezometría simulada en estado permanente UHG2



Piezometría simulada en estado permanente UHG3



### 4.4 Balance hídrico

Como resultado de la simulación numérica se obtuvo el balance del acuífero en estado permanente (Tabla 11). La recarga del sistema debido al aporte lateral de altura piezométrica constante (constant head) corresponde a 99.27% (0.6029 m<sup>3</sup>/s) y en cuanto a la precipitación (recharge) el aporte es del 0.73% (4.4077E-03) del total de las entradas (Total IN).

Las salidas corresponden a la condición de altura piezométrica constante (constant head) con 38.43% (0.2334 m<sup>3</sup>/s) y a los drenajes (drains) con 61.57% (0.3739 m<sup>3</sup>/s) del total de las salidas (Total OUT).

#### Tabla 11

Balance de masas del sistema

IN	[m³/s]	OUT	[m³/s]
Constant head	0.6029	Constant head	0.2334
Drains	0.0000	Drains	0.3739
Recharge	4.4077E-03	Recharge	0.0000
Total IN	0.6073	Total OUT	0.6073

#### 5. Discusión

La cartografía geológica de la zona Norte de Bucaramanga, se construyó a partir de la integración de información bibliográfica del área de estudio y mediante la interpretación de imágenes satelitales, teniendo como prioridad la delimitación del gran deslizamiento rotacional presente en el área, con el fin de identificar la unidad geológica denominada Depósito de Deslizamiento. Este depósito está compuesto por bloques, cantos y gravas de lutitas, areniscas, neis, cuarzo, embebidos en una matriz limo-arcillosa, y debido a su estructura caótica, facilita la presencia de porosidad primaria y permeabilidad media a baja (INGEOMINAS, 2002) propiedades que permiten clasificarlo como un acuífero libre, factor que genera inestabilidad en el terreno.

De igual manera, para el desarrollo del modelo geológico se identificaron las fallas que aparecen reportadas en los estudios de (Aldana & Ariza, 2000; Hubach, 1952; Vargas & Niño, 1992) y se modificaron según la interpretación de imágenes satelitales. Adicionalmente, se planteó una falla de hundimiento producto del gran deslizamiento rotacional, la cual sólo afecta en profundidad a la unidad denominada Depósito deslizamiento, y sobre esta se identificaron diversos deslizamientos múltiples de menor tamaño.

Con base en lo anterior, se propone como una restricción geológica, la distribución en profundidad de la base del depósito de deslizamiento mediante la representación de la superficie de falla del mismo, la cual se obtuvo mediante un razonamiento matemático, y se construyó a partir de perfiles topográficos que permitieron ajustar la línea de tendencia (ecuación de segundo grado) de las profundidades topográficas mediante el uso de los topes de sondeos de perforación realizados en el área de estudio. Esto, considerando que existe una limitante en cuanto a información disponible y una necesidad de realizar más sondeos de perforación en el área que aporten mayor conocimiento de topes en profundidad.

Como resultado de las interpretaciones del modelo geológico, se define el modelo hidrogeológico conceptual del área de estudio, para el cual se identificaron 3 unidades hidrogeológicas (UHG): la UHG1 corresponde al acuífero Depósito deslizamiento, la UHG2 corresponde al acuífero Órganos Superior, y la UHG3 que corresponde al acuitardo Órganos Inferior, el cual se definió según la información de resistividad (Gómez & Anaya, 2004; Ingeominas, 2002; UIS & AMB, 2017) y se propone como el sello del acuífero Órganos Superior.

Finalmente, para la elaboración de la modelación matemática se estableció un sistema de estado permanente, cuyas entradas son la recarga por precipitación y la recarga lateral sur de la zona de estudio (altura piezométrica constante). Asimismo, se definieron como salidas del sistema los drenajes (Quebrada La esperanza, las Olas y Río Suratá).

Los resultados de calibración de este modelo permiten hacer un aporte al conocimiento del sistema hidrogeológico pues se observó sensibilidad de respuesta al aumentar el valor de conductividad hidráulica de las fallas, ya que cuando esto sucede, los resultados del modelo no son buenos (no se pueden calibrar), por lo tanto, se puede inferir que las fallas presentes en la zona de estudio no son buenas conductoras de agua.

#### 6. Conclusiones

La zona de estudio ha sido fuertemente intervenida por obras civiles aplanando y rellenando la topografía inicial del terreno, por tal motivo, los mapas topográficos recientes no permiten hacer una adecuada interpretación geomorfológica de la zona. Dicho lo anterior, la elaboración de la cartografía de la microcuenca de la quebrada La Esperanza a escala 1:2000 se realizó mediante del uso del modelo de inclinaciones CDMB 1967. De esta manera, se pudo delimitar con mayor detalle el gran deslizamiento de tipo rotacional dentro del cual se identifican otros deslizamientos sucesivos con escarpes secundarios.

Para el desarrollo de este modelo se definieron 3 unidades hidrogeomorfológicas (UHG): La UHG1, comprende el depósito deslizamiento, constituido por material heterogéneo, el cual presenta los mayores valores de conductividad hidráulica (Kx-Ky=6.1E-06 m/s) y es considerada como un acuífero libre. La UHG2, corresponde al *Miembro Órganos Superior* de la Formación Bucaramanga, constituido por gravas arenosas y areno gravosas con clastos de composición sedimentaria, con permeabilidades bajas (Kx-Ky= 4.9E-06 m/s) definida como un acuífero. Y la UHG3, que corresponde al *Miembro Órganos Inferior* de la Formación Bucaramanga, constituido predominantemente por guijarros a bloques de composición ígnea y metamórfica, con permeabilidades muy bajas (Kx-Ky= 1.0E-08 m/s), motivo por el cual se definió como la unidad sello del sistema.

En el proceso de calibración se encontró que en el escenario de calibración 1, al aumentar los valores de conductividad hidráulica de la UHG1 y la UHG2 los valores de las permeabilidades de las fallas bajan demasiado, por lo cual no se consideró un escenario favorable para el modelo.

70

En el escenario de calibración 2, se asignaron los mismos valores de conductividad hidráulica de la calibración 1, pero, adicionalmente se modificó la conductividad hidráulica de las fallas, obteniendo valores de permeabilidad demasiado bajos (muy cercanos a cero), pero no nulos. En el escenario de calibración 3 se utilizaron los mismos valores de conductividad hidráulica de la calibración 2, y, adicionalmente se aumentaron los valores de permeabilidad de las fallas, lo cual dio como resultado el escenario más adecuado para representar el sistema.

Con respecto al escenario de calibración 3, los resultados estadísticos muestran que es el que mejor reproduce el sistema, puesto que sus indicadores presentan para esta calibración un RMC de 9,23%, el cual es menor al 10% (valor que es recomendado para considerar válido un modelo).

En general, a partir de las calibraciones generadas, se concluye que el modelo presenta una alta sensibilidad al aumentar la conductividad hidráulica de las fallas lo cual se manifiesta en la generación de modelos que no se pueden calibrar. Lo anterior permite sugerir que se deben realizar estudios de caracterización hidráulica de las fallas presentes en la zona, con el fin de complementar la interpretación del comportamiento del flujo de agua subterránea.

El balance hídrico del modelo permitió identificar que el aporte lateral es la principal fuente de recarga del sistema (99.27%). Del mismo modo, se observó que las salidas de agua dependen en gran medida de los drenajes del área de estudio (Río Suratá y quebradas), siendo responsables del 61.57% de las salidas del sistema.

### 7. Recomendaciones y Limitaciones

Para que el modelo hidrogeológico numérico sea más representativo, es importante que se haga una buena distribución espacial en el área de estudio de nuevos pozos y/o piezómetros que permitan obtener mayores registros de datos piezométricos.

Con el fin de refinar parámetros hidráulicos se recomienda hacer pruebas de bombeo de larga duración que puedan compararse con piezómetros cercanos y así obtener información complementaria de las diferentes unidades hidroestratigráficas. Asimismo, se recomienda hacer una comparación con los diferentes valores que se han obtenido a lo largo del estudio de los acuíferos de la región.

Este trabajo de grado se elaboró teniendo en cuenta que la información utilizada es generada mediante un convenio interadministrativo entre la Universidad Industrial de Santander y el Área Metropolitana de Bucaramanga y a la fecha no se cuenta con permisos para su publicación (solo para uso). Por lo tanto, la información del proyecto es confidencial.
## **Referencias Bibliográficas**

- Aldana, W., & Ariza, S. (2000). *Geología para la estabilidad del escarpe Norte de Bucaramanga* (Tesis de pregrado) Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Anderson M.P. y Woessner W.W. (1992). *Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport* (Second). Academic Press, San Diego. 381 p.
- Antolinez, W. (2014). Modelo numérico del flujo de agua subterránea en las formaciones acuíferas de Bucaramanga (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, A. (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia 2009, 1–226
- Bermoudes, O., & Vásquez, L. E. (2004). Evaluación del agua subterránea en el área Metropolitana - Modelo geológico-geofísico para el área Metropolitana de Bucaramanga.
- CDMB, Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga, (1991). *Estudio Geotécnico asentamiento el Mirador* (p. 36).
- CDMB, Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga, (2010). *Plan general* para el control de la erosión 2010-2035 (p. 125).
- Contreras, J. C., & Osma, Á. (2018). *Caracterización del segmento Órganos Inferior en el Miembro Órganos (Formación Bucaramanga) del Norte de Bucaramanga*. (Tesis de pregrado) Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

- Diederix, H., Hernández M, C., Torres Jaimes, E., & Botero Santa, P. A. (2008). Modelo de evolución morfotectónica cuaternaria basado en evidencias estructurales, neotectónicas y paleosismológicas de los principales sistemas de falla en la región de Bucaramanga.
- De Porta, J. (1958) *La Terraza de Bucaramanga*. Boletín de Geología. Universidad Industrial de Santander. No 3. 3-13
- García, Y. & Añez, M. (2017). *Evolución reciente de los drenajes de los ríos Chicamocha y Suárez*. (Tesis de pregrado) Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Gómez, S., & Anaya, A. (2004). Acercamiento a un modelo conceptual de recarga de los acuíferos de la región de Bucaramanga. Avances en Recursos Hidráulicos, 11, 37–50.
- Gómez, S., Taupin, J. D., & Rueda, A. (2015). Estudio hidrodinámico, geoquímico e isotópico de las formaciones acuíferas de la región de Bucaramanga (Colombia).
- Hubach, E. (1952). Interpretación geológica de la erosión y de los deslizamientos de Bucaramanga y medidas de defensa. (Informe 867). Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Nacional-Ingeominas.
- Ingeniería de Suelos Ltda. (1998). *Estudio Definitivo Deslizamiento Barrio el Mirador*. Informe técnico (p. 101). Bucaramanga, Colombia.
- Ingeniería de Suelos Ltda. (2000). *Censo de viviendas amenazadas-Deslizamiento de Ciudad Norte Bucaramanga*. (Informe Técnico). Bucaramanga, Colombia.
- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1997). *Microzonificación sísmica del área metropolitana de Bucaramanga, Santander: fase 1*. (Informe técnico). Bogotá, Colombia.
- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga. (informe técnico) Bogotá, Colombia.

- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2002). *Exploración y evaluación* regional de aguas subterráneas en el área metropolitana de Bucaramanga. Departamento de Santander (informe técnico). Bogotá, Colombia.
- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2005). Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. (informe técnico). Bogotá, Colombia.
- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2009). Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón - revisión (p. 138).
- Ingeominas, Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2010). *Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander*. (informe técnico) Bogotá, Colombia.
- Gómez S. (2011). Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga. 1, 51–63.
- Jiménez, G., Speranza, F., Faccena, C., Bayona, G., & Mora, A. (2015). Magnetic stratigraphy of the Bucaramanga alluvial fan: Evidence for a ≤3mm/yr slip rate for the Bucaramanga-Santa Marta Fault, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 57, 12–22.
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. Boletín de Geología, 15.
- Rondón, E., & Cho, G. C. (2005). *Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la ciudad de Bucaramanga*. Revista UIS Ingenierías, 4 (2), 99–116.
- Royero, M. J., & Clavijo, J. (2001a). Memoria explicativa del mapa geológico generalizado del departamento de Santander, escala 1:400.000. Ingeominas, 256.

- SIMMA Sistema de Información de Movimientos en Masa © Copyright 2022 Servicio Geológico Colombiano, desarrollado por el Consorcio SGC-SIMMA (Kudos Ltda.® y Mercator SIG.®) – Contáctenos https://simma.sgc.gov.co/#/
- SGC & GEM, 2018. "Modelo Nacional de Amenaza sísmica de Colombia. Servicio Geológico Colombiano (SGC) – Grupo de Amenaza Sísmica. Fundación Global Earthquake Model (GEM). 196 pp. https://doi.org/10.32685/9789585279469
- Solano, L. (2016). Estudio de proveniencia de los sedimentos de la Formación Bucaramanga, al sur del Río Frío; en los municipios de Floridablanca y Girón, Santander. In Universidad Industrial de Santander (p. 171). http://www.elsevier.com/locate/scp
- "SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling" Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.
- Tesón, E., García, Y., Añez, M., Struth, L., Caballero, V., Babault, J., & Teixell, A. (2015).
  Capturas fluviales recientes de los ríos Chicamocha y Suárez: El origen de la terraza de Bucaramanga y causas de la reorganización de la red de drenaje. *XV Congreso Colombiano de Geología*, 53(9), 127–130. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004
- UIS, Universidad Industrial de Santander, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (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. Bucaramanga, Colombia.
- UIS & AMB, Universidad Industrial de Santander, Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (2019). A. M. de B. (2017). *Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos*

76

en masa del sector norte de Bucaramanga (barrios Lizcano, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María). Bucaramanga, Colombia.

- Vargas, G., & Niño, A. (1992). Geología y geotecnia de la escarpa noroccidental de la meseta de Bucaramanga.
- Velandia, F. (2017). Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga. 209. Bogotá, Colombia.
- Ward D., Goldsmith, R., Cruz, J., & Restrepo, A. (1974). Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Boletín Geológico, No. 21 (1-3 (1-132).

## Apéndices





78



