IAHR AIPH

XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE 2004

RELACIÓN LLUVIA–AGUAS SUBTERRÁNEAS CON DESLIZAMIENTOS EN FREDONIA, ANTIOQUIA, COLOMBIA.

Juan Fernando Berrío T., José Humberto Caballero A., Manuel Esteban Díaz M., Maria Victoria Vélez O.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín. jfberriot@unalmed.edu.co, jhcaball@unalmed.edu.co, mediazm@unalmed.edu.co, mvvelez@unalmed.edu.co.

RESUMEN: En este artículo se presenta un modelo hidrogeológico de la circulación de las aguas subterráneas desencadenantes de movimientos en masa en el Cerro Combia, aledaño al municipio de Fredonia (Antioquia), basado en un modelo geológico conceptual. Se presenta además la relación temporal entre las lluvias y los caudales evacuados por las galerías de drenaje construidas en el área para aliviar las presiones de poros al interior del Cerro y se evalúa su efectividad.

ABSTRACT: This article presents an hydro-geological model of groundwater circulation that causes mass movements in Cerro Combia, beside Fredonia (Antioquia), based on a conceptual geological model. It is also presented the temporary relationship between rain and water flow evacuated by the drainage galleries, constructed to relieve pore pressures at the interior of Cerro Combia, and their effectiveness is evaluated.

PALABRAS CLAVE: Hidrogeología, deslizamientos, Fredonia.

INTRODUCCIÓN

La zona urbana del Municipio de Fredonia es altamente vulnerable a grandes movimientos en masa (deslizamientos) principalmente por la conjunción de factores geológicos y climáticos. Se han sufrido lamentables tragedias entre las cuales se pueden mencionar las ocurridas en: Diciembre 09 de 1941, Octubre 18 de 1943, Octubre 5 de 1948, Agosto 23 de 1955, Octubre 20 de 1956, Noviembre de 1971, Octubre 3 de 1988, Julio 22 de 1995.

En varios estudios hechos con el ánimo de mitigar la amenaza por deslizamientos desde el Cerro Combia, se detectó que un factor determinante en la ocurrencia de dichos eventos es la existencia de aguas subterráneas que circulan en volúmenes considerables al interior del cerro. La mayoría de los movimientos en masa en la zona ocurren después de lluvias fuertes o durante períodos lluviosos prolongados, haciendo que el control de las aguas subterráneas sea uno de los mecanismos mas utilizados para prevenir este tipo de fenómeno.

Por lo tanto, el principal resultado de los estudios hasta ahora ejecutados, consiste en la excavación de varias galerías de drenaje en la ladera del cerro a lo largo de todo el pueblo, con el fin de abatir los niveles freáticos para tratar de que el agua no sature el terreno generando deslizamientos.

El presente trabajo pretende establecer la relación directa entre la lluvia y la dinámica de las aguas subterráneas y demás factores hidrológicos que producen el desencadenamiento de movimientos en masa en el cerro Combia debida a su condición estructural, teniendo en cuenta conjuntamente factores geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos.

GENERALIDADES

El municipio de Fredonia, departamento de Antioquia, se localiza en las estribaciones de la Cordillera Central, al suroeste del departamento, entre los 5°54' de latitud norte y 75°38' de longitud oeste. Ocupa un área aproximada de 247 km^2 y presenta alturas variables entre 600 y 2500 msnm, con una temperatura promedio anual de 20.7 °C.

La zona de estudio comprende el casco urbano del municipio de Fredonia y sus alrededores. Tiene un área aproximada de 30 Km^2 y se encuentra enmarcada dentro de la plancha 166-II-C-1 del año 1987, escala 1:10.000, de la Secretaría de Hacienda, División de Catastro del departamento de Antioquia, mostrada en la figura 1. La topografía de la zona de estudio se muestra en la figura 2.

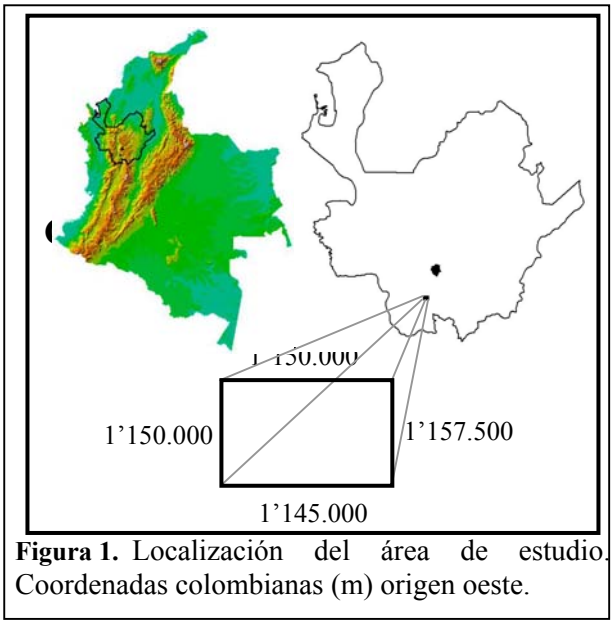

Figura 1. Localización del área de estudio. Coordenadas colombianas (m) origen oeste.

El municipio de Fredonia presenta un clima típico ecuatorial con lluvias abundantes. La precipitación anual promedio es de 2300 mm, y obedece a una distribución temporal bimodal con dos periodos lluviosos, un periodo seco y uno de transición. El primer lapso lluvioso se inicia en el mes de abril y termina en el mes de junio, siendo mas intensa la precipitación en mayo. El segundo periodo lluvioso se extiende desde el mes de septiembre hasta el mes de noviembre con una pluviosidad máxima en octubre.

GEOLOGÍA LOCAL

En el área de estudio, en orden cronológico, se diferencian las siguientes unidades geológicas:

- Metasedimentitas de Sinifaná.
- Formación Amagá.
- Pórfidos andesíticos.
- Formación Combia.
- Depósitos recientes (depósitos de vertiente asociados al Cerro Combia y al Cerro Bravo).

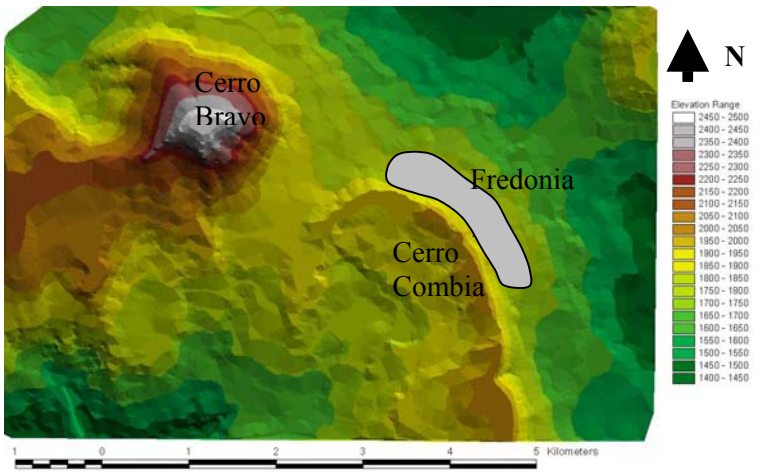

Figura 2. Modelo digital de elevación de la zona de estudio.

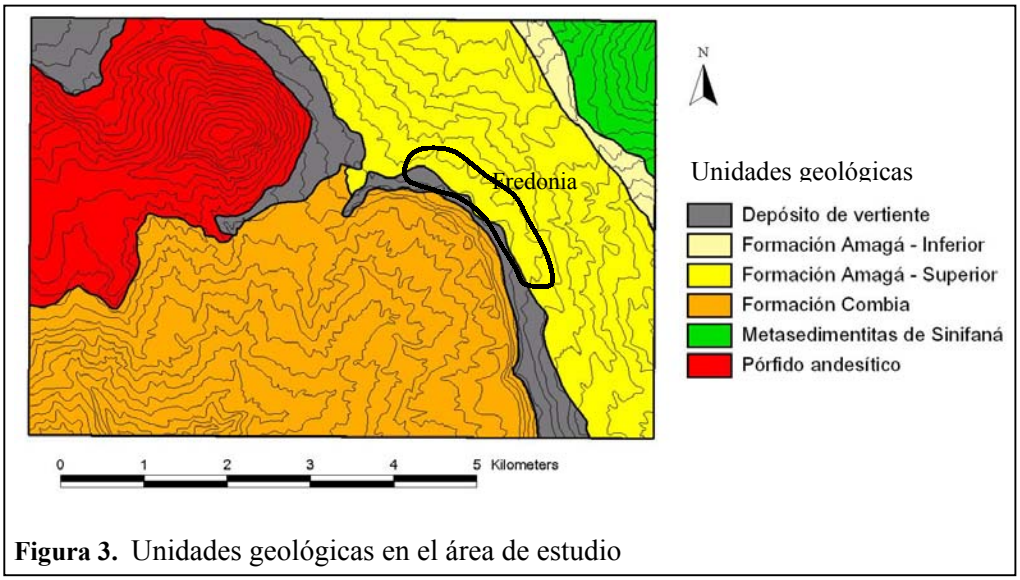

Figura 3. Unidades geológicas en el área de estudio

La distribución areal de estas unidades se indica en la figura 3. Para los análisis de este estudio, las unidades más importantes son la Formación Combia y los depósitos recientes, por lo en este texto no se amplía la descripción de las demás formaciones.

FORMACIÓN COMBIA

Fue denominada así por Grosse en 1926, con base al Cerro Combia, donde definió la secuencia típica. Esta unidad se compone de estratos volcano-sedimentarios de edad Mioceno superior - Plioceno. (Mejía, 1985)

La Formación Combia en la zona de estudio corresponde al escarpe del Cerro Combia, el cual presenta pendientes mayores a 70° y en ciertas partes se presenta casi vertical; y se extiende hacia las zonas sur y occidental del área de estudio. Gran parte de la Formación se encuentra altamente fracturada, lo que disminuye la estabilidad que le da su inclinación en sentido contrario a la pendiente.

La Formación Combia en el área de estudio no presenta horizontes guía que permitan un seguimiento y reconocimiento de los diferentes estratos. Al contrario, se observa una gran discontinuidad lateral en la secuencia y los contactos entre capas no son planos, sino que presentan muchas ondulaciones que complican aún más su estudio. Sin embargo, para facilitar dicho estudio, se puede considerar la secuencia como el conjunto de tres bloques estratigráficos con materiales de características similares, que informalmente se han llamado bloques superior, medio e inferior, (Sanear Ltda, 1989) los cuales se estudian a continuación.

La orientación de los planos de estratificación medidos en las columnas (tomada por sus respectivos autores) es la siguiente: en La Pianola, N80°E / 45°S; en el camino empedrado, N35°W / 25°W; en la Quebrada La Lechería, N15°W / 15°W.

Bloque inferior de la Formación Combia: Se compone de una serie de conglomerados cuyo máximo espesor observado alcanza los 30 m, conformados por cantos andesíticos muy redondeados de hasta 20 cm de diámetro. En algunos puntos se presentan lentes de arenisca y arenisca conglomerática con espesores menores de 1 m.

Bloque Medio de la Formación Combia: Se compone de una secuencia de areniscas tobáceas con espesores de alrededor de 20 m, intercaladas con aglomerados de espesor menor a 6 m y algunos estratos de arcillolitas, intruídos por diques basálticos. Este bloque presenta una condición de fracturamiento bastante intensa, evidenciada por la presencia de numerosas familias de diaclasas y fracturas, los cuales fueron cartografiados al interior de las galerías dentro de la Formación. Se pudo establecer a partir de recorridos de campo que las galerías localizadas en este bloque son las que mayores caudales aportan al drenaje del cerro.

Bloque superior de la Formación Combia: Este bloque está representado en la columna estratigráfica de La Pianola por 30 m de aglomerados y areniscas aglomeráticas, en la columna del camino empedrado a Cerro Combia por una capa de 130 m de tobas y en la columna de La Lechería por una secuencia de aproximadamente 60 m de espesor, constituida por aglomerados, brechas volcánicas semiconcordantes con la estratificación y capas delgadas de tobas color ocre.

DEPÓSITOS RECIENTES

Corresponden a depósitos de vertiente al pie de los escarpes de Cerro Combia y Cerro Bravo, constituidos por cantos y bloques de rocas de diferentes tamaños y formas angulares y subangulares en una matriz compuesta de arenas, limos y arcillas completamente mezclados.
La parte superior de estos depósitos corresponde a materiales finogranulares (arenas, limos, arcillas) con bloques y fragmentos de roca angulares en menor proporción. En la parte inferior se incrementa el porcentaje de bloques (Sanear Ltda, 1989).

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio se encuentra influenciada por el sistema de fallas Cauca-Romeral, situación que se evidencia por algunos rasgos morfológicos, así como por el alto grado de fracturamiento en las rocas.
En la zona de estudio la estructura geológica más importante es el sinclinal del Cerro Combia, cuyo eje tiene un rumbo N10E, y pasa por el hospital municipal al norte del pueblo. La existencia de este sinclinal fue verificada en campo y mediante fotografías aéreas, y se indica en la figura 4. Como se puede observar en esta figura, este sinclinal conforma la parte crítica de la zona de estudio, ya que en su interior circula el agua subterránea objeto de este estudio. Por lo tanto, las características estructurales del sinclinal son las mismas que dominan el flujo del agua subterránea dentro del Cerro Combia en los alrededores de Fredonia.

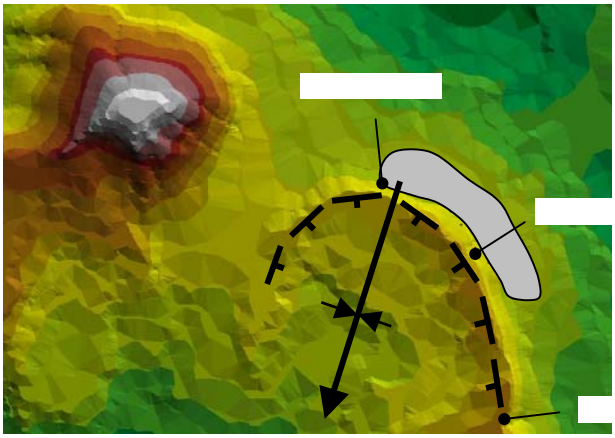

Figura 4. Sinclinal del Cerro Combia.

CONDICIÓN DE FRACTURAMIENTO DEL MACIZO ROCOSO

La Formación Combia presenta en general una condición de fracturamiento bastante intensa, lo cual fue observado al interior de las galerías de drenaje. Dicha condición rige el flujo del agua subterránea. Por lo tanto las direcciones de estas estructuras son esenciales para poder definir cuál es el sentido del flujo de dicho flujo.
A partir de las observaciones dentro de las galerías de drenaje se pudo establecer que el bloque intermedio de la Formación Combia, conformado por intercalaciones de areniscas y arcillolitas, presenta el mayor grado de fracturación, constituyéndose como la zona donde se da la mayor circulación y drenaje de aguas subterráneas en el Cerro Combia. En el bloque inferior no se observaron diaclasas y las fracturas son muy escasas, lo cual seguramente se relaciona con las propiedades mecánicas del material que lo compone, ya que se trata de un conglomerado clastosoportado con partículas de tamaño muy homogéneo que varían localmente de 5 a 15 cm de diámetro cementadas en una matriz areno-limosa muy compacta, lo cual lo hace muy resistente mecánicamente.

ESTADÍSTICOS ESTRUCTURALES

Al interior de las galerías de drenaje se realizó una cartografía de las principales familias de discontinuidades consideradas de importancia a la hora de evaluar la condición de fracturamiento del macizo rocoso.

Para tal efecto se empleo la metodología descrita por Chica en 1984 (Análisis de estructuras geológicas) en la cual se formulan los parámetros hidroestructurales para cada discontinuidad estructural:

- **Rumbo y Buzamiento** de la discontinuidad estructural
- **Densidad de Fracturamiento** de cada familia de discontinuidades.
- **Continuidad.** Longitud de la discontinuidad.
- **Abertura.** Espesor (en milímetros) de la abertura promedio de la discontinuidad.
- **Rugosidad relativa.** Asignada a juicio del investigador. Fluctúa entre 0 y 1.
- **Composición y granulometría** de la roca que contiene las discontinuidades.

Fueron medidos en campo un total de 72 discontinuidades o familias de ellas siguiendo los conceptos anteriormente descritos. En la figura 5, se muestran los diagramas polares y las rosetas de rumbos de dichas estructuras, analizadas de manera estándar; y más adelante se estudiarán asignándole a cada familia el peso estadístico que le corresponde según su conductividad hidráulica.

Como se puede observar en el diagrama polar de la figura 5, la mayoría de las estructuras son casi verticales.

El patrón de fracturamiento se puede asimilar al patrón que se formaría al tratar forzadamente de dar una forma cóncava a un cuerpo rígido tabular: se generan fracturas radiales y anulares. Ver figura 6.

La roseta de rumbos concuerda con las tensiones radiales, y perpendiculares a ellos los anulares, necesarios para formar el sinclinal de Cerro Combia, tomando en cuenta la zona donde fueron recolectados los datos, como se observa en la figura 7.

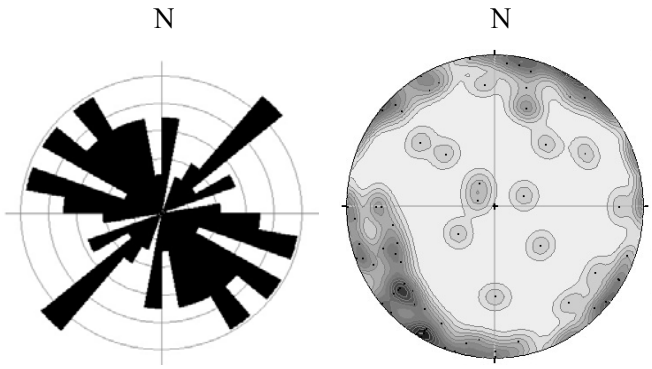

Figura 5. Roseta de rumbos y diagrama polar de las familias de diaclasas y estructuras predominantes cartografiadas al interior de las galerías de drenaje del Cerro Combia.

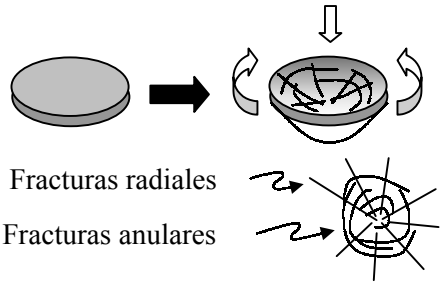

Figura 6. Patrón de fracturamiento generado al ejercer un esfuerzo cóncavo sobre un cuerpo rígido tabular.

GALERÍAS DE DRENAJE

Como medida de prevención ante los deslizamientos en el Cerro Combia, la administración municipal de Fredonia ha construido varias galerías de drenaje en la parte baja del cerro. Éstas tienen un metro y medio de altura y un metro de ancho en promedio, profundidades entre 20 y 40 m y bifurcaciones en "Y" en sus extremos.

Dichas galerías han sido construidas aproximadamente desde 1995, y se ha llevado por parte de la alcaldía un registro diario de el caudal evacuado en ellas, simultáneamente con un registro diario de precipitación tomada en un pluviómetro ubicado en su sede.

Por ser construidas en un medio particularmente húmedo en algunas zonas específicas, algunas galerías tienen fuerte

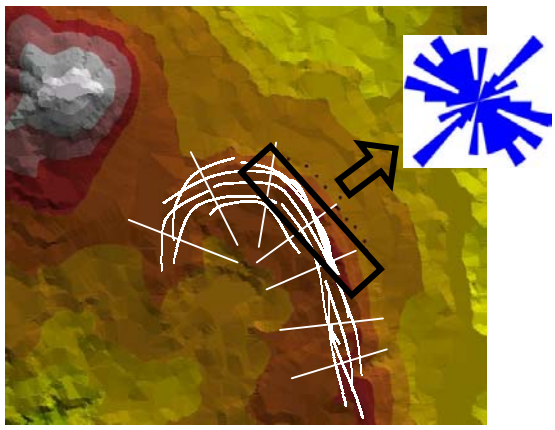

Figura 7. Detalle de la zona de estudio, con la interpretación del patrón estructural en Cerro Combia. La zona de recolección de datos aparece demarcada por un rectángulo. Las líneas blancas solamente ilustran un patrón de fracturamiento, no indican fracturas reales en el terreno sino una interpretación estadística.

tendencia a derrumbarse en techos y paredes. Por este motivo, muchas veces en los aforos de las galerías se encuentran vacíos de semanas o meses, o incluso algunas galerías han sido cerradas definitivamente, cancelando el registro diario.
La posición geográfica relativa de las galerías se muestra en la figura 8.

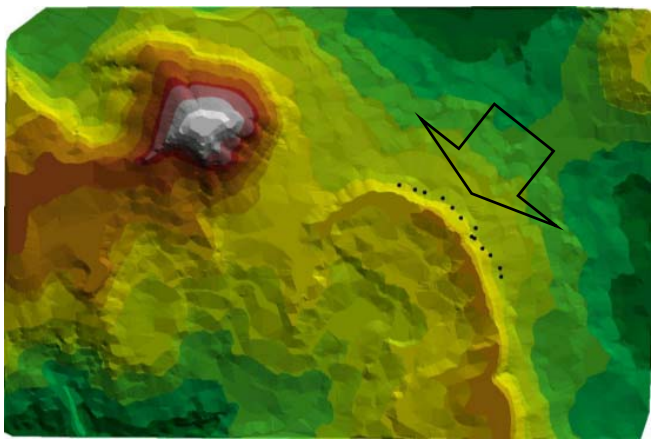

Figura 8. Posición geográfica relativa de las galerías de drenaje.

AFOROS DE LAS GALERÍAS

Los datos disponibles del registro diario de aforos y de precipitación fue facilitado a los autores de este estudio por la alcaldía municipal. Estos datos pueden ser usados para calcular la velocidad de circulación del agua que se infiltra tras cualquier lluvia, comparando los datos de precipitación y los de caudales evacuados por las galerías.
Una vez recopilados los datos, se buscó comparar 2 periodos de 6 meses de duración para cada punto de medida: un periodo lluvioso y uno seco, considerando la entereza de los datos. Bajo estos parámetros, se seleccionó como periodo lluvioso, los 6 primeros meses del año 2000, y como periodo seco, los 6 primeros meses del año 2001.
Las figuras 9 y 10 representan la comparación entre las series diarias de caudales evacuados y precipitación para una galería, la galería La Pianola, que representa bien el fenómeno que ocurre en el resto de las galerías.

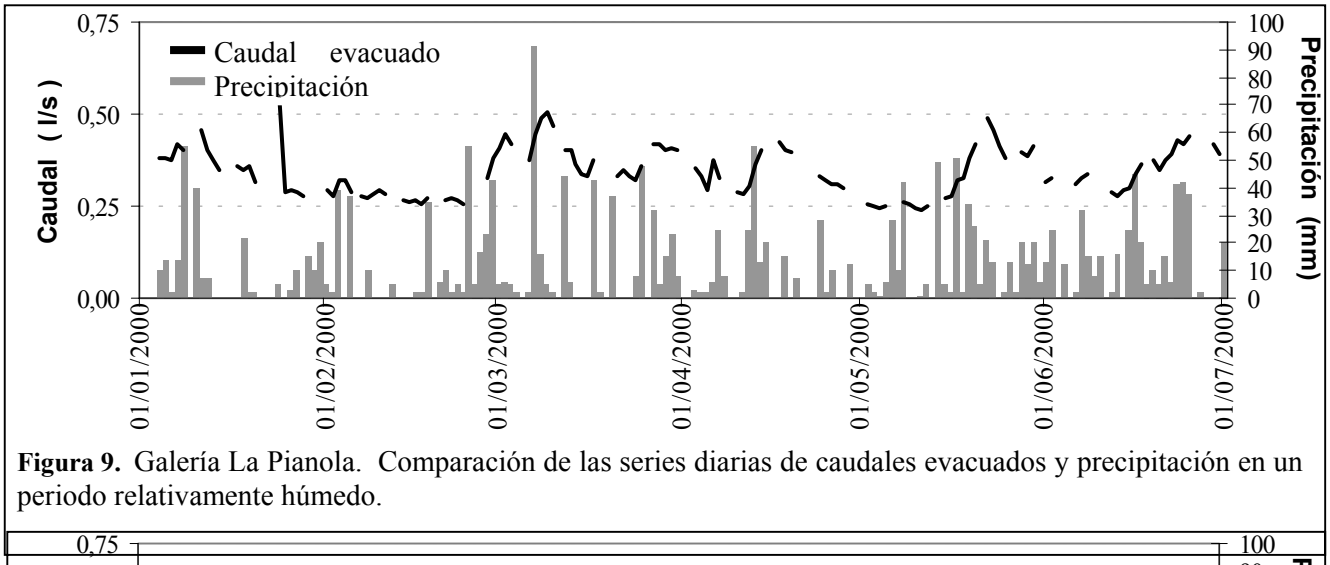

Figura 9. Galería La Pianola. Comparación de las series diarias de caudales evacuados y precipitación en un periodo relativamente húmedo.

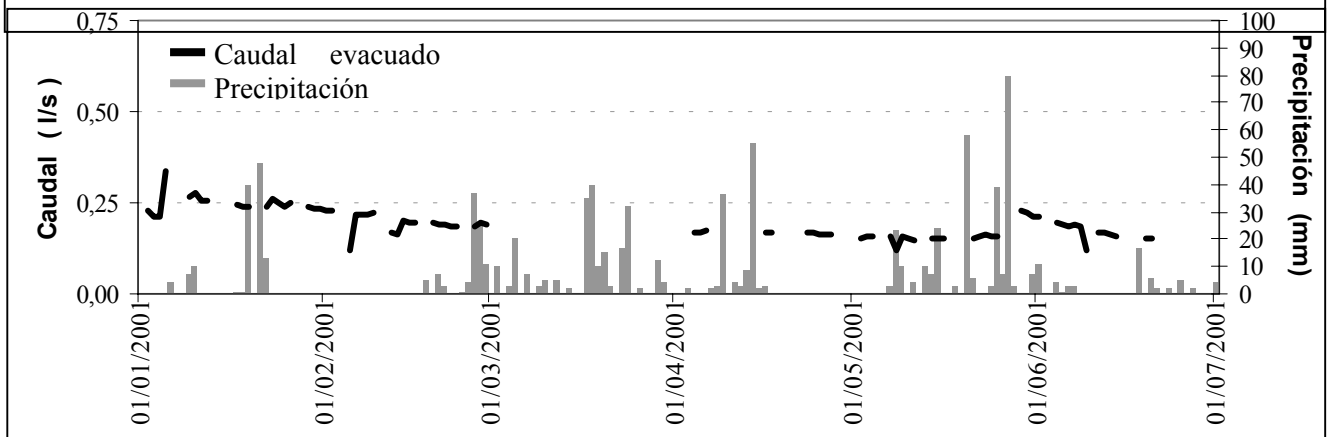

Figura 10. Galería La Pianola. Comparación de las series diarias de caudales evacuados y precipitación en un periodo relativamente seco.

En los fines de semana los datos no son recolectados, por lo que las líneas aparecen "punteadas", con vacíos que corresponden precisamente a estas fechas. Es clara la diferencia de caudales evacuados para cada galería en el periodo lluvioso y el periodo seco, mostrándose en el periodo seco curvas muy estables, mientras que en el periodo lluvioso son muy variables. Hay dos observaciones muy importantes que resultan del análisis de las curvas de caudales evacuados:

- Nunca, ninguna galería, cesa la captación de agua; es decir, la evacuación de agua es continua incluso en periodos secos. En el caso de los derrumbes al interior de las galerías no hay caudal evacuado, ya que al interior de las galerías el material acumulado obstaculiza el paso del agua, mostrando caudales aparentes de cero. Esta observación indica que el agua que se evacua por las galerías no proviene solamente de laescorrentía subsuperficial directa en el cerro, sino que hay una zona de recarga aportando agua continuamente al cerro. De las curvas de caudal evacuado en tiempo seco (los primeros seis meses del año 2001) se calculó el "caudal base" para cada galería, similarmente a como se haría con cualquier drenaje superficial, ya que como se ha dicho, la evacuación de agua es incesante, incluso en verano. Los resultados se muestran en la tabla 1.
- El tiempo de respuesta entre un evento de lluvia y su correspondiente evacuación por las galerías es de un día, o en algunos casos 2 o 3. Lastimosamente los datos de precipitación y caudales no tienen la resolución suficiente para obtener este parámetro en horas.

Nombre	Caudal base (l/s)
Galería La Pianola	0,15
Galería 4	0,10
Galería 6	0,10
Galería 8	0,10
Galería La Chiquitica	0,05
Galería 10	0,30
Galería El Tanque	0,05
Galería 11	0,05
Galería 12	0,03
Galería 13	0,05
Galería 14	0,08
Galería 15	0,25
Perforación Mi Casita #3	0,30
Perforación Efe Gómez	0,05
Perforación San Francisco	0,15

Tabla 1. "Caudales base" de las corrientes evacuadas por las galerías de drenaje.

CIRCULACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Según fue observado en campo al interior de todas las galerías de drenaje, en el Cerro Combia el agua no circula por estratos permeables, sino por sistemas de diaclasas, fracturas y fisuras; es decir, la permeabilidad primaria del macizo es muy baja y hasta nula en algunas zonas, mientras su permeabilidad secundaria es alta. Los caudales pueden variar desde un simple goteo hasta casi medio litro por segundo en algunas fracturas específicas. El espaciamiento de estos focos de humedad es variable (entre 1 y 20 m aproximadamente). En la mayoría de las ocasiones no es una fractura aislada la que evacua el agua, sino que se encuentra agua en una principal y sus adyacentes, en un diámetro de 50 cm en promedio, a manera de pequeños enrejados. Sin embargo hay variaciones muy importantes en la conductividad hidráulica de los diferentes materiales que componen el macizo, vitales para entender el fenómeno, que se explican a continuación.

La circulación del agua subterránea depende directamente de la densidad de fracturas en el material, la cual está a su vez directamente relacionada con sus propiedades mecánicas. Mientras en el bloque medio (más blando) la densidad de fracturas es alta y se evacua una gran cantidad de agua, en el bloque inferior (más duro) no existen diaclasas y prácticamente ninguna fractura, y no se encontró allí ningún brote de agua. Por lo tanto este bloque puede actuar como una capa impermeable, impidiendo que el agua descienda a través de él. Este hecho sería particularmente grave si el buzamiento del contacto entre los bloques fuera en sentido del pueblo (hacia el este), ya que toda el agua evacuaría precisamente en este sentido desestabilizando el macizo, pero afortunadamente el buzamiento es en sentido contrario al pueblo (hacia el oeste) impulsando al agua a evacuar hacia la parte interior.

Para que el agua lluvia sea evacuada por las galerías que esta se infiltre primero, por lo que se deduce que el bloque superior debe actuar como zona de recarga, lo que implica que tiene alguna permeabilidad primaria.

Como el mecanismo de circulación del agua son las fracturas, se deduce entonces que la dirección de circulación del agua dependerá del rumbo preferencial de fracturamiento en combinación con la capacidad de dicho fracturamiento para transportar el agua. El análisis de estos dos factores es resumido en el método de los diagramas estadísticos (polares y de rosetas) hidráulicos de frecuencia de fracturamiento para análisis hidroestructurales (Chica, 1984). El método considera no solo rumbo y buzamiento de cada estructura, sino también un peso estadístico hidráulico que se le asigna a cada una, midiendo su continuidad, abertura,

densidad y rugosidad. Todos estos factores combinados en una ecuación dan un peso estadístico a cada familia de discontinuidades, dando como resultado los gráficos polar y de rosetas, mostrados en la figura 11. Como se puede apreciar en estos gráficos polar y de rosetas, alrededor de las galerías el macizo presenta una conductividad hidráulica concentrada en sentido NW – SE, y en estructuras subverticales, en concordancia longitudinal con el rumbo del flanco del cerro en la zona de las galerías, donde se tomaron los datos, hecho que se corrobora al sobreponer el modelo de elevaciones del terreno y el diagrama de rosetas y ver su concordancia en la figura 12.

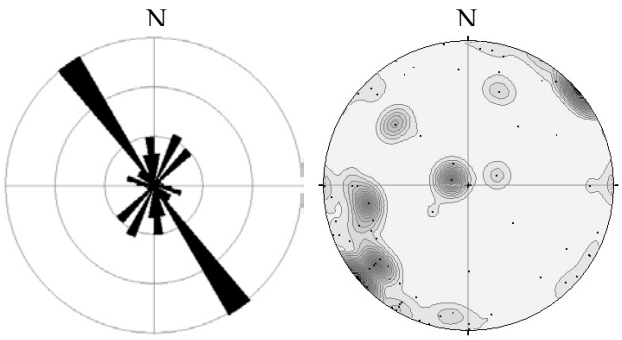

Figura 11. Diagrama polar y roseta de rumbos de la conductividad hidráulica en las familias de diaclasas y estructuras predominantes cartografiadas al interior de las galerías de drenaje del Cerro Combia.

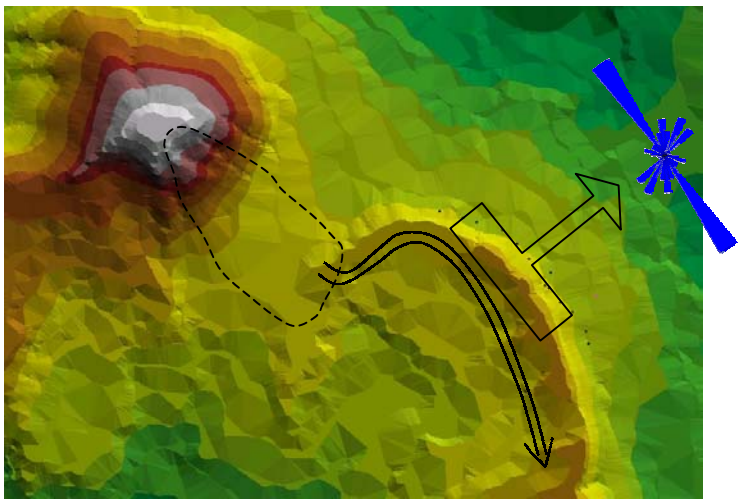

Figura 12. Detalle de la zona de estudio, con la interpretación de la conductividad hidráulica en Cerro Combia. Nótese la concordancia entre la geoforma y la roseta de direcciones.

Como se dedujo del análisis de las series de precipitaciones y caudales evacuados, el drenaje de agua por las galerías es permanente, incluso en verano, indicando la existencia de un acuífero de recarga que le provee un "caudal base" a las galerías de drenaje. Teniendo en cuenta que la conductividad hidráulica del macizo en la zona de las galerías (alrededores de Fredonia) tiene un marcado sentido NW – SE, el patrón de fracturamiento mostrado anteriormente en la figura 17, y la estratificación que presenta una ligera inclinación o buzamiento hacia el sur, se deduce que la zona de recarga está ubicada hacia el norte; y siguiendo la ruta que el agua debe seguir, la zona de recarga más probable sería entonces el espacio entre Cerro Combia y Cerro Bravo, formado por depósitos de vertiente. Obsérvese nuevamente la figura 12.

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES ACUMULADAS

En el municipio de Fredonia, debido a la grave amenaza que representan los movimientos en masa provenientes de Cerro Combia, fue creado por el Ingeominas (1996) un "Plan general de preparación para emergencias por deslizamientos", con el fin de tratar de preparar a la población ante un posible deslizamiento. Dicho plan se basa en la medición de la precipitación, ya que ésta es la única herramienta disponible actualmente para tratar de anticipar el deslizamiento. Para definir los estados de alerta se ha recurrido a la medición de la precipitación acumulada en uno, dos o tres días. A cada rango de tiempo de acumulación se le asignó un umbral de lluvia máximo para cada estado de alerta. El modelo del plan de Alertas según la precipitación acumulada se puede resumir en la tabla 2.

Precipitación acumulada durante	Alerta I Blanca	Alerta II Amarilla	Alerta III Naranja
1 día	Durante la temporada invernal	80 mm	90 mm
2 días		110 mm	120 mm
3 días		160 mm	160 mm

Tabla 2. Indicadores de los estados de alerta por deslizamientos en el municipio de Fredonia.

Este modelo es comparable al de Vélez et al (2002) donde se usan gráficos bidimensionales de lluvia antecedente acumulada en 2 periodos diferentes. Los gráficos que corresponden a esta zona de estudio los podemos encontrar en la figura 13.

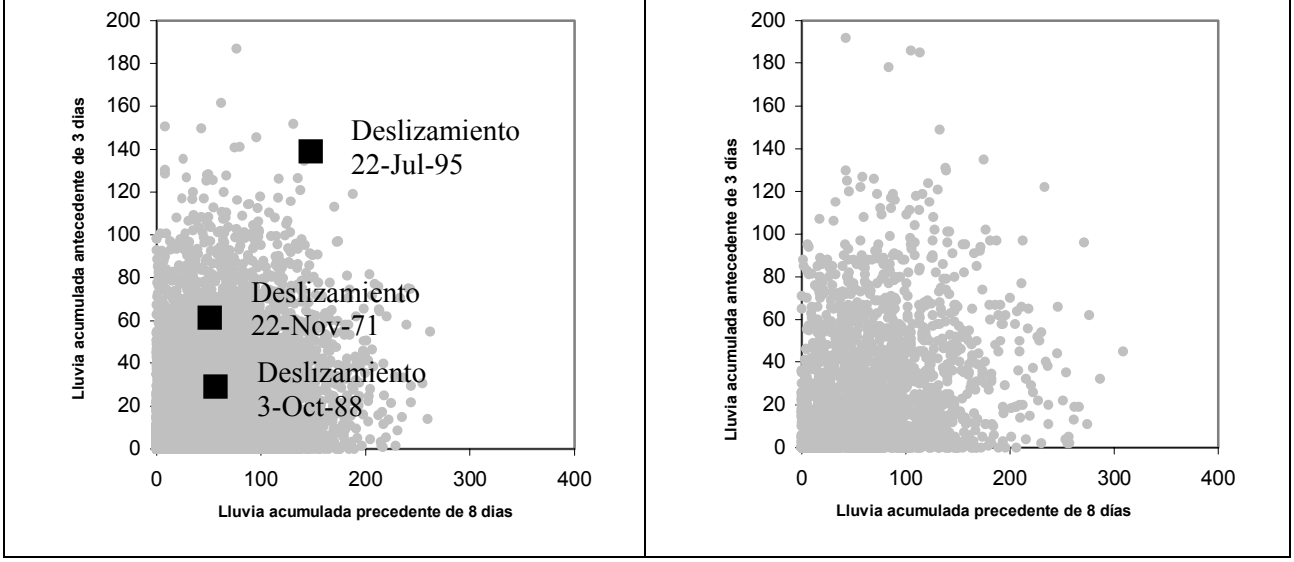

Figura 13. Diagramas de precipitación diaria acumulada histórica en Fredonia. Puntos en gris: días sin deslizamientos.

Analizando los gráficos de precipitación, se encuentra que dos de los deslizamientos corresponden a periodos de precipitación "normales", no detectados por el método, y solo uno tendría una detección temprana. Es decir, el actual sistema de alarma no daría un aviso pertinente en los dos casos, que corresponden a los eventos del 1 de noviembre de 1971 y 3 de octubre de 1988. Debe ser tomado en cuenta que en esas fechas no existían galerías de drenaje, las que probablemente habrían evitado ambos eventos. De cualquier manera, parece acertado dar una alerta cuando se superan los 160 mm de precipitación en 3 días, ya que esta es una lluvia muy fuerte y poco frecuente que fácilmente podría inestabilizar parte del macizo.

Es muy probable, que estos deslizamientos no hallan sido producidos por la precipitación directa sino que hayan intervenido otros factores disparadores, relacionados muy probablemente con el manejo de agua por parte de la comunidad vecina al Cerro, o la creación de obras civiles en zonas críticas. Por lo tanto, conviene reevaluar el método actual de preparación para emergencias.

La medida de la cantidad de precipitación no es sensible a condiciones externas que alteran el nivel freático, como lo es el taponamiento de los desagües o drenajes, o por el contrario, la ganancia de estabilidad por la creación o ampliación de un desagüe o drenaje, como lo son las galerías de drenaje. A la fecha, aunque se ha deducido cualitativamente que las galerías de drenaje bajan los niveles freáticos, no es posible cuantificar en qué medida.

CONCLUSIONES

El agua subterránea que circula al interior del Cerro Combia en el flanco oeste del municipio de Fredonia proviene en parte de infiltración directa de aguas lluvias en el Cerro, y en parte de la alimentación por parte de una zona de recarga, ubicada al norte de la zona de estudio. El sentido de circulación del agua, tiene en la franja que cubre al municipio, una dirección NNW–SSE.

El tiempo de rezago entre un evento lluvioso y la evacuación del agua infiltrada va desde uno hasta tres días, lo cual es considerado muy poco tiempo cuando la estabilidad del macizo depende de la cantidad de agua subterránea que a través de él circula.

Las actuales galerías cumplen bien su función de evacuación de aguas subterráneas aliviando las presiones de poros al interior del macizo, sobre todo cuando se trata de la evacuación de aguas lluvias. Sin embargo, ya que se ha identificado una zona de recarga hacia el norte, que hace que el agua circule a lo largo del Cerro, es preferible captarla antes de que llegue a la ladera inestable, mediante galerías de drenaje o

perforaciones subhorizontales de la mayor longitud posible, creando una cortina de drenajes que evite que el agua llegue a dicha ladera.

Para un buen control de las observaciones del agua que circula, sería ideal la instalación de al menos 4 piezómetros, antes de hacer cualquier nueva galería o perforación de drenaje, cubriendo la ruta de circulación del agua de norte a sur. Dichos piezómetros, además de indicar si las nuevas obras cumplieron su objetivo de bajar el nivel freático, mejorarían mucho la determinación de los estados de alerta para emergencias, basada actualmente en la medida de la precipitación y no del nivel freático directamente ya que no hay piezómetros que lo permitan.

En este estudio se pensó inicialmente que una buena manera de encontrar los niveles freáticos en el terreno sería mediante ensayos de geoeléctrica; sin embargo, al descubrir que el agua no circula por estratos permeables sino por sistemas de fracturas, se descartó este método, por no ser apropiado para estos casos.

La ubicación de las galerías de drenaje y piezómetros recomendados se muestra en la figura 14.

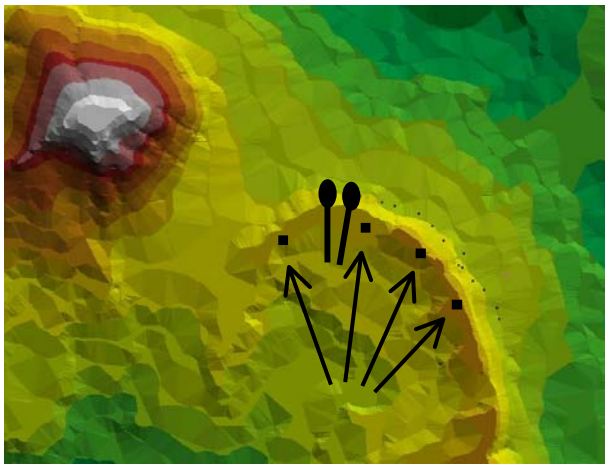

Figura 14. Galerías de drenaje y piezómetros recomendados.

El actual plan de estados de alerta ante el riesgo de deslizamientos en el municipio de Fredonia, aunque es considerado un plan bien diseñado teniendo en cuenta los datos de los que se vale para iniciar las alertas, no es adecuado, debido precisamente a que los datos de precipitación usados de manera exclusiva, no son una buena fuente de información de los fenómenos de circulación de agua al interior del Cerro.

BIBLIOGRAFÍA

- Chica, Alejandro. 1984. Análisis de estructuras geológicas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Grosse, Emil. 1926. Estudio geológico del terciario carbonífero de Antioquia en la parte occidental de la cordillera central de Colombia entre el río Arma y Sacaojal. Dietrich Reimer, Alemania.
- Ingeominas. 1996. Determinación de estados de alerta para emergencias por deslizamientos caso Fredonia (Antioquia). 7 Congreso colombiano de geología. Bogotá.
- Mejía, Mario. 1985. Geología del Cerro Combia y áreas vecinas. Ingeominas, Medellín.
- Sanear Ltda. 1989. Evaluación de riesgos naturales en el municipio de Fredonia, Antioquia. Medellín.