

5. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA

En este capítulo se evalúan los diferentes factores: litológicos, estratigráficos y estructurales que controlan el régimen y orientación de los flujos de aguas subterráneas junto con las variaciones del nivel freático; aguas que han contribuido en la generación de los deslizamientos del Espino y la Carbonera. Se define el modelo hidrogeológico de cada uno de los bloques estructurales adscritos a los deslizamientos del Espino y la Carbonera. Cada modelo se determina a partir de la evaluación de la información estratigráfica y la relación de las principales fallas con la orientación de los flujos de aguas subterráneas.

5.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

- Determinar en forma conceptual el modelo hidrogeológico de cada uno de los bloques estructurales que delimitan los deslizamientos de El Espino y La Carbonera.
- Evaluar las condiciones hidrogeológicas de cada una de las unidades estratigráficas (Acuíferos libres, Acuífero confinado, Acuitardo) y su relación con cada uno de los deslizamientos.
- Identificar la relación de las principales fallas con la orientación de los flujos de aguas subterráneas y su influencia en la generación de los diferentes deslizamientos.

5.2 METODOLOGÍA

Para el alcance de los objetivos propuestos se realizaron las actividades que se describen en los siguientes numerales.

5.2.1 Análisis de la información existente

Dentro de esta actividad se procedió a la consulta de los resultados del modelo geológico realizado para este estudio. A partir de la interpretación de los datos estructurales y estratigráficos se definió el modelo hidrogeológico para la determinación de los flujos de agua, tanto de infiltración como subterráneas, que alimentan cada uno de los deslizamientos.

A nivel regional se evalúa cada una de las principales fallas, que ejercen un control tanto directo como indirecto, en el comportamiento de los niveles freáticos y la orientación de los flujos de agua subterráneas.

A nivel local, para cada uno de los deslizamientos, se evalúan las principales fallas y el fracturamiento del macizo, como conductos secundarios de los flujos de aguas subterráneas.

Cada una de las unidades estratigráficas se evalúan en términos hidrogeológicos como: acuíferos libres, acuífero confinado, acuitardo; determinado su relación con las unidades adyacentes y su posición en cada uno de los deslizamientos.

5.2.2 Reconocimiento de campo

Durante esta actividad se realiza una descripción de cada una de las unidades estratigráficas en términos de su permeabilidad; se evalúan cada una de las fallas como zonas sello y de recarga de las agua de infiltración. Este análisis se apoya en los resultados del análisis de la información estratigráfica y estructural del estudio geológico.

5.2.3 Definición del Modelo Hidrogeológico

Como resultado del análisis anterior, se procede a la definición conceptual del modelo hidrogeológico para cada uno de los deslizamientos que afectan la zona de estudio. Para el análisis regional, se consideró como límite sur-occidental el zanjón la Muralla, que alimenta la laguna de Terreros y sirve de límites del desarrollo urbano del barrio Caracolí, consolidado sobre la vertiente de la margen derecha de este drenaje. Como límite oriental se considera los terrenos planos de la Sabana, en jurisdicción de la localidad de Bosa.

5.3 EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA

5.3.1 Marco Geológico Regional

La zona de los deslizamientos de Altos de la Estancia (El Espino y la Carbonera), se localiza en el sector sur occidental de la ciudad en jurisdicción de la localidad Ciudad Bolívar, sobre el sector de laderas urbanizadas que delimitan por el sector occidental los terrenos planos de la Sabana. En el contexto regional, en el área de estudio se expone las rocas plegadas de la Formación Guaduas, diferenciada en varios niveles y muy afectadas por las actividades de la industria extractiva, que generaron la formación de varias canteras desde la década del sesenta del siglo pasado. Por el costado sur y occidental se exponen las Formaciones Arenisca Labor y Arenisca Tierna (Kgt) del Grupo Gualadupe. (Ver Mapa 3-1 de Unidades litoestratigráficas del subsuelo, Capítulo 3).

En superficie estas unidades de areniscas se encuentran cubiertos por un horizonte de roca meteorizada, con el desarrollo de suelos residuales de composición limo-arenosos, de alta permeabilidad. Cubriendo estos suelos residuales se exponen suelos transportados de origen fluvio-glaciar (en el sector La Carbonera), con una composición

de gravas y cantos de areniscas angulares, en una matriz limo arenosa y limo arcillosas de baja a mediana permeabilidad y suelos de origen fluvio coluvial, del cuaternario inferior, con una composición de gravas y cantos de areniscas, embebidos en una matriz limo arcillosa, afectados por la actividad tectónica del cuaternario Inferior.

Antes del desarrollo urbano del sector, la cartografía del IGAC de 1989 identifica un sistema de drenajes hasta de tercer orden (Método de Strahler), de baja densidad, que drenaban ambas vertientes de la zona de estudio, con un patrón sub-paralelo que evidencia claramente un control estructural en la formación de la red superficial.

5.3.2 Tectónica regional.

De los resultados de la evaluación geológica y geomorfológico realizada en el presente estudio, se resaltan las siguientes condiciones estructurales y tectónicas regionales de influencia en el área de estudio:

- Un sistema de fallas con orientación preferencial N-S a N20E, muy bien definidas sobre la vertiente occidental del valle del Tunjuelo, al sur del área de estudio. Este sistema se observa con claridad en el Mapa Tectónico Estructural de la Figura 3-2 del Capítulo de Geología y se manifiesta igualmente a nivel del macizo rocoso en un sistema de discontinuidades con esta misma orientación.

Al sur del área de estudio, este sistema de fallas desarrolla en general zonas de brechas y pone en contacto fallado las arcillolitas de la Formación Guaduas con las areniscas de las Formaciones Labor y Tierna. En el barrio Cerros del Diamante, se asocia a una zona de cabalgamiento de la Formación Arenisca Labor y Tierna, con una amplia zona de roca muy fracturada. En general este sistema de fallas, definen sobre las areniscas Labor y Tierna, zonas de alta permeabilidad secundaria por la fracturación del macizo.

- El sistema de fallas de Terreros, con dirección N60 a 70W, sistema de fallas que delimita lateralmente, al norte y al sur cada uno de los deslizamientos (Ver Figura 3-4. Mapa de Lineamientos Estructurales Regionales, Capítulo 3).
- Un sistema de fallas secundarias con orientación N45E que corresponde a un sistema de fallas normales, destacándose la falla de Rosales, que diferencia el bloque tectónico El Espino del bloque la Carbonera.

5.3.3 Evaluación de Unidades Hidroestratigráficas.

En este numeral se realiza una clasificación de las diferentes unidades estratigráficas, en función de su comportamiento hidrogeológico y el grado de influencia en el aporte de agua a cada uno de los deslizamientos.

Formación Guadalupe – Arenisca Labor y Tierna (Ksglt) : Esta unidad litológica está representada por una secuencia de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, friables, poco a moderadamente meteorizadas, en capas gruesas y con estratificación planoparalela y cruzada. Esta unidad exhibe una alta permeabilidad primaria y secundaria por el fracturamiento que la acompaña; características que la definen con una alta capacidad de infiltración y la clasifican como una unidad acuífera. Para los propósitos del análisis de cada uno de los deslizamientos, la Formación Arenisca Tierna, por su composición de arenas cuarzosas, de grano fino a medio, muy friable y de alta permeabilidad, representa según su posición, un acuífero libre o confinado.

Esta unidad delimita por el costado sur el bloque la Carbonera y su exposición superficial demarca una zona de recarga importante, de influencia directa en el área del deslizamiento.

Formación Guaduas (Ktg): Esta unidad ha sido dividida en cinco segmentos (Ver Capítulo 3 de Geología).

- **Segmento 1.** Esta unidad constituye la base de esta formación; compuesta por niveles de arcillolitas grises y negras, lodolitas y algunos niveles de areniscas de color amarillento de grano medio. En general representa una unidad arcillosa, de baja permeabilidad, con alguna permeabilidad secundaria asociada a su fracturamiento, principalmente en zonas de falla. En el área de la Carbonera esta unidad se expone someramente y representa una capa sello de la unidad acuífera anterior. Su composición arcillosa determina una conductividad hidráulica muy baja por lo que se le considera como un cuerpo acuícluido; configura una barrera a los flujos de agua transmitidos por las unidades adyacentes. Este comportamiento hidráulico a manera de sello, determina igualmente en las zonas de contactos fallados, una condición de barrera que orienta la distribución del flujo transmitido a través de estas zonas de permeabilidad secundaria.
- **Segmento 2.** Esta unidad está compuesta por intercalaciones de lodolitas, areniscas en capas gruesas y laminares y niveles de arcillolitas y limolitas de color gris claro y amarillo. Por la presencia de niveles arcillosos intercalados, representa una unidad de baja permeabilidad primaria (acuitardo). La afectación tectónica de esta unidad desarrolla una permeabilidad secundaria importante y por el grado de fracturamiento se clasifica como una unidad de mediana permeabilidad. Delimita por el costado oriental el deslizamiento del sector de la Carbonera y define en este sector un nivel freático colgado, de influencia directa en la zona del movimiento.
- **Segmento 3.** Es un segmento principalmente arenoso, denominado como la Arenisca Guía; está compuesto por capas de arenisca cuarzosa de grano fino a medio, de color amarillo, en estratos gruesos a finos, con estratificación masiva, localmente cruzada, con niveles de estratificación laminada. Las características texturales de esta unidad la clasifican como una unidad de alta permeabilidad, con una alta capacidad de infiltración superficial y desarrolla en superficie de un horizonte de suelo residual arenoso de 2 a 3m de espesor.

Esta unidad delimita por el occidente el deslizamiento del Espino y por su alta capacidad de infiltración, representa un acuífero libre y demarca una zona de recarga importante, tanto para las aguas de lluvias como de las aguas servidas del sector urbanizado.

- Segmento 4. Nivel de composición arcillosa formando parte del deslizamiento el Espino, donde suprayace el segmento anterior. Comprende un paquete de arcillolitas de color gris oscuro y amarillo, con algunas capas de areniscas y niveles delgados de carbón; muy afectados por el movimiento del deslizamiento. Esta unidad no reviste importancia desde el punto de vista hidrogeológico dada su exposición superficial y ubicación al oriente del área de estudio.
- Segmento 5. Constituye el tope de la formación Guaduas. En el área de estudio está representada por niveles de areniscas y arcillolitas, expuestas en el sector norte sobre el barrio San Rafael. Por la presencia de niveles de arcillolitas definen en general, una condición de baja permeabilidad.

5.3.4 Evaluación de las unidades del Cuaternario

En general los suelos residuales desarrollados a partir de las unidades de la formación Guadalupe (Arenisca Labor y Tierna), constituyen horizontes superficiales de alta permeabilidad y constituyen áreas de recarga de los acuíferos libres de las unidades del subsuelo.

En el Sector el Espino, un horizonte de suelo residual arenoso, desarrollado a partir de las unidades de areniscas Guía, alcanza espesores hasta de 3.0m. Estos suelos delimitan las laderas del sector occidental, cubren las unidades de areniscas meteorizadas y representan un zona importante de infiltración tanto de las aguas servidas como de las aguas lluvias de este sector de la cuenca de la quebrada Santa Rita.

Los depósitos de origen fluvio-glacial, observados en las laderas que delimitan el sector de la Carbonera, exhiben una matriz limo-arcillosa y limoarenosa, relativamente impermeable o de baja permeabilidad. Esta unidad se clasifica como un cuerpo confinante, que por su exposición superficial aísla parcialmente las unidades del subsuelo.

5.3.5 Condiciones Estructurales.

De acuerdo con los sistemas de fallas regionales que afectan este sector de la Sabana, se define el siguiente modelo estructural para el área de estudio, y su influencia en el comportamiento y orientación de los flujos de aguas subterráneas para cada uno de los deslizamientos:

- Un sistema de fallas de cabalgamiento y de compresión con dirección preferencial Norte/Sur a N10E y N10-20W, observadas al sur del área de estudio; donde demarca zonas de brecha y un macizo muy fracturado asociado a un sistema de fallas inversas que afectan las unidades estratigráficas de la formación Arenisca Tierna y Labor y pone en contacto la formación Guadalupe con las rocas arcillosas de la Formación Guaduas.

En el área de estudio, este sistema se reconoce a nivel del macizo rocoso, con un sistema de discontinuidades muy persistentes y con esta misma orientación. En general este sistema de fallas definen zonas de mayor permeabilidad secundaria a nivel del macizo rocoso.

- Un segundo sistema con orientación N50W a 70W (Sistema de Fallas de Terreros), que delimitan al norte y sur cada uno de los bloques estructurales que forman la zona de estudio. Este sistema de fallas demarca una zona de cizallamiento y configura barreras impermeables por la presencia arcillas resultantes del movimiento de la falla (gouge), que reorientan los flujo de aguas subterráneas.
- Un tercer sistema de fallas en dirección N50E a N70E (fallas Rosales, la Carbonera y Santa Rita), que corresponde a un sistema de fallas sintéticas (de movimiento dextral) y antitéticas (de movimiento sinistral). Asociado a este sistema se demarcan igualmente zonas de fracturamiento de baja permeabilidad por la presencia de superficies de movimiento. Este sistema separa en términos hidrogeológicos la zona norte del Espino, del deslizamiento de la Carbonera.
- Para el bloque El Espino se identifica un sistema de fallas normales con orientación N20W A N25W (fallas Espino E y Espino W), que demarcan con una orientación normal a este sistema, el vector del esfuerzo menor.

Dentro de este modelo estructural, a nivel del macizo rocoso el régimen de agua está controlado por los siguientes factores en orden de importancia:

- Los planos de estratificación orientados principalmente en dirección NW, con inclinación de 10° y 25° hacia el NE; donde los flujos de aguas están controlados por la permeabilidad primaria de los niveles de areniscas.
- La permeabilidad secundaria del macizo rocoso controlada por el grado de fracturación, con varios sistemas de discontinuidades, que coinciden con la orientación de los sistemas de fallas regionales; persistentes y con un espaciamiento promedio de 0.3m.
- La presencia de un sistema de discontinuidades abiertas, con orientación preferencial NW-SE.

5.4 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

En este numeral se evalúan para cada uno de los bloques estructurales, los diferentes factores que han controlado el régimen de agua en cada uno de los deslizamientos y, además se establecen las Unidades Hidrogeológicas. Ver Mapa 5-1.

5.4.1 Sector El Espino

En este bloque estructural, el régimen de agua que afecta el deslizamiento está controlado por los factores que se presentan a continuación.

5.4.1.1 Factores Estratigráficos

- La alta permeabilidad de los suelos residuales arenosos desarrollados a partir de las unidades de areniscas de Formación Guaduas. Estos suelos se exponen al occidente de la corona del deslizamiento y junto con las unidades de areniscas del subsuelo, representa una zona de recarga y de infiltración, tanto de las aguas lluvias como de las aguas servidas que afectan directamente la zona del deslizamiento. La investigación geoelectrica para el este sector identifica un nivel freático a 37 m de profundidad tanto para el occidente (IGR-SEV03) como al oriente (IGR-SEV05), mientras que en el cuerpo del deslizamiento de 22m (IGR-SEV04). Ver Figura 7-16 del capítulo de investigación del subsuelo.
- La exposición en superficie de la Arenisca Guía de la Formación Guaduas (Segmento Ktg-S3); que representa un nivel estratigráfico de alta permeabilidad y clasificado como un acuífero libre y una zona de recarga del deslizamiento. La presencia de niveles arcillosos intercalados, demarcan niveles freáticos colgados.

Los sondeos eléctricos verticales IGR-SEV03 y IGR-SEV04, se localizan al occidente, cerca de la corona del deslizamiento donde se identificó la posición del nivel freático a profundidades de 36.7 m en el mas retirado y 22.0 m en el mas cercano a la corona del movimiento, ubicándose la tabla de aguas sobre la base del acuífero libre de la Formación Arenisca Guía.

Al oriente, el IGR-SEV05 se ubica sobre el cuerpo del deslizamiento, con un nivel freático a una profundidad de 39.7m, al occidente de la falla del Mochuelo.

- La presencia en profundidad de un nivel arcilloso de baja permeabilidad, (Segmento Ktg-S2) que sirve de confinamiento del segmento superior de alta permeabilidad.

5.4.1.2 Factores Estructurales

- El sistema de fallas con orientación N45W a N70W (fallas de Santa Rita y Rosales), delimitan por el costado Norte y Sur respectivamente, el bloque estructural de la zona del Espino y parece representar un sistema de fallas antitéticas de movimiento sinistral. La falla Rosales configura una barrera de características impermeables al poner en contacto las unidades arcillosas del segmento Ktg-S1 al sur, con las areniscas del segmento Ktg-S3; esta superficie reorientan los flujos de aguas subterráneas hacia el Este y ejercen un control en la elevación de los niveles freáticos en la masa deslizada durante los eventos lluviosos.
- El sistema de fallas con orientación NE (Espino E y Espino W); que representan un sistema de fallas normales, abiertas que dieron lugar a movimientos diferenciales en la fase inicial de este deslizamiento.
- El trazo de la falla el Mochuelo con orientación N50W, define por el oriente igualmente una barrera de carácter impermeable que hace el efecto de presa, controlando, durante los eventos lluviosos de alta intensidad o por el vertimiento continuo de las aguas servidas del sector urbanizado, los niveles freáticos tanto en la masa deslizada como antes del deslizamiento.

5.4.2 Sector La Carbonera

Para este segundo bloque, el régimen de aguas, tanto subterráneas como de infiltración están controladas por los siguientes factores:

5.4.2.1 Factores Estratigráficos

- La exposición a nivel de la superficie del plano del deslizamiento, de un nivel arcilloso (Segmento S1 de la base de la Formación Guaduas), que define para este sector un nivel freático colgado, superficial, que a la vez confina en profundidad las areniscas de la formación Arenisca Tierna y Labor. Esta condición explica la presencia de un flujo superficial con zonas pantanosas y la presencia adicional de niveles freáticos profundos identificados en la investigación geoelectrica. Los sondeos eléctricos verticales IGR-SEV01 e IGR-SEV02, localizados al occidente de la corona del deslizamiento, determinan un nivel freático a una profundidad de 36.7 y 31.7 m. Al oriente el IGR-SEV06 se ubica sobre el cuerpo del deslizamiento, donde se identifica un nivel freático a una profundidad de 39.7m, tabla de agua asociada al acuífero confinado de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Al oriente el IGR-SEV07 identificó un nivel freático a una profundidad de 18.3m, influenciado por el efecto de presa ejercido por la falla el Morro.

- La delimitación por el costado sur del deslizamiento, de las unidades de areniscas fracturadas de la Formación Arenisca Labor y Tierna, de alta permeabilidad primaria y secundaria. Esta unidad litológica define un aporte directo de los flujos de aguas sobre el deslizamiento la Carbonera y explica la condición de inestabilidad, observada en las fotografías antiguas, antes del proceso de urbanización del sector.
- En menor importancia, por el costado sur del deslizamiento se expone un macizo muy fracturado de areniscas y arcillolitas (Segmento 2 de la Formación Guaduas), con un aporte secundario de las flujo de aguas de infiltración sobre el deslizamiento de la Carbonera.

5.4.2.2 Factores Estructurales

- El sistema de fallas con orientación N50E-N70E, de los Rosales al norte y la Carbonera al sur, además de delimitar el bloque estructural, configura como en el caso del bloque El Espino, superficies de características impermeables, que reorientan los flujos de aguas subterráneas e individualizan este sector.
- El sistema de fallas de Terreros (falla el Morro), define igualmente una barrera de carácter impermeable que hace el efecto de presa, controlando los niveles freáticos en profundidad para los acuíferos confinados (el IGR-SEV07, identificó un nivel freático a una profundidad de 18.3m, asociado al trazo de esta falla). Este sistema de fallas no evidencia mayor importancia en la evolución de esta deslizamiento.

Mapa 5-1 Unidades hidrogeológicas

