

**GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y AMENAZAS GEOLÓGICAS DE LA CUENCA DEL LA QUEBRADA SAN FRANCISCO, SAN PEDRO DE LOS MILAGROS, DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**

1. **INTRODUCCIÓN**

Dentro del marco del contrato Fondo Adaptación – Conhydra, se contempla el estudio de las amenazas geológicas en las cuencas y áreas vecinas a la infraestructura de acueductos, en este caso del que surte principalmente la vereda San Francisco y algunos sectores de dos veredas cercanas, San Juan y la Pulgarina, localizadas en el municipio de San Pedro de los Milagros (Antioquia). Como componente metodológico para evaluar las amenazas naturales se encuentran la geología y la geomorfología que aportan el conocimiento del suelo y subsuelo, factores determinantes en la susceptibilidad del suelo a los fenómenos naturales de origen hidrometeorológico como inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa y que revelan eventualmente su período de recurrencia.

Metodológicamente, se aplicó la observación y análisis de los fenómenos de inestabilidad en el campo y se elaboró su cartografía geológica y geomorfológica directa, aplicando a la vez criterios morfodinámicos para la evaluación de la amenaza, tal como se describen a continuación. La consulta de las bases de datos de desastres naturales de Colombia, no proporcionó información para estimar los períodos de recurrencia de los problemas causados por las crecientes de la quebrada, pues en ninguna de ellas aparecen referencias a ésta quebrada.

**Movimientos en masa**. Para evaluar su amenaza se utilizó el método directo, que consiste en realizar la observación y levantamiento detallado de sus aspectos geológicos y geomorfológicos, para compararlos con los diferentes episodios de inestabilidad en el área estudiada y de esta manera se obtiene una evaluación de su magnitud. Para evaluar su periodicidad se aplican criterios de presencia y estado evolutivo de las cicatrices de movimientos en masa encontradas en la zona aledaña al proyecto, teniendo en cuenta que ellas indican un rango de tiempo transcurrido desde la ocurrencia del fenómeno (edad), el cual se asimila a período de recurrencia (Parra, 2009).

Recientes: La zona de arranque se observa sin o casi sin vegetación (0 a 10 años).

Subrecientes: Zona de arranque con vegetación de rastrojo bajo hasta alto (10 a 50 años).

Antiguas: Zona de arranque con redondeamiento de flancos (50 a 100 años)

Muy antiguas: Zona de arranque con redondeamiento de flancos y corona (100 a 300 años).

Nichos de deslizamientos: Solamente se observa una depresión topográfica con forma de movimiento en masa (> 300 años).

**Avenidas torrenciales**: Las avenidas torrenciales consisten en crecientes excepcionales que superan decenas a centenares de veces las crecientes normales de una cuenca hidrográfica, en razón a que su caudal además de agua, consiste en una mezcla viscosa de rocas, troncos, suelos y escombros, que gracias a la pendiente del cauce y su energía potencial, se convierte en un flujo laminar denso que arrastra con cuanto material suelto o débil encuentre a su paso. El fluido así formado, transita aguas abajo, destruyendo todo, hasta llegar a un sitio plano en el cual va depositando el material, hasta convertirse de nuevo en un flujo laminar.

Cada evento que ocurre en la naturaleza, deja una huella sobre el terreno proporcional a su magnitud, así que una creciente hidrológicamente “normal”, de 2.33 años de período de recurrencia, no deja mayor evidencia sobre su cauce; crecientes de menor frecuencia van dejando huellas mayores que si son correctamente interpretadas, permiten conocer el fenómeno, en especial su edad y magnitud. El estudio de las avenidas torrenciales se basó en la estratigrafía de los depósitos cuaternarios (acumulados en las márgenes hace decenas, centenares o miles y en algunos casos, millones de años), lo que permite establecer su intervalo de recurrencia aproximado y la magnitud de los fenómenos aluviales o torrenciales que han transitado por su cauce. (INGEOMINAS 1995). Un criterio adicional lo proporciona la lectura de la textura superficial de las vertientes en la cuenca, la cual permite identificar fenómenos de movimientos en masa que hayan ocurrido aproximadamente en las últimas decenas o centenares de años (Huff, 1988). En consecuencia, el análisis e interpretación de aerofotografías, complementadas con reconocimiento de campo, permiten saber si en una cuenca se presentan avenidas torrenciales o no, y en tal caso, se pueden saber detalles sobre su origen, magnitud e intervalo de recurrencia.

**Crecientes de bajo intervalo de recurrencia**: Este tipo de crecientes se presentan esporádicamente en una cuenca y tradicionalmente se las ha estudiado mediante métodos hidrológicos que parten de datos de instrumentación pluvial colectada en la zona. Cuando este tipo de información no existe, las técnicas geomorfológicas y geológicas y también pueden dar luces sobre este tipo de caudales máximos, con el fin de apoyar las aproximaciones hidrológicas y proveer datos para el adecuado diseño de las obras que se relacionen con su cauce (Kochel et. Al., 1988).

La historia reciente y la consulta con pobladores de la cuenca hidrográfica, permite verificar los eventos más recientes y en algunos casos su génesis, lo que ayuda a obtener una visión más cercana al fenómeno en el tiempo. Conocida la recurrencia y magnitud aproximada de las eventuales crecientes que se puedan presentar en una cuenca, es posible diseñar infraestructura que evite su impacto directo, lo mitigue, o en último caso, tomar decisiones acerca de la adquisición de seguros que protejan la inversión.

En muchos casos la amenaza se puede representar sobre mapas, en especial cuando se obtienen diferentes grados de la misma porque se trabajan áreas de tamaño considerable, aunque dichos mapas requieren de bases topográficas con precisiones que no se encuentran en ninguna de las bases topográficas disponibles para este trabajo. La sola elaboración de las bases a tales escalas (1:5.000 o mayores), es más costosa que los estudios aquí emprendidos.

Si se tiene en cuenta que por ejemplo en un área urbana, una inundación puede ser muy dañina al subir sólo un metro de nivel, pues implica que en las viviendas las pérdidas en ropa y enseres serían totales, serían necesarias bases topográficas con precisión vertical mayor a un metro, es decir, de escala mayor de 1:1.000, las cuales casi ninguna ciudad de Colombia las tiene.

En el presente caso, los mapas disponibles de IGAC tienen escala 1:25.000, con curvas de nivel cada 50 m, lo que hace imposible expresar zonas de amenaza por inundación o por avenidas torrenciales. Algo semejante ocurre con los movimientos en masa, pues ellos tendrían que ser muy grandes para aparecer en un mapa escala 1:25.000, donde el trazo mínimo de uno de ellos que sería de unos 3 mm sobre el mapa, implicaría 75 metros, es decir un deslizamiento grande a muy grande, que no aplica en este caso.

Dadas las limitaciones expresadas anteriormente, la amenaza estudiada para este informe tiene que ver con la ocurrencia del fenómeno y su periodicidad antes que su extensión específica, es decir, se encuentra si la periodicidad de una avenida torrencial es alta, media o baja y no un dimensionamiento espacial para el caso de que se presenten varios escenarios del fenómeno o que haya suficiente área e información de campo para comparar su ocurrencia en varias cuencas vecinas. Lo anterior no quiere decir que el estudio no esté completo, sino que está dirigido a informar si el fenómeno ocurre o no, su tamaño y su frecuencia aproximada para una sola cuenca.

Es preciso entender además que la presentación de un mapa se justifica si en el área que él representa, se encuentran por lo menos dos unidades diferenciables, de lo contrario, no tiene justificación un mapa con un solo color (unidad), lo cual puede quedar claro solamente enunciando tal condición en el texto.

Por último, es necesario tener en cuenta, que para un sistema de acueducto, la bocatoma y parte de la línea de aducción siempre se van a encontrar en la zona de amenaza alta indiferentemente de si está expuesta a una avenida torrencial o a una inundación, porque sin excepción, todos los cauces naturales presentan inundaciones, pero no todos avenidas torrenciales.

Para complementar la información geológica regional, se realizó una visita al área, donde se recorrió el sector de bocatomas y buena parte de la conducción, en la que se hicieron observaciones de los fenómenos de inestabilidad y se levantó la cartografía geológica y geomorfológica de manera directa, que complementaron la información derivada de la interpretación de las siguientes aerofotografías:

Vuelo Fecha Escala Fotografías

San Pedro AE- 251 Agosto de 2006 1:10.500 faja 06, 255 y 256

San Pedro AE-251 Agosto de 2006 1:10.500 faja 07, 178 y 179

La información sobre crecientes y fenómenos sucedidos en la cuenca se completó con el testimonio del fontanero y de habitantes vecinos. La consulta en las bases de datos de desastres naturales disponibles para Colombia (Desinventar, SIMMA), no dio resultado positivo, pues no aparece en la cuenca ningún movimiento en masa registrado, índice de que no han sucedido hechos graves en la cuenca al menos desde 1920, fecha en que comienzan los registros.

La cuenca de la quebrada San Francisco se localiza en la vereda del mismo nombre, en la jurisdicción de San Pedro de los Milagros, Antioquia, al noroccidente de su cabecera municipal, en este mismo sector se localiza un afluente de caudal menor que recibe el nombre de quebrada Montenegro. En su tramo medio a superior, las aguas de dichas quebradas, surten el acueducto de varias veredas, entre ellas San Francisco y San Luis, pertenecientes al mismo municipio. Ambas microcuencas nacen en la Cuchilla de Montenegro, que es la parte más alta del entorno local y que alcanza los 2.700 m de altura; en esta zona el uso de suelo es mixto, donde se presentan pastos para ganadería extensiva, que se alternan con bosque secundario protector y en los últimos años algunos cultivos limpios aislados. En la parte media, aguas abajo de las bocatomas, predominan las áreas cubiertas de pastos, con una menor proporción de fincas recreativas.

El acueducto consta de dos bocatomas localizadas cerca de la confluencia de los cauces, ambas con desarenador independiente, las que aportan su caudal a una planta de potabilización, de la cual parte una línea de conducción de más de 8 km. de longitud para surtir de agua a estas comunidades.

1. **GEOLOGÍA REGIONAL**

La geología regional publicada por INGEOMINAS (1983, Figura 1), indica para la zona de influencia directa de este acueducto, cuatro unidades litológicas: Esquistos cuarzo sericíticos (Pes) en la parte más alta, sobre la cumbre de la Cuchilla Montenegro; anfibolitas (Pa) desde la mitad de la vertiente hasta la planicie y por último en la parte de colinas bajas, se encuentran las cuarzodioritas del Batolito Antioqueño (Ksta), dentro de las cuales se destaca un estrecho aluvión cuaternario que bordea la quebrada (Qal).

**2.1 Esquistos cuarzo-sericíticos (Pes):** Componen un macizo rocoso compacto, foliado en bandas milimétricas alternas de plagioclasa, cuarzo y sericita, con cantidades menores de biotita que definen las bandas oscuras. Por efectos de meteorización, estas rocas se han descompuesto para formar un perfil de suelos areno-limoso a arcilloso de color ocre amarillo, cohesivos, de más de 5 m de espesor, cubierto por horizontes A y B de más de 20 cm de espesor, maduros y con aporte de cenizas volcánicas.



Pa

Pa

Pes

Kstac

**Figura 1.** Geología regional del área de la quebrada San Francisco (Tomado de INGEOMINAS, 1983). Pes= esquistos, Pa= Anfibolita, Kstac= Batolito Antioqueño

**2.2 Anfibolitas (Pa):** Se trata de una roca masiva, bandeada debido a su composición de cantidades equivalentes de plagioclasa y hornblenda; por efectos de meteorización, la roca se descompone superficialmente para formar un perfil de meteorización también de más de 5 m de espesor, compuesto por suelo limoarcilloso, color pardo rojizo, firme y cohesivo, que igualmente presenta una cubierta de horizontes A y B de más de 20 cm de espesor, ambos con aporte de cenizas volcánicas.

**2.3 Batolito Antioqueño (Kstac):** Las colinas bajas que bordean la cuenca en su parte plana inferior, están compuestas de cuarzodiorita – tonalita que componen esta unidad roca tan común en el centro de Antioquia; está constituido por plagioclasa, cuarzo, biotita y hornblenda, las que en conjunto forman un macizo rocoso de color gris claro a blanco moteado negro con textura granítica gruesa. El perfil de meteorización del batolito alcanza en la zona más de 20 m de espesor, por lo cual no aflora en ningún sitio como roca fresca en superficie y sólo se aprecia su perfil de meteorización en las vías como un suelo color naranja rojizo, arcillo-arenoso, con cubierta de horizontes A y B de 20 a 30 cm. de espesor cada uno.

**2.4 Aluviones Cuaternarios (Qal):** Con este nombre se agrupa el material que forma el relieve plano que bordea la quebrada en su parte baja, compuesto por gravas, arenas y limos sueltos, cubiertos también por horizontes de suelos A y B de espesor similar a los anteriores.

La presencia de una capa espesa de suelos sobre todas las unidades, complementada con horizontes A y B relativamente gruesos, indica la existencia de un paisaje maduro, en el cual los agentes atmosféricos presentes en los últimos centenares a miles de años no han tenido una agresividad suficiente como para dejar cicatrices de movimientos en masa importantes. Excepción de lo anterior lo constituye el pequeño depósito aluvio-torrencial formado entre la vía de acceso a las bocatomas y el viaducto de la conducción que se localiza unos 100 metros aguas arriba de este punto.

1. **Geología Local**

Para realizar el mapa geológico local (Figura 2), se tomaron los contactos de las unidades mayores contenidas en el mapa de INGEOMINAS (1983), con modificaciones menores resultantes de observaciones realizadas durante la fotointerpretación y la visita a campo, en tanto que las unidades cuaternarias sí registran cambios significativos, en razón a que se incorpora una unidad de flujos de tierra y los aluviones cambian de extensión. No se describe en detalle en este numeral la unidad de esquistos puesto que en ella no se localiza ninguna infraestructura del acueducto.

**3.1 Anfibolitas**

Las anfibolitas que se pudieron observar en la zona de este trabajo se limitan a los afloramientos que se encuentran sobre el camino a la bocatoma, en el sitio donde la conducción cambia de la margen izquierda a la derecha. En este lugar se observa la anfibolita casi fresca, solamente oxidada a lo largo de fracturas y afectada por dos juegos de diaclasas más o menos ortogonales que definen poliedros de rocas de 20x20 cm de diámetro, lo que no representa ninguna debilidad importante del macizo rocoso. Por encima de la roca y sobre todo el resto de la zona de trabajo que corresponde con esta roca, se presenta el suelo limoarcilloso color pardo rojizo ya descrito, de más de 5 m de espesor, que con penetrómetro de mano arrojó una resistencia de 3.5 Kg/cm², valor que indica un suelo de buenas condiciones para propósito de fundación de estructuras, en especial si son livianas, tales como las que requiere un acueducto de este tipo.



**Figura 2.** Mapa geológico de la zona de influencia del acueducto de San Francisco.

**3.2 Batolito Antioqueño**

La zona occidental del sistema de acueducto reposa sobre suelos derivados de la cuarzodiorita – tonalita del Batolito Antioqueño, que presenta suelos de color pardo-naranja, arcillo – limosos hasta arcillo – arenosos, cohesivos que al penetrómetro de mano dieron valores de 2.5 kg/cm², el cual se puede considerar como suficiente ya que por las características de la conducción, las demandas de resistencia del suelo no son muy significativas y además no se encuentran zonas inestables a lo largo de su recorrido, con excepción de las que se han socavado recientemente por su cercanía al cauce de la quebrada.

**3.3 Flujos de tierra**

Existen en el área varias zonas de topografía suave que definen planicies inclinadas de pendientes menores de 8º, que resaltan en la topografía redondeada de las colinas circundantes, se trata de depósitos de flujos de tierra meteorizados totalmente que forman suelos de color pardo-naranja a pardo rojizo que se presentan en el segmento inferior de algunas laderas de la parte alta y media de la cuenca. De acuerdo con numerosos estudios llevados a cabo en la zona, entre ellos los de Corantioquia (2007), se identifican abundantes depósitos de esta clase que fueron formados en las fases finales del levantamiento de la Cordillera Central, o posteriores a ella, es decir con edades entre 2.0 y 0,5 millones de años. Los perfiles de meteorización deben alcanzar en partes más de 10 m, si se tiene en cuenta que el sólo suelo tipo C-VI en la clasificación de Dearman (1991), tiene más de 1.5 m de espesor, en tanto que los otros suelos subyacentes no se pudieron observar por falta de afloramientos. Los horizontes A y B de más de 30 cm de espesor cada uno, ratifican la longevidad de estos suelos. Una medida de resistencia con penetrómetro de mano, en un afloramiento cercano a bocatoma, húmedo, no saturado, mostró un valor de 2.5 Kg/cm², lo que indica que el valor de resistencia en estado de saturación debe ser ligeramente menor, del orden de 1.5 Kg/cm², lo que indica un suelo de mediana resistencia, sin problemas de asentamiento para estructuras livianas tales como las que se relacionan con un acueducto de esta magnitud.

**3.4 Aluviones recientes**

En la parte baja de la cuenca, la quebrada corre por el fondo de un valle amplio formado por las bases de colinas amplias y de depósitos de vertiente que la han limitado lateralmente para que forme un valle relativamente estrecho que alcanza menos de 20 m de amplitud normal y solo se amplía hacia el oriente del sitio La Matica. El cauce de la quebrada se torna a meándrico gracias a las bajas pendientes del paisaje y a la baja cantidad de sedimentos que transporta en aguas medias. En el borde de tal cauce se han depositado capas de gravas de tamaño medio, arenas, limos y arcillas que definen una terraza estrecha de poco más de un metro de altura sobre la banca, que dada su composición, rara vez se inunda, es decir puede tener un intervalo de recurrencia de inundaciones de alrededor de 7 a 10 años, es decir, coincidentes con fenómenos de La Niña. En la temporada 2010 y de acuerdo a los vecinos, se inundó tal vez tres veces, una de ellas coincidente con la avenida torrencial que produjo los daños en las bocatomas.

Por su condición de inundable no se recomienda acercar la tubería de conducción a esta unidad, y en caso necesario se debe realzar al menos 1 metro mediante viaductos, para evitar daños durante las crecientes ya citadas. Debido a su baja cohesión, si es necesario fundar pilotes en esta unidad, se hace necesario profundizar lo suficiente para que ellos no sean deteriorados por las crecientes descritas.

1. **GEOMORFOLOGÍA Y PROCESOS MORFODINÁMICOS**

La zona de influencia del acueducto de la vereda San Francisco se compone de cuatro unidades geomorfológicas, dos de origen denudativo (erosivo), que corresponden a Vertientes montañosas suaves (Mds) y a Colinas bajas subredondeadas (Cbr) y dos de origen coluvio-aluvial, definidas por planicies en depósitos de vertiente (Pdv) y llanuras aluviales (Lla), como se muestra en la Figura 3.

**4.1 Vertientes Montañosas suaves (Mds)**

Se localizan en la parte alta y media de la microcuenca, se trata de montañas bajas de filos estrechos y vertientes rectas y cortas, de pendientes moderadas a fuertes, hasta de 40º, que rematan hacia los valles con pendientes más altas que bordean depósitos de vertiente (Figura 4 a) y pequeñas planicies aluvio-coluviales (Figura 4 b). Se componen de esquistos y anfibolitas.



**Figura 3.** Mapa geomorfológico y de procesos morfodinámicos.

**4.2 Colinas bajas subredondeadas (Cbr)**

Se encuentran hacia el oriente de las bocatomas y se extienden por toda la parte media y baja de la cuenca, hasta su desembocadura en el río Chico. Son colinas bajas, de menos de 150 m de altura, ligeramente orientadas en dirección noroeste, de topes redondeados y vertientes cortas, de menos de 300 m, rectas a cóncavas, de pendientes suaves y rara vez mayores de 30º. Los valles son en forma de V abierta, con fondos planos ocupados por llenos de depósitos de vertientes o coluvio-aluviales; en las anfibolitas, las colinas forman valles estrechos con vertientes de inclinación fuerte como en el caso de aguas abajo de las bocatomas. Este paisaje se forma en las anfibolitas o en las tonalitas del Batolito Antioqueño.

**4.3 Planicies en Depósitos de Vertiente (Pdv)**

La parte inferior de la quebrada ocupa una superficie relativamente baja, rodeada de colinas y que se formó durante el levantamiento de la Cordillera Central hace varios millones de años, luego de los cuales se formaron algunos depósitos de vertiente, producto de movimientos en masa y deslizamientos que fueron producto de climas mucho más húmedos que las últimas decenas de miles de años en La Tierra.

Los depósitos de vertiente forman superficies regulares, casi planas, de menos de 8º de inclinación, generalmente están cortadas por cañadas de más de 2 m de profundidad, lo que se conoce como incisión moderada, generalmente forman zonas pantanosas que requieren drenajes artificiales para su aprovechamiento agropecuario.



**b**

**a**

**Figura 4.** Vertientes montañosas que rodean a) depósitos de vertiente; b) llanura aluvial.

**4.4 Llanura aluvial**

Los depósitos aluviales muestran en los valles estrechos pequeñas terrazas torrenciales, producto de deslizamientos de tamaño moderado que ocasionalmente bloquean el cauce para luego reventar el dique así formado y producir el flujo asociado, algo similar a esto fue lo que ocurrió en la quebrada San Francisco en la temporada invernal 2010-2011, con la diferencia de que no hubo movimientos en masa pequeños, sino socavación de las márgenes y el fondo del cauce. El resto de la zona plana se caracteriza por presentar una terraza reciente, estrecha, de menos de 50 m de ancho y una altura con respecto al cauce de aproximadamente 1. 2 m, rara vez inundable. En ambos casos, los depósitos presentan pendiente hacia las vertientes vecinas, lo que indica una edad avanzada de los mismos, del orden de decenas de miles de años para ellos.

**4.5 Cauce de la quebrada**

El cauce en cercanías de la bocatoma es un típico cauce de montaña que tiene un fondo compuesto casi en su totalidad por bloques de roca rodados por gravedad desde las vertientes que hacen las veces de estructuras de disipación y se alternan con pequeños charcos de menos de 1 m de extensión. Debido al espesor importante de los suelos que conforman las vertientes laterales, que en todos los casos es mayor de 5 m, constituyen un elemento blando fácilmente socavable ante la ocurrencia de una creciente mayor, del tipo de intervalo de recurrencia del orden de 50 o más años como la ocurrida en la temporada invernal de 2010, y son erosionadas de manera natural durante esos caudales pico para disminuir la velocidad del fluido. Las dos vertientes del tramo crítico para la tubería de conducción que es el comprendido entre las bocatomas y la vía vehicular de acceso, tienen tramos potencialmente inestables; de manera que no se puede pensar en una “solución definitiva” escogiendo una u otra margen para la conducción. Los pequeños movimientos en masa de las márgenes se seguirán presentando cada que haya episodios de lluvia similares a los de 2010, y aunque la margen derecha presenta en general menor pendiente que la izquierda, tiene de todas maneras sectores potencialmente inestables que en un futuro pueden generar problemas de inestabilidad.

**5. MORFODINÁMICA**

Para efectos de este trabajo y por las características propias de la zona, se considera la morfodinámica como los fenómenos naturales que han ocurrido en épocas relativamente recientes, de sólo decenas de años. Ya se había expresado en el numeral de geología que los suelos de todas las unidades revelan un paisaje relativamente antiguo en el cual no se manifiestan cicatrices de fenómenos naturales de magnitud. Al nivel de los cauces y su entorno inmediato, sí se desarrollan fenómenos morfodinámicos, tales como cicatrices o coronas de movimientos en masa, socavación de cauces y avenidas torrenciales, aparentemente asociados todos con el período invernal 2010 – 2011, los cuales tienen una característica en común, su tamaño reducido y su bajo período de recurrencia.

**5.1 Movimientos en masa**

Los fenómenos de este tipo son de tamaño reducido, el más pequeño está representado por la caída de un árbol en la zona boscosa aledaña a la bocatoma de la quebrada Montenegro, el cual produjo un desgarre del suelo de tal vez 3x3 metros, que cada que se presenta un evento de lluvia, se enturbia el agua que inmediatamente llega a la bocatoma. El procedimiento a seguir es aserrar el árbol para su aprovechamiento como madera y retirar el material sobrante, incluido el sistema de raíces.

Otro síntoma de inestabilidad encuentra unos 200 m abajo de la bocatoma, sobre la margen derecha de la quebrada, donde se aprecia una grieta semicircular (figura 5 a), que define una corona de deslizamiento de unos 10 m x 10 m, con tal vez 1.5 m de espesor, lo que resulta en un volumen aproximado de 150 metros cúbicos, los cuales si caen a la quebrada durante una creciente importante, pueden formar una avenida torrencial más pequeña que la de 2010. El procedimiento a seguir es la “costura” de la superficie de falla, lo que se logra mediante el vaciado sobre la grieta de lechada de cal cálcica (cal comercial que tenga más de 90% de CaCO3), en lechada espesa a razón de 1 balde por metro de longitud de la grieta y posteriormente se llena de suelo y se apisona, de tal manera que se pueda apreciar días después si se ha abierto, lo que indica que ha seguido el movimiento y en este caso se repite el tratamiento.

**5.2 Socavación de cauces**

Con la creciente y avenida torrencial de 2010, la quebrada socavó lateralmente varios puntos de su cauce, todos ellos aguas abajo de las bocatomas y de menos de 2 m de longitud, por varios de altura, dependiendo de la margen en el sitio; la excepción de ellos se encuentra inmediatamente aguas arriba del puente sobre la quebrada (Figura 5 b). En este lugar y debido al efecto de embudo producido por la obstrucción parcial con palos de la sección del mismo, la corriente socavó la margen por cerca de 4 m, lo que permitió en arrastre de unos 4 m³ de gravas, arenas y limos por la corriente.

Otro tipo de socavación que se presenta es la del fondo del cauce, que se pudo observar inmediatamente debajo de las bocatomas, por falta de estructuras de disipación, las cuales se deben diseñar de manera que requieran mínimo mantenimiento.

Debido a que la tubería de conducción presenta largos tramos casi tangenciales a la margen de la quebrada, es necesario alejarla para prevenir daños en el futuro cercano. Es necesario insistir a los propietarios de los predios que por ley, los primeros 30 m a partir del cauce no son propiedad privada y en consecuencia, no se trata de prestar una servidumbre sino de respetar el retiro de la quebrada. En consecuencia con lo anterior, es necesario que la autoridad municipal en conjunto con la autoridad ambiental lleve a cabo el Plan Integral de Ordenamiento de la Microcuenca exigido por la ley para facilitar la intervención de las márgenes mediante herramientas jurídicas.

****

**Figura 5**. a) Grieta que define Corona de deslizamiento. Socavación en margen de la quebrada.

**5.3 Avenidas torrenciales**

Bajo condiciones muy especiales de lluvia, en 2010, en la quebrada San Francisco se originó una avenida torrencial pequeña, que no dejó mayores cicatrices sobre el terreno y únicamente formó un depósito torrencial de tamaño reducido, que es el que se observa en la figura 4b. La sección máxima medida de la creciente pico para esta avenida torrencial fue del orden de 15 m², medida unos 50 m aguas arriba de la intersección con la vía, en el sitio que se muestra en la figura ya citada. Aguas abajo en la quebrada principal, no hay evidencias de depósitos torrenciales, lo que confirma el tamaño reducido y la baja periodicidad de estos fenómenos. En síntesis, la quebrada es torrencial, con intervalos de recurrencia de centenares de años y caudales moderados.

**6. AMENAZAS GEOLÓGICAS**

A lo largo del trabajo se ha mostrado que en la cuenca de la quebrada San Francisco los eventos naturales que se han presentado en los últimos miles de años han sido de tamaño reducido, al punto que no han dejado un registro geológico que se pueda apreciar en el campo. El análisis de la morfodinámica tanto en el campo como en las aerofotografías no muestra huellas de fenómenos naturales de importancia, con excepción de flujos de tierra que se formaron en épocas tan lejanas como del orden de un millón o centenares de miles de años, lo que no tiene importancia para la gestión del riesgo en la cuenca.

Para evaluar las amenazas geológicas que podrían afectar la bocatoma es necesario partir de la definición internacional del término AMENAZA, que según Naciones Unidas (1992), es “un evento amenazante, o probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino dentro de un área y período de tiempo dado”.

Bajo la consideración anterior es necesario establecer niveles de amenaza con calificativos de Alto, Medio y Bajo, de acuerdo con criterios que en general siguen recomendaciones internacionales, por ejemplo, Naciones Unidas, sugiere para las inundaciones en áreas urbanas una escala de amenaza con los siguientes criterios de intervalo de recurrencia del evento.

Alta. Hasta 100 años.

Media. Hasta 500 años.

Baja > de 500 años.

Para el caso de este estudio, el Fondo Adaptación (2013), establece en sus lineamientos la siguiente escala, de acuerdo con el intervalo de recurrencia.

**Alta.** De 0 a 10 años

**Media**. De 10 a 100 años

**Baja.** > De 100 años.

La anterior escala puede ser válida para zonas rurales o acueductos como en este caso, que deben estar expuestos a daños por crecientes relativamente frecuentes y en áreas que no tengan viviendas cercanas a los cauces, tal como sucede hasta ahora en la quebrada San Francisco.

El fenómeno de La Niña 2010, produjo por primer vez en muchos años (decenas de miles de años), afectación en esta cuenca, de manera similar a eventos de lluvia ocurridos en otras partes del mundo que se atribuyen al cambio climático, aunque de acuerdo con el criterio geológico, son estos fenómenos los que han modelado el paisaje desde hace millones de años. Se considera que fenómenos de baja recurrencia como éste deben ser tenidos en cuenta para efectos de la planeación en el uso del suelo, lo que se conoce como ordenamiento territorial.

El municipio de San Pedro es una localidad atípica del territorio colombiano, pues no se encuentra en las bases de datos disponibles referencia a ningún desastre natural reportado en él; esto no quiere decir que no hayan ocurrido eventos, sino que seguramente sus magnitudes han sido bajas y sus consecuencias leves, por lo tanto no hay reportes de ellos.

Para el caso de un sistema de acueducto como en este caso, al menos la bocatoma y las primeras decenas de metros siempre estarán en zona de amenaza alta, gracias a que necesariamente se encuentran en zonas fácilmente inundables, por lo tanto el criterio no es externo a la estructura sino inherente a ella, es decir, ésta debe ser construida bajo un diseño compatible con la exigencia (solicitación o fuerza del fenómeno), generada con caudales pico de esos intervalos de recurrencia. Las velocidades pico de flujos de escombros y lodo semejantes a los de 2010, pueden ser del orden de 3m/seg, con densidades del fluido de 1.4 a 1.6 g/cm³.

De acuerdo con este estudio, la cuenca de la quebrada San Francisco puede estar sujeta a movimientos en masa, avenidas torrenciales y sismos.

* 1. **Amenaza por movimientos en masa**

En el numeral de morfodinámica se estableció que las cicatrices por movimientos en masa en la cuenca prácticamente no existen, a pesar del uso intensivo en ganadería y agricultura que ella tiene, lo que indica un intervalo de recurrencia muy bajo y en consecuencia **la amenaza por movimientos en masa es baja.**

* 1. **Amenaza por avenidas torrenciales**

Si se tiene en cuenta que no puede haber avenidas torrenciales sin movimientos en masa que aporten los sólidos, la cuenca de la quebrada San Francisco debe tener una amenaza similar a ellos, lo que implica que su **amenaza por avenidas torrenciales es baja.**

* 1. **Amenaza sísmica**

La Amenaza sísmica está definida para el territorio nacional como una Ley, que se modifica cuando la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica –AIS- y los integrantes del Comité Nacional de Amenaza Sísmica, que representan a entes investigadores y Universidades, lo consideren pertinente. De acuerdo con el avance del conocimiento del territorio nacional en esta temática, en el Estudio General de la Amenaza Sísmica de Colombia, el municipio de San Pedro de los Milagros se encuentra en la zona **Amenaza Intermedia**, con valores de Aa=0,15g y Av=0,20g, los cuales deben ser de estricto cumplimiento para cualquier obra que se lleve a cabo en el Municipio.

1. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La creciente que afectó las bocatomas de las quebradas San Francisco y Montenegro en 2010 es un fenómeno que se puede presentar en la zona con recurrencia menor a 100 años y muy probablemente menor a 500, lo que se puede calificar como de Amenaza Baja.

Los daños causados tienen más relación con el bajo perfil de ingeniería del sistema que con la creciente que los afectó, por ejemplo las aletas laterales de las bocatomas no tienen inclinación para centrar la corriente en crecientes importantes y por eso socavan las márgenes, al igual que no tienen disipadores inmediatamente debajo de la estructura de bocatoma por lo que socavan el lecho que es susceptible de lavado.

Existen unas pocas zonas inestables que muestran coronas de deslizamientos que se deben tratar a corto plazo con lechada de cal para coser sus suelos. Esta labor debe ser rutinaria para el fontanero en el futuro, con el fin de minimizar efectos sobre bocatomas y el sistema en general.

De acuerdo con lo observado en campo, no hay mayores ventajas en cambiar la conducción a la margen derecha de la quebrada, pues los procesos erosivos son marcadamente similares en ambas márgenes.

**REFERENCIAS**

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA -AIS-, 2009. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, Bogotá, 206 p.

CORANTIOQUIA, 2007. Plan de Ordenamiento territorial de la cuenca de la quebrada La García, Medellín, 467 p.

DEARMAN. W.R., 199. Rock and soil description and Classification for engineering geological mapping. In Eng. Geol. Mapping, Butterworth- Heinemann, Oxford, pp. 24-45.

FONDO ADAPTACIÓN, 2013. Alcance técnico general de la gestión de riesgo para intervenciones del Fondo Adaptación directas o descentralizadas. Memorando Interno, Bogotá, 9 p.

HUPP, CLIFF. 1988. Plant ecological aspects on flood Geomorphology and paleoflood history. In Flood Geomorphology. John Wyley & sons, New York, pp. 335-356.

KOCHEL, CRAIG; BAKER, VICTOR. 1988. Paleoflood analysis using slackwater deposits. In Flood Geomorphology. John Wyley & sons, New York, pp. 357-376.

INGEOMINAS, 1983. Geología de la Plancha 130, Santa Fe de Antioquia. Escala 1:100.000

INGEOMINAS, 1984. Geología y geoquímica de las planchas 130, santa Fe de Antioquia y 146 Medellín Occidental, Ingeominas, Medellín, 397 p.

INGEOMINAS, 1995. Evaluación de la amenaza por torrencialidad, caso del oriente antioqueño. Desarrollo de una metodología. INGEOMINAS. Memorias VII Congreso Colombiano de Geología, Bogotá.

NACIONES UNIDAS, 1992. Glosario multilingüe de términos convenidos internacionalmente relativos a la Gestión de Desastres. Ginebra, 83 p.

PARRA, EDUARDO, 2009. Determinación de edades de Movimientos en Masa para evaluación de la amenaza en Morro Pelón. U. de Medellín – Municipio de Medellín, Plan de Ordenamiento de Morro Pelón, 14 p.