

**GEOTECNIA AMBIENTAL OBRAS DE MITIGACION EN EL DESLIZAMIENTO
DE VILLA JACKY – MINA DE AGREGADOS EL TUNJUELO. BOGOTA (CUND.)**

RAFAEL HERNANDO RINCON TORRES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2011

**GEOTECNIA AMBIENTAL OBRAS DE MITIGACION EN EL DESLIZAMIENTO
DE VILLA JACKY – MINA DE AGREGADOS EL TUNJUELO. BOGOTA (CUND.)**

RAFAEL HERNANDO RINCON TORRES

**Monografía para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental**

Director

GEO. Msc. ELIAS PINTO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2011

Ni la Universidad Industrial de Santander,
ni los jurados se hacen responsables de
los conceptos expuestos en el presente
Documento

A mi esposa por su amor y apoyo incondicional,
a mis hijos por su paciencia y estímulo para
seguir adelante. Aunque temporalmente estemos
separados siempre los llevo en mi alma.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. GENERALIDADES.....	20
1.1 LOCALIZACIÓN.....	20
1.2 METODOLOGÍA.....	21
1.2.1 Recopilación de la información existente.....	21
1.2.2 Investigación del Subsuelo: Actualización del Modelo Geológico y Geotécnico.....	21
1.2.3 Implementación del Plan de Monitoreo.....	21
1.2.4 Actualización del Modelo Hidrológico del área.....	21
1.2.5 Realización de Análisis Geotécnicos de estabilidad.....	22
2. INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO.....	23
2.1 FASE INICIAL.....	23
2.2 CAMPAÑA DE PERFORACIÓN.....	24
3. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO.....	28
3.1 SECUENCIA LITOLÓGICA EN EL ÁREA DEL DESLIZAMIENTO.....	28
3.1.1 Depósitos Recientes Antrópicos:.....	28
3.1.2 Nivel de Arcillas Terracota.....	31
3.1.3 Niveles de Gravas y Arenas- Secuencia de Interés económico.....	31
3.2 CONTORNOS ESTRUCTURALES ENTRE CONTACTO ROCAS DEL Terciario con el Depósito Aluvial Reciente.....	32
4. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MATERIALES: MACIZO ROCOSO Y SUELOS.....	34
5. ANÁLISIS GEOTÉCNICOS.....	36
5.1 HIPÓTESIS DE LAS CAUSAS DEL DESLIZAMIENTO.....	36
5.1.1 Secuencia del Movimiento.....	36
5.1.2 Evaluación de causas del deslizamiento.....	40
5.2 PERFILES PARA ANÁLISIS GEOTÉCNICOS.....	42

5.3	ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y EVALUACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA. 2 MESES DESPUÉS DEL DESLIZAMIENTO...	47
5.4	MAPA DE AMENAZAS.....	51
6.	OBRAS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN.....	55
6.1	OBRAS Y TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN	55
6.1.1	Medidas y Acciones Inmediatas al deslizamiento.....	55
6.1.2	Sellado de Grietas y Densificación del Terreno.....	56
6.1.3	Cortes en la parte alta del talud y Contrapesos en la parte inferior.....	56
6.1.4	Manejo de Aguas infiltradas.....	58
6.1.5	Obras y técnicas de Estabilización que permiten cumplir con la resolución 227 de 2006 exigida por la Dirección de Emergencias Prevención y Atención de Desastre de la ciudad de Bogotá –DPAE-.....	60
6.1.6	Recomendaciones Técnicas sobre la Reconformación Morfológica. (Contrapesos Geotécnicos).....	63
6.2	MANEJO DE AGUAS SUPERFICIALES E INFILTRACIÓN.....	67
6.2.1	Diseño Fase I.....	67
6.2.2	Cálculos Hidráulicos para Diseños de Canales internos temporales.....	70
6.3	OBRAS VERDES. REVEGETALIZACIÓN.....	81
7.	Instrumentación y Monitoreo	85
7.1	CONTROL DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA ZONA VECINA AL DESLIZAMIENTO.....	87
7.1.1	Control Planimétrico por visuales.....	87
7.1.2	Control altimétrico con nivel de colimación.....	88
7.1.3	Niveles de Alerta para Deformaciones Horizontales y Verticales en Líneas de Mojones.....	88
7.1.4	Control con extensómetros elementales.....	88
7.2	CONTROL DE MOVIMIENTOS HORIZONTALES PROFUNDOS EN LA ZONA VECINA Y DENTRO DE LA MASA DEL DESLIZAMIENTO: INCLINÓMETROS.....	91
7.3	INVESTIGACIÓN DEL RÉGIMEN DE AGUAS.....	93

7.3.1	Piezómetros de Hilo Vibratil.	93
7.4	MEDICIÓN DE COLUMNA DE AGUA. PIEZÓMETROS CASAGRANDE.....	93
7.4.1	Niveles de Alerta para movimientos horizontales profundos y cuadro de precisiones en inclinómetros.	94
8.	Seguimiento a la estabilidad y control de deformaciones en el Talud Codeipa.....	98
8.1	ANÁLISIS GEOTÉCNICOS PERMANENTES.....	98
8.2	MONITOREO PERMANENTE.....	100
8.2.1	Deformaciones Profundas. Inclinómetros.	100
8.2.2	Niveles Piezométricos	101
9.	Conclusiones.....	102
	Bibliografía.....	104

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros Geomecánicos. Deslizamiento Codeipa - Mina	35
Tabla 2. Valores RU.....	47
Tabla 3. Evaluación Amenaza DPAE.....	48
Tabla 4. Análisis de estabilidad Condición Post-Deslizamiento: 2 meses	49
Tabla 5. Memoria Plano de Amenaza en Condiciones Ambientales Críticas (0.2g).....	52
Tabla 6. Análisis de Estabilidad Diseño Morfológico Final	60
Tabla 7. Datos Información Meteorológica Estación Doña Juana.....	72
Tabla 8. Cálculo de caudales.....	74
Tabla 9. Cálculos Hidráulicos, Escenario: Canales del Diseño de Reconformación Parcial	76
Tabla 10. Cálculos Hidráulicos, Escenario: Taludes, Bermas Mineras	77
Tabla 11. Sección Cuneta Trapezoidal	78
Tabla 12. Mina El Tunjuelo. Instrumentación en Área influencia Deslizamiento Taludes Codeipa	86
Tabla 13. Niveles de Alerta. Control Topográfico. Magnitud y Velocidad.	88
Tabla 14. Niveles de Alerta. Extensómetros.	90
Tabla 15. Niveles de Alerta. Inclínómetro.	92
Tabla 16. Niveles de Alerta Inclínómetro	95
Tabla 17. Frecuencia de Lecturas.....	95
Tabla 18. Evolución del factor de Seguridad	98
Tabla 19. Parámetros Geomecánicos. Deslizamiento Codeipa - Mina	102

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización General	20
Figura 2. Investigación del Subsuelo: Ubicación de las perforaciones.	25
Figura 3. Producto obtenido de las perforaciones.	26
Figura 4. Plano Geológico.	29
Figura 5. Perfiles geológicos área influencia deslizamiento, P-01, P-02 y P-03...	30
Figura 6. Mapa de Contornos Estructurales del Contacto - Rocas del Terciario. .	33
Figura 7. Secuencia de movimiento (Geología y Geotecnia Ltda.).....	38
Figura 8. Cohesión requerida VS Ángulo de Fricción requerida.	40
Figura 9. Ubicación de secciones topográficas para análisis geotécnicos en el área de influencia del talud minero Codeipa.	42
Figura 10. Perfil Geotécnico C1 (09). Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).	43
Figura 11. Perfil Geotécnico C27. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).	44
Figura 12. Perfil Geotécnico C29. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).	45
Figura 13. Perfil Geotécnico C38. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).	46
Figura 14. Talud Codeipa P-C1. Análisis Estático para la condición de julio de 2009 (Fuente: Geología & Geotecnia Ltda)	50
Figura 15. Perfil C29. Análisis de superficies de falla en condición estática. Julio de 2009 (fuente: Geología y Geotecnia Ltda).	50
Figura 16. Perfil PC-27.....	51

Figura 17. Plano de Amenazas para análisis geotécnico en condiciones ambientales de un sismo con $a_h=0.2g$. (Elaboró: Rafael Rincón) Rojo: Amenaza Alta – Amarillo: Amenaza Media – Verde Amenaza Baja.	53
Figura 18. Plano de Amenazas para análisis geotécnico en condiciones actuales. (Elaboró: Rafael Rincón). Estática Amenaza Alta – Amarillo: Amenaza Media – Verde Amenaza Baja.	54
Figura 19. Perfil C1. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconformación. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde $FS= 1.294$ (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).	61
Figura 20. Perfil C29. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconformación. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde $FS= 1.442$ (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).	61
Figura 21. Perfil C27. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconformación. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde $FS= 1.285$ (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).	62
Figura 22. Diseño de Reconformación Morfológica Final y Diseño Final de Obras Hidráulicas.	66
Figura 23. Distribución de la red de drenaje y ubicación temporal de obras hidráulicas en su primera fase.	67
Figura 24. Áreas Aferentes.....	73
Figura 25. Ubicación Instrumentación para monitoreo del Talud Codeipa	86
Figura 26. Registros de deformación acumulada en tubería del inclinómetro 1.92	92
Figura 27. Diagrama esquemático en el que se muestran las isopiezas y la interpretación por comprobar de las líneas de flujo en el área de estudio.	96
Figura 28. Gráfica de la evolución del factor de seguridad FS , a partir de junio de 2009.	99

Figura 29. Misma condiciones de mecanismo de falla de la gráfica anterior. Considera como propiedad geomecánica para la falla de la materia orgánica los valores obtenidos de promedios aritméticos de ensayos de corte directo.	99
Figura 30. Deformación máxima acumulada (mm). Perforación SM-8 (inclinómetro 6). Lectura de referencia 28 de junio de 2009. (fuente C&U Instrumentación).	100
Figura 31. Lecturas acumuladas del nivel piezométrico en la perforación P-41. Con una oscilación máxima del nivel del agua de 3.44 metros. La cota topográfica media del nivel del agua es 2512.31 msnm.	101
Figura 32. Oscilaciones en las lecturas de los extensómetros ubicados en la berma Terraza 2 ,corresponde a relleno de escombros mal clasificado..	101

LISTADO DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1. Panorámica Antes del Deslizamiento	24
Fotografía 2. Panorámica post - deslizamiento	24
Fotografía 3. Despegue de la falla en la cota topográfica 2520. Presencia de Turbas y arcillas orgánicas. Condición antes de la falla.	37
Fotografía 4. Las flechas de la derecha, Material in situ, muestran el bloque por donde se inició el movimiento. Bloque derecho que posteriormente arrastra el bloque izquierdo del terraplén y material in situ. La parte alta del Bloque izquierdo corresponde al terraceo y reconfiguración de un deslizamiento ocurrido en el año de 1993. Condición posterior a la falla.	37
Fotografía 5. Vista lateral de la masa deslizada y su fragmentación en bloques.	38
Fotografía 6. Morfología de la parte superior del deslizamiento.....	39
Fotografía 7. Operación de buldózer según indica la flecha: de acuerdo a la topografía de abajo hacia arriba, confinando la parte baja del escarpe de falla.	56
Fotografía 8. Descabece en la parte alta de la corona del deslizamiento.	57
Fotografía 9. Terraceo en el escarpe del talud fallado y construcción de contrapesos en la parte baja y media del talud deslizado.	57
Fotografía 10. Disposición técnica, en la parte baja de la masa deslizada, de escombros como contrapeso de estabilización.	57
Fotografía 11. Afloramiento de aguas internas en la masa deslizada.	58
Fotografía 12. Canalización y evacuación de aguas que aparecieron en el flanco derecho del deslizamiento	59
Fotografía 13. Construcción Filtro Volumétrico. Excavación, tallado, extendido geotextil y disposición de piedra para filtro.	68
Fotografía 14. Construcción filtro en roca sobre pata de un talud. Sellado y cosido del filtro.....	68

Fotografía 15.	Construcción cunetas revestidas en geomembrana y cajas para distribución del agua a una terraza inferior a través de la mangueras de 3".	69
Fotografía 16.	Marco izquierdo: Filtros transversales en las caras de los taludes. Marco derecho Caja para captación y distribución del agua a las terrazas inferiores.	69
Fotografía 17.	Cunetas recubiertas con geomembrana, caja colectora y distribuidora de agua.	70
Fotografía 18.	A la izquierda compactación, tallado y perfilado de taludes. A la derecha repoblación vegetal de taludes finales (parte alta de talud fallado).	82
Fotografía 19.	Aspecto de la revegetalización en taludes superiores finales reconformados del talud Codeipa.	82
Fotografía 20.	Labores de extendido de cespedones de pasto kikuyo sobre tierra negra (<i>Pennisetum clandestinum</i> H.).	83
Fotografía 21.	Cambios morfológicos y paisajísticos el área del deslizamiento.	83
Fotografía 22.	Panorámica de estado de la reconformación y revegetalización de la parte alta y media del talud deslizado (julio de 2010).	84
Fotografía 23.	Detalle de los mojones y la referencia tomada para el control de asentamientos y movimientos horizontales.	87
Fotografía 24.	Extensómetros instalados sobre material conformado en las terrazas superiores el talud Codeipa. Varillas de ½" en forma de L ancladas sobre el terreno. La deformación horizontal se mide con un calibrador por la el movimiento relativo en los extremos de las varillas.	89
Fotografía 25.	Inclinómetros. Monitoreo en inclinómetros 3 y 4 en el talud de Codeipa.	92
Fotografía 26.	Piezómetro de Casagrande o tubo abierto.	94

TITULO: GEOTECNIA AMBIENTAL: OBRAS DE MITIGACIÓN EN EL DESLIZAMIENTO DE VILLA JACKY – MINA DE AGREGADOS EL TUNJUELO. BOGOTA (CUNDINAMARCA)*

Autor: RINCON TORRES,Rafael Hernando**

Palabras Claves: Estabilización - Deslizamiento – Obras de Mitigación – e Amenaza – Parámetros Geomecánicos – Instrumentación y Monitoreo.

En este trabajo se presenta los aspectos técnicos adelantados para diseñar y ejecutar las obras de mitigación y estabilización de un deslizamiento que ocurrió en una mina de gravas aluviales, que se localiza en el casco urbano de la ciudad de Bogotá (Col).

Los diseños están soportados con base en la investigación directa del subsuelo realizada a través de perforaciones destructivas y con recuperación continua de núcleos, de las cuales se obtuvo: el modelo geológico – geotécnico de los materiales fallados e in situ de suelo y macizo rocoso involucrados en el fenómeno de remoción en masa; los parámetros geomecánicos de resistencia los materiales a partir de muestras alteradas e inalteradas de los materiales. Para los análisis determinísticos de estabilidad bidimensionales pre y post deslizamiento de los taludes más críticos, se usa el Método del Equilibrio Límite de “Bishop Simplificado”. Los análisis tienen en cuenta condiciones ambientales críticas que incluye un sismo con aceleración horizontal $a_h = 0.2g$ y el agua simulando taludes parcialmente saturados.

Las obras de mitigación recomendadas, en el área de influencia del deslizamiento, y soportadas en diseños son: técnicas de estabilización de cortes de material en la parte alta del escarpe de falla y rellenos técnicos con escombros y materiales estériles de la mina, como contrapesos en la parte inferior de éste. Obras hidráulicas para el manejo de aguas superficiales, subsuperficiales e infiltración y como obras verdes la rápida empradización del terreno. Como medida de prevención se implementa la instrumentación y monitoreo por medio de inclinómetros, piezómetros y líneas de control topográfico.

* Monografía de Grado

** Facultad de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Geo. Elías Pinto Msc.

TITLE: MITIGATION WORKS IN LANDSLIDE JACKY VILLA – ALLUVIAL GRAVEL MINE “EL TUNJUELO” BOGOTA (Cundinamarca) *

Autor: Rafael Hernando Rincón Torres**

Keywords: Stabilization - Glide - Mitigation Works - Threat Level - geomechanical parameters - Instrumentation and Monitoring.

This paper shows the technical aspects developed to design and implement mitigation works and stabilization of a landslide that occurred in an alluvial gravel mine, located in the city of Bogota (Col).

The designs are supported based on direct investigation of the subsoil through destructive drilling and continuous recovery of nuclei, from which the geological-geotechnical model of the failed materials and in situ soil and rock mass involved in the phenomenon of mass removal was obtained; the geomechanical resistance parameters of the materials from altered and unaltered samples. For deterministic bydimensional stability analysis pre-and post- sliding of the most critical slopes, using the Limit Equilibrium Method "Bishop Simplified." The analysis takes into account critical environmental conditions including an earthquake with horizontal acceleration $a_h = 0.2g$ and simulating slopes partially water saturated

The recommended mitigation works in the slide influenced area and supported in designs are: material cuts stabilization techniques at the top of the fault scarp and technical filling with debris and mine sterile materials, as well as counterweights in the bottom of it. Hydraulic works for surface, subsurface water and infiltration management also as green works fast meadow growing in the land. As a preventive measure monitoring instrumentation using inclinometers, piezometers and topographic control lines is implemented.

* Thesis

** Chemical Enginner School. Enviromental Enginner Especialist. Director: Geo. Elías Pinto Msc.

INTRODUCCIÓN

En mayo 20 de 2009 se presentó la falla geotécnica de un talud de la mina de agregados el Tunjuelo, cuyo operador es Cemex Colombia S.A.; lugar donde la extracción de materiales para construcción se lleva a cabo por el sistema de minería de cielo abierto y emplea el método de terrazas descendentes. El volumen de material desplazado por el fenómeno de remoción en masa es del orden de 2.5 millones de metros cúbicos y está caracterizado por materiales no consolidados: material arcilloso empleado como terrazas de relleno que hizo parte de una antigua escombrera, que se conformó para estabilizar un antiguo deslizamiento que se produjo en el año de 1993 y material in situ constituido por conglomerados cementados con locales interposiciones de lentes de arcillas, arcillas orgánicas, turbas, limos y arenas.

El área afectada por el deslizamiento se encuentra en el casco urbano de la ciudad de Bogotá, por ello las obras de estabilización y mitigación propuestas en los estudios y diseños deben cumplir con la Resolución 227 de Julio 13 de 2006, impuesta por la Dirección de Prevención de Desastres Amenazas y Emergencias de la ciudad de Bogotá –DPAE-. La resolución determina que los análisis geotécnicos de estabilización deben considerar las condiciones ambientales extremas, que de acuerdo con la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá la modelación físico – matemática evalúe un sismo, con aceleración horizontal de $a_h=0.2g$ y taludes saturados parcialmente por efectos del agua lluvia y sub-superficial.

Las obras de mitigación ambiental determinadas para estabilizar el área fallada y su área de influencia, corresponden a:

- **Obras hidráulicas** para el manejo de las aguas superficiales, infiltración y sub-

superficiales. Constituidas básicamente por la construcción de cunetas en concreto, zanjas en tierra, trincheras drenantes y filtros volumétricos.

- **Obras y técnicas de estabilización del terreno**, como cortes y retiro de material fallado en la parte superior y adecuación de contra pesos en la parte inferior. El terraceo acompañado del sellado de grietas.
- **Obras Verdes**, corresponde a las siembra de pasto kikuyo que desarrolla raíces profundas y produce una buena densidad y permiten controlar y prevenir los efectos de la erosión y meteorización.

La aplicación e implementación de las obras ambientales de mitigación en cualquier fenómeno de remoción en masa (deslizamientos, flujos de tierra, flujos de lodos, detritos etc.) y otros que afectan el macizo rocoso, es propia y exclusiva del ambiente geológico y geotécnico, de la geomorfología e hidrogeología del área de influencia donde se presenta el fenómeno de inestabilidad y también es inherente al tipo y mecanismo de falla. Por lo anterior, en la investigación del fenómeno de inestabilidad del Talud de Codeipa se cumple con este precepto y en el estudio se tiene en cuenta la exploración del subsuelo, realizada a partir de una campaña de perforación para toma directa de muestras alteradas e inalteradas que permiten tener una aceptable caracterización geomecánica de los materiales involucrados.

Los análisis geotécnicos soportados con base en la investigación del subsuelo y la caracterización mecánica de los materiales dan una buena confiabilidad a los diseños y obras de estabilización propuestas.

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN.

La mina de agregados pétreos “El Tunjuelo” operada por la empresa Cemex Colombia S.A., se encuentra localizada en el casco urbano de la ciudad de Bogotá, Departamento de Cundinamarca (Ver Figura 1). Ubicada al sur de la ciudad, como aspecto relevante de localización bordea al occidente con la margen occidental la Autopista al Llano.



Figura 1. Localización General

1.2 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto de estabilización, recomendaciones y construcción de las obras de mitigación se tuvo en cuenta las siguientes actividades:

1.2.1 Recopilación de la información existente.

Se condensó la información física y electrónica de las bases de levantamiento topográficos, perforaciones, geológica, estudios hidrológicos y geotécnicos previos al deslizamiento.

1.2.2 Investigación del Subsuelo: Actualización del Modelo Geológico y Geotécnico.

Con base en la topografía actualizada, en los materiales de macizo rocoso y suelo de influencia de la masa deslizada, se diseñó una campaña de perforación y muestreo que permitió actualizar la información litológica de los materiales y obtener muestras para ensayos geomecánicos que permitieron actualizar el modelo geológico y geotécnico.

1.2.3 Implementación del Plan de Monitoreo.

Simultáneo a la campaña de perforación se diseñó la malla, instalación e implementación de los diferentes tipos de instrumentación para control y monitoreo en el área del deslizamiento.

1.2.4 Actualización del Modelo Hidrológico del área.

Con base en las perforaciones e instrumentación instalada en el área de influencia del deslizamiento se determinó la presencia de agua sub-superficial y su ubicación como tabla de agua y/o niveles piezométricos.

1.2.5 Realización de Análisis Geotécnicos de estabilidad.

Considerando las condiciones críticas ambientales (taludes parcialmente saturados y efecto de sismo con aceleración horizontal de $a_h=0.2g$), se determinó mediante el método de análisis de Bishop Simplificado, las condiciones de estabilidad post-deslizamiento y la simulación de diseños geométricos de reconfiguración con carácter geotécnico que cumplan con la resolución 227 de 2006 de la DPAE.

2. INVESTIGACIÓN DEL SUBSUELO.

2.1 FASE INICIAL.

Inmediato sucedió la falla del talud de Codeipa y comprobado que la masa deslizada y su área de influencia presento una estabilidad cinemática relativa se iniciaron las medidas de mitigación en los sectores más críticos Ver fotografías 1 y 2. El plan de mitigación consideró la actualización topográfica post-evento y análisis geotécnicos de estabilidad que consideraban como parámetros geomecánicos los obtenidos históricamente en pruebas de laboratorio y reportados en los diferentes estudios que ha realizado durante los 16 últimos años en las minas del Tunjuelo, la firma consultora Geología Y Geotecnia Ltda.

Lo anterior mientras se obtenía información directa, mediante perforaciones, de la secuencia litológica, estructural y la determinación de las propiedades geomecánicas de los materiales y estructuras involucradas en el movimiento de remoción en masa ocurrido el 20 de mayo de 2009.

Los análisis de estabilidad obtenidos con parámetros geomecánicos históricos y descritos en términos de Factores de Seguridad, permitieron enfocar las acciones iniciales de mitigación, con ellos se determinó en una primera fase donde de manera técnica y ordenada se debían ubicar y conformar con materiales térreos denominados contrapesos y donde realizar descabezamientos en la parte alta del escarpe del deslizamiento.



Fotografía 1. Panorámica Antes del Deslizamiento



Fotografía 2. Panorámica post – deslizamiento

2.2 CAMPAÑA DE PERFORACIÓN.

La fase de investigación del subsuelo se constituyó de 571.40 metros lineales, distribuidos en 18 perforaciones, en donde se combinó los métodos de percusión y lavado y recuperación continua de núcleos, ver la Figura 2 distribución en planta

de las perforaciones ejecutadas y la instalación de la instrumentación para el monitoreo geotécnico.

Los diámetros de los barrenos usados son HQ y NQ (7 – 5 cm de diámetro), en cuyo hueco se instaló inclinómetros y piezómetros para el monitoreo de deformaciones en los taludes y determinación de la presencia de agua y su presión. La Figura 3, muestra un ejemplo del registro de los núcleos rocosos y el procesamiento de la información de la perforación P-25. Metodología similar se usó con la información obtenida de las demás perforaciones.

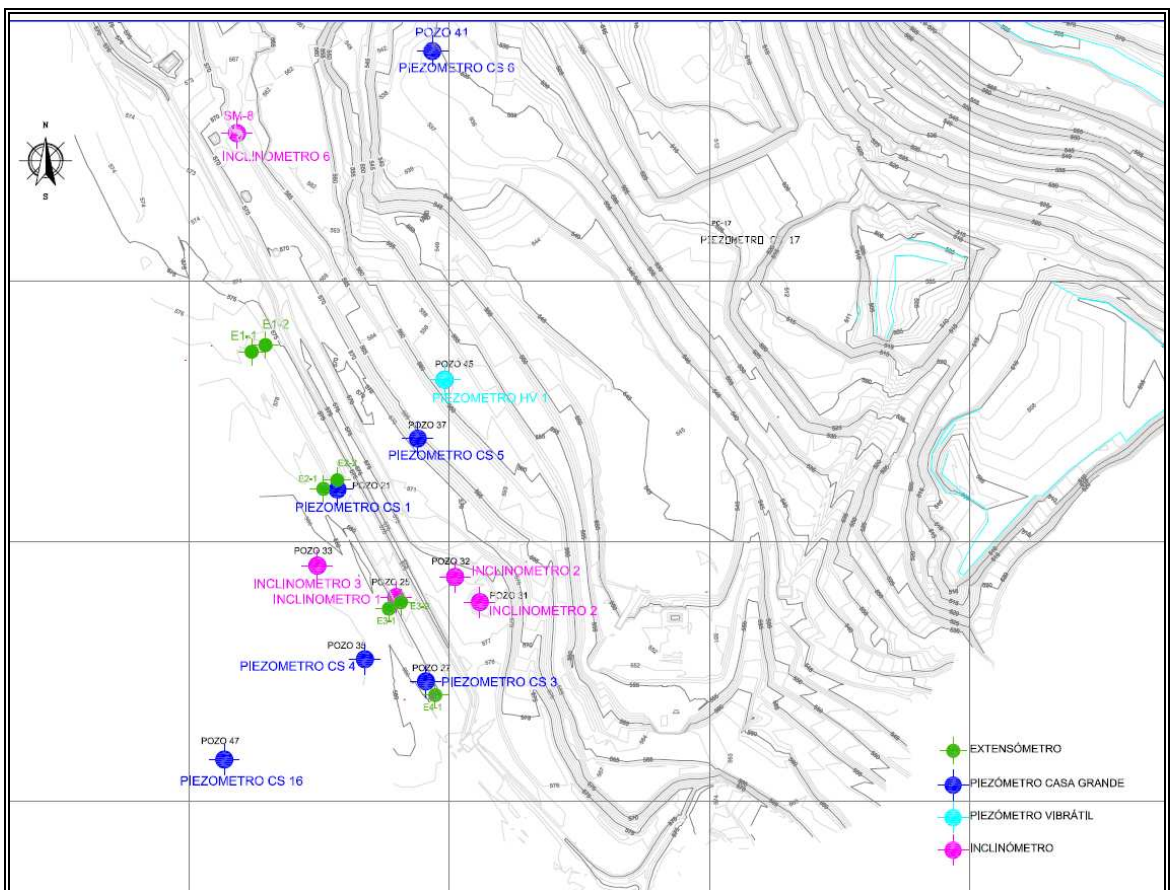


Figura 2. Investigación del Subsuelo: Ubicación de las perforaciones.

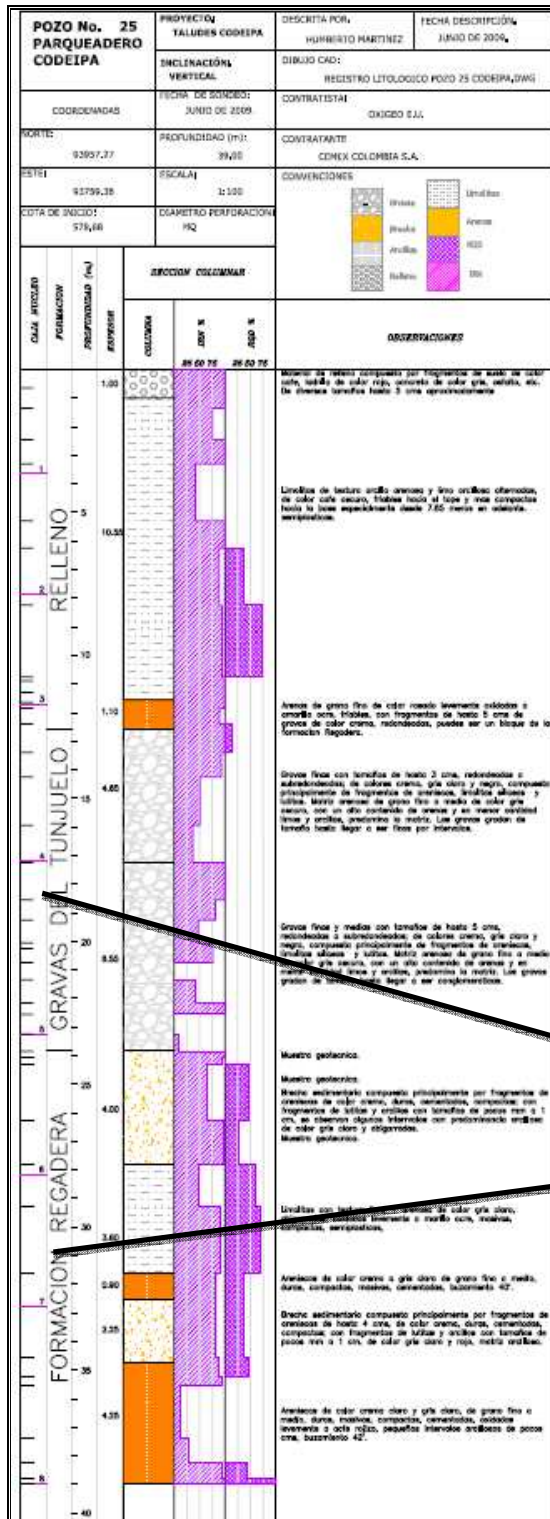


Figura 3. Producto obtenido de las perforaciones.

Como ejemplo se enseña a la izquierda el registro litológico y a la derecha los núcleos rocosos obtenidos en la perforación P25.

La selección de los sitios de las perforaciones y la instalación de la instrumentación geotécnica tiene en cuenta el cubrimiento espacial a mitigar o reconformar de la parte alta del talud, suelos y rocas in situ, y la parte media del deslizamiento. El fin es investigar las variaciones laterales y verticales de rocas y suelos en el área de influencia del deslizamiento, cuyo cubrimiento permita conocer y tomar muestras para ensayos físico – mecánicos del material in situ, la masa fallada, la profundidad del plano de falla, ubicar el basamento rocoso (rocas del Terciario) y la presencia de agua subsuperficial.

3. MODELO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

3.1 SECUENCIA LITOLÓGICA EN EL ÁREA DEL DESLIZAMIENTO.

Con base en la información obtenida en las perforaciones y controles de campo superficiales, se describe la secuencia litológica actualizada dentro del área de influencia del deslizamiento, que incluye las gravas que se extraen económicamente como agregados pétreos. De techo a base se tiene: (Ver Figura 4 Plano Geológico y Figura 5 Perfiles Geológicos).

3.1.1 Depósitos Recientes Antrópicos:

3.1.1.1 Escombros Mal Clasificados: Caracterizados por una mezcla heterogénea de fragmentos de materiales de demolición: bloques de concreto armado, ladrillo, restos de madera etc., en matriz de suelo orgánico y arenas sucias. Baja compactación. Sobre este depósito se fundó el Barrio Villa Jacky que colinda unos 50 metros al Occidente de la cresta de la explotación minera. Cubre el área en un 0.47%.

3.1.1.2 Escombrera Minera- Terrazas. Corresponde a la adecuación y conformación técnica de materiales estériles de la mina; constituidas por arcillas, limos, limolitas, arenas, bloques de areniscas y esporádicas gravas, las cuales han sido dispuestas por capas menores a 50 centímetros y compactadas por medios mecánicos (buldózer, paso permanente de vehículos y vibro compactador). Compactación media a alta. Su espesor es menor a 8 metros.

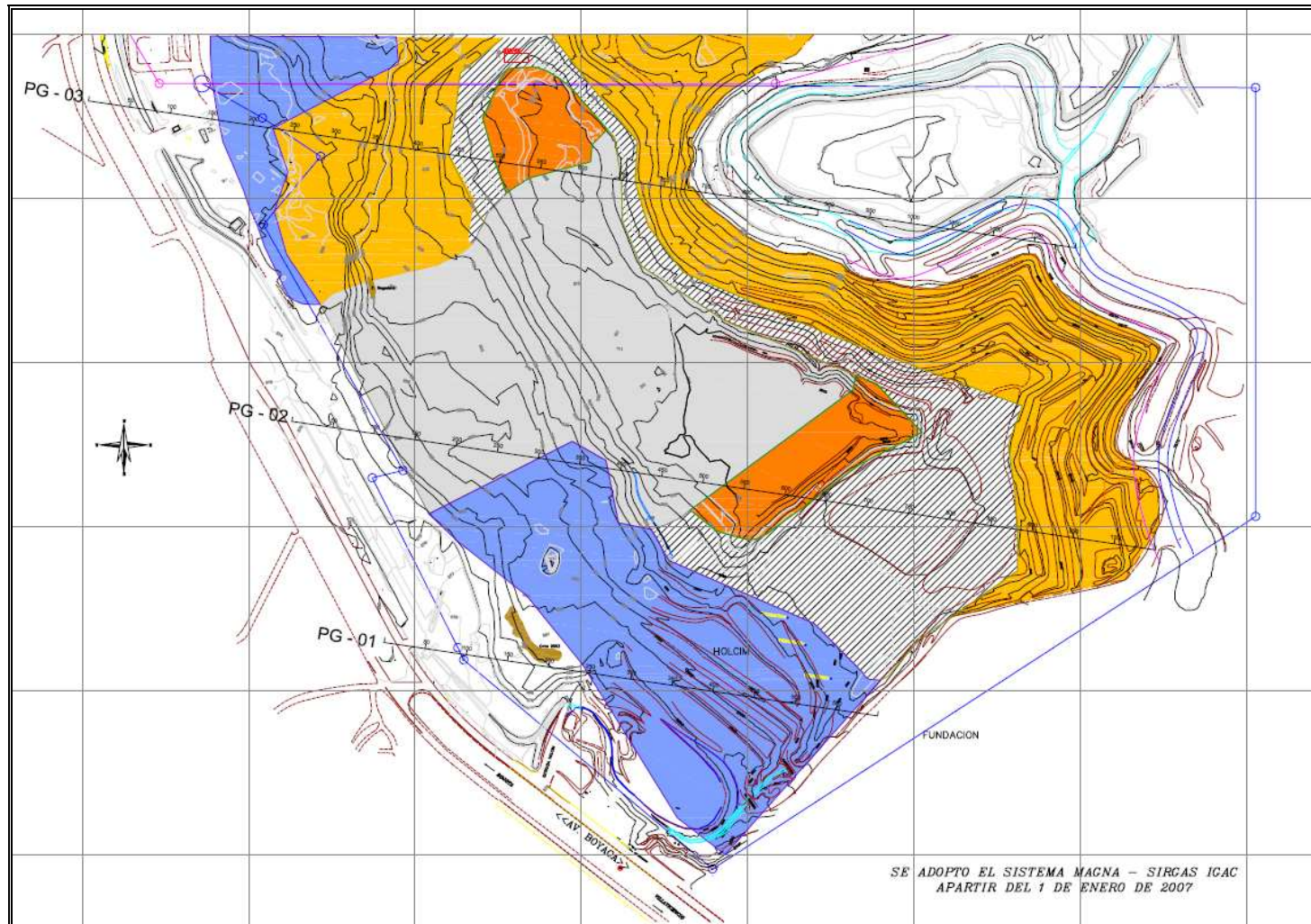


Figura 4. Plano Geológico.

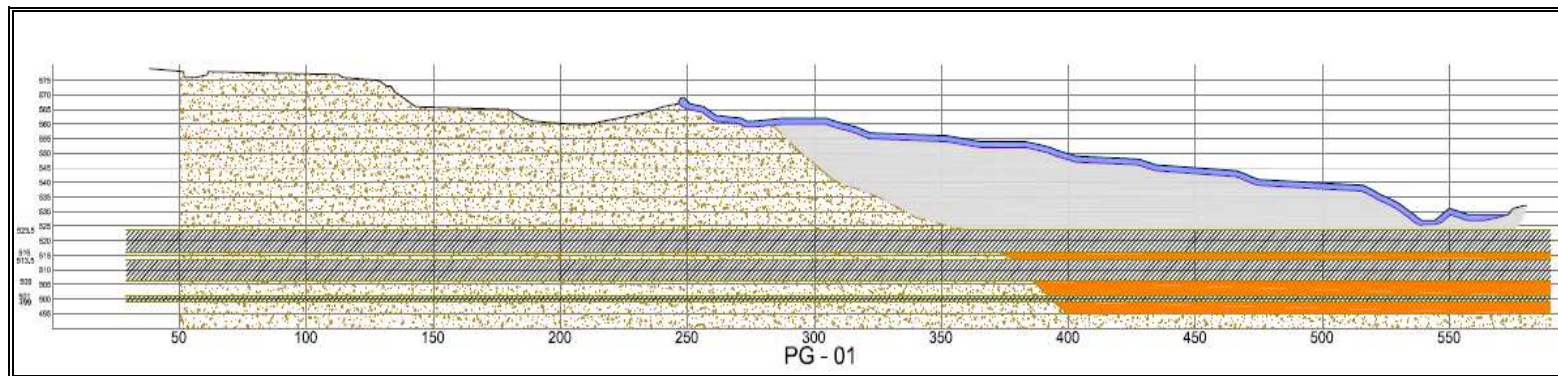
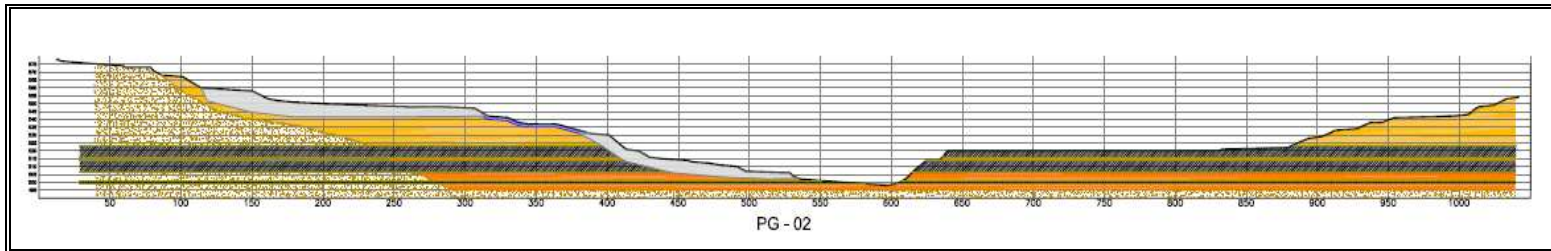
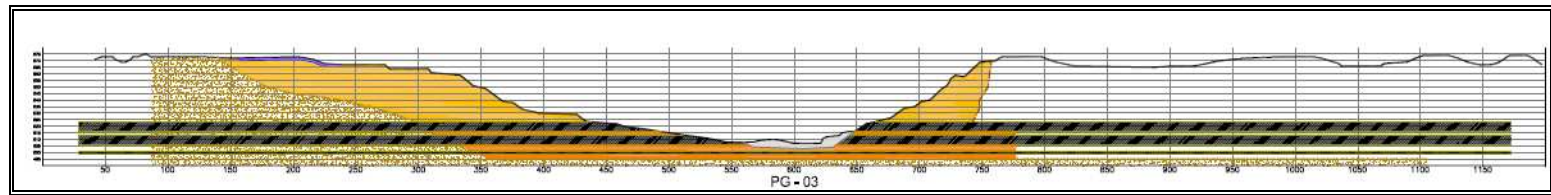


Figura 5. Perfiles geológicos del área de influencia del deslizamiento, P-01, P-02 y P-03.

3.1.2 Nivel de Arcillas Terracota.

Infrayace los depósitos antrópicos. Denominación interna para describir un nivel de sedimentos que constituyen el material estéril de la mina. Corresponde a limos y arenas arcillosas de consolidación media, de colores rojizos y gris verdosa. El espesor atravesado en las perforaciones es variable: entre 5 metros y 11.05 metros.

3.1.3 Niveles de Gravas y Arenas- Secuencia de Interés económico.

Desde el punto de vista minero y económico se identifican dos niveles de conglomerados, gravas y arenas, denominados Fase I y Fase II, con una interposición de limos arcillosos, arcillas orgánicas y turbas.

3.1.3.1 Nivel de Gravas Gruesas- Denominada Fase I-

Infrayace concordantemente el Nivel de Arcillas Terracota. Corresponde a un depósito de conglomerados de color amarillo-café predominantemente clasto-soportados con matriz areno-arcillosa. Los clastos de las gravas gruesas son bien redondeados y constituidos por cuarzo arenitas de grano fino a medio y limolitas silíceas oscuras bien cementadas. El eje mayor de gravas es menor a los 20 centímetros. Se observan lentes de poca continuidad de arenas finas, limos color café y algunos lentes de arcilla plástica, color marrón. El espesor de este nivel que presenta una buena continuidad en la mina, es menor a los 30 metros.

3.1.3.2 Nivel de Arcilla.

Infrayaciendo el nivel de conglomerado, se encuentra un estrato de arcilla gris oscura, de consistencia blanda a dura, con trazas de arena. Este estrato presenta variación en su espesor que va desde 2.7 m en el costado sur hasta 3.4 m en el sector norte.

3.1.3.3 Nivel de Gravas medias inferiores- Fase II-

Hacia la base del Nivel de arcilla se encuentra una secuencia de gravas de color gris, matriz soportado. La matriz está constituida por arenas finas a medias limo-arcillosas. Con un espesor aproximado de 25 metros. En el nivel se encuentran intercalados niveles arcillosos y limo arcillosos de 2 a 8 m de espesor.

3.2 CONTORNOS ESTRUCTURALES ENTRE CONTACTO ROCAS DEL TERCIARIO CON EL DEPÓSITO ALUVIAL RECIENTE.

A partir de la interpretación de los núcleos de la última campaña de perforación obtenidos del subsuelo en la mina El Tunjuelo se establece un cambio en los contornos del basamento económico, específicamente, hacia la parte más Noroccidental del área del deslizamiento, en donde la unidad geológica terciaria se encuentra topográficamente más arriba del modelo del basamento anterior y una adelgazamiento de las Gravas de Fase I - unidad litológica de interés económico -. Adicionalmente, en este sector los estudios geotécnicos revelan unas condiciones de estabilidad medias a bajas, con una zona débil de potencial falla entre el contacto de las rocas de la Formación Regadera y el depósito aluvial – el contacto corresponde a un paleosuelo caracterizado por arcillas orgánicas-.

Las recomendaciones técnicas para mejorar la estabilidad plantean realizar el des-coronamiento del talud, lo cual implica correr su cresta hacia el occidente. La geometría del basamento corresponde a un pedimento con una topografía variable que oscila entre 2.558 m.s.n.m y 2.475 m.s.n.m.

La determinación espacial y las características geomecánicas del contacto entre los materiales de macizo rocoso y suelo (Rocas del Terciario y Depósito Fluvio – Torrencial) entra a jugar un papel muy importante porque esta superficie constituye una zona débil, donde potencialmente se pueden generar superficies de falla y activación del deslizamiento.

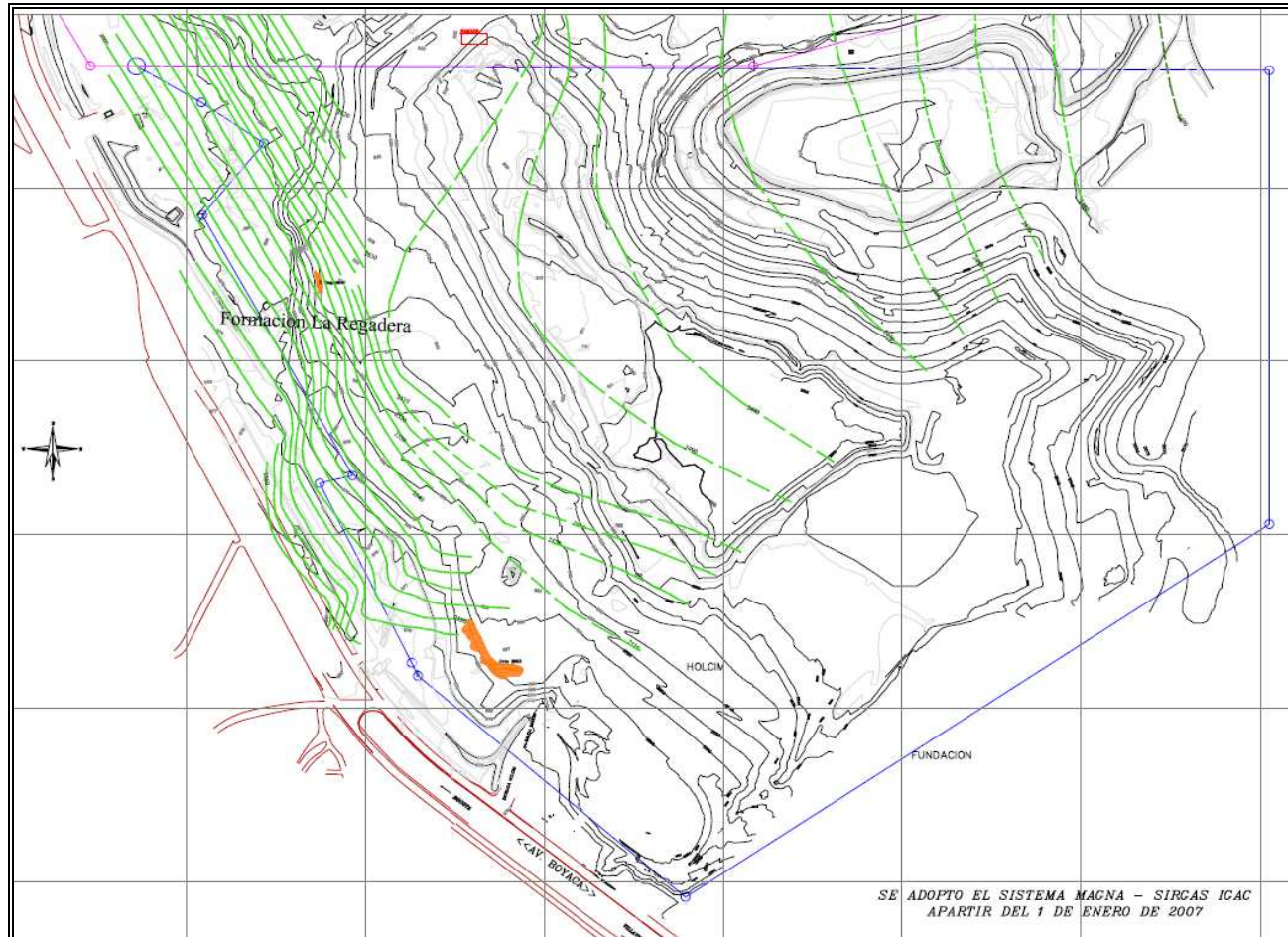


Figura 6. Mapa de Contornos Estructurales del Contacto de las Rocas del Terciario.
(Geología y Geotecnia Ltda.)

4. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE MATERIALES: MACIZO ROCOSO Y SUELOS.

Con las muestras alteradas e inalteradas obtenidas de las perforaciones y otras muestras tomadas directamente de los taludes mineros y masa deslizada se hizo la caracterización geomecánica del material rocoso y suelo; los ensayos realizados son: Determinación de Pesos Unitarios Totales: 192 ensayos, Determinación de Pesos Unitarios Secos:95 ensayos, Determinación Humedad Natural: 324 ensayos, Determinación de Resistencia de los Materiales: 135 ensayos de Corte Directo y 46 ensayos de Compresión Inconfinada, Clasificación: 279 ensayos de límites de Atteberg, ensayos de gradación: 160 ensayos, Determinación de Gravedad Específica, Gs; 37 ensayos, Determinación de Materia Orgánica: 3 ensayos y Sensitividad de las arcillas : 1 ensayo.

Con la cantidad y los diferentes tipos de ensayos descritos anteriormente realizados en laboratorios certificados, se determinaron de manera confiable los parámetros geomecánicos que se usan para realizar los análisis geotécnicos del deslizamiento, parámetros geomecánicos que son extensivos a la valoración geotécnica de los diferentes taludes de la mina. Los parámetros de resistencia (c, cohesión y fricción, determinados en la Tabla 1, corresponden a las propiedades promedio aritmético y sus variaciones, tanto para los valores pico como para los valores residuales.

Tabla 1. Parámetros Geomecánicos. Deslizamiento Codeipa - Mina

Material	Peso Unitario (kN/m ³)	Cohesión (kN/m ²)	Angulo de Fricción (Grados)
Relleno	19.91	24.53	23.65
Relleno Antiguo (Planta Manas)	20.55	50,00	18,00
Arcillas Grises y Negras	18.93	20.6	20.71
Arcilla Terracota	19.23	17,00	27.05
Conglomerado	24.5	196.2	21,00
Turba	15.21	0	10,00
Arenas y Gravas	19.82	16.68	32.86
Contacto Regadera	20.4	28.16	24.15
Contacto Regadera Triáxial*	20.4	0,00	13.5
Contacto Regadera Residual**	20.4	7.8	23,00
Masa Fallada	20.11	27.17	21.47

* Valores Pico tomados de ensayos triáxiales

** Valores tomados de los promedios de valores residuales obtenidos de los ensayos de corte directo

Fuente: Geología & Geotecnia Ltda

5. ANÁLISIS GEOTÉCNICOS.

Entre los aspectos relevantes que se debe tener en cuenta para la evaluación y la realización de los análisis geotécnicos respectivos, es necesario determinar, aunque sea a nivel de hipótesis, las causas y el (los) mecanismo (s) de falla que generan el deslizamiento. Información valiosa que ayuda a plantear los modelos físico – mecánicos de análisis de estabilidad pre y post deslizamiento y de las alternativas de estabilización, en este último caso incluyendo en el análisis la acción de un sismo con aceleración horizontal $a_h=0.2g$, requerida por la DPAE en la resolución No. 227 de julio de 2006.

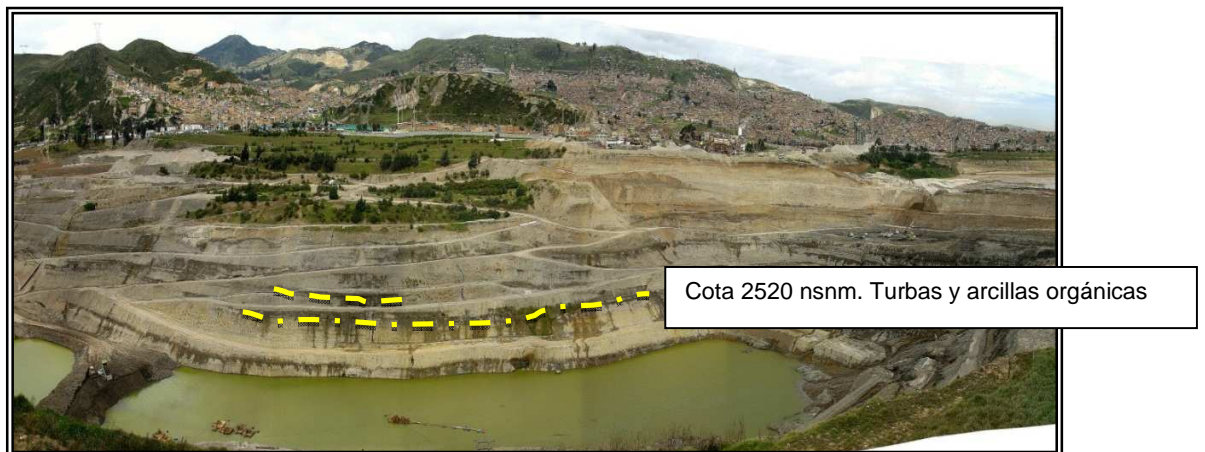
Los análisis de estabilidad de los taludes planteados en esta investigación se efectúan por medio del programa Slide 5.1, usando los Métodos del Equilibrio Límite de “Bishop Simplificado”; y Janbu Modificado. El criterio de resistencia empleado en las evaluaciones geotécnicas corresponden a la teoría de Mohr Coulomb, cuyos valores de parámetros de resistencia se presentan en la Tabla 1 (tomada de los informes de Geología & Geotecnia), por resolución impositiva como agente detonante de inestabilidad se considera no sólo el efecto del agua en los taludes, si no el escenario donde se tiene una aceleración sísmica horizontal extrema de 0.2g, magnitud determinada, para el sector de la mina el Tunjuelo, en el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá.

5.1 HIPÓTESIS DE LAS CAUSAS DEL DESLIZAMIENTO.

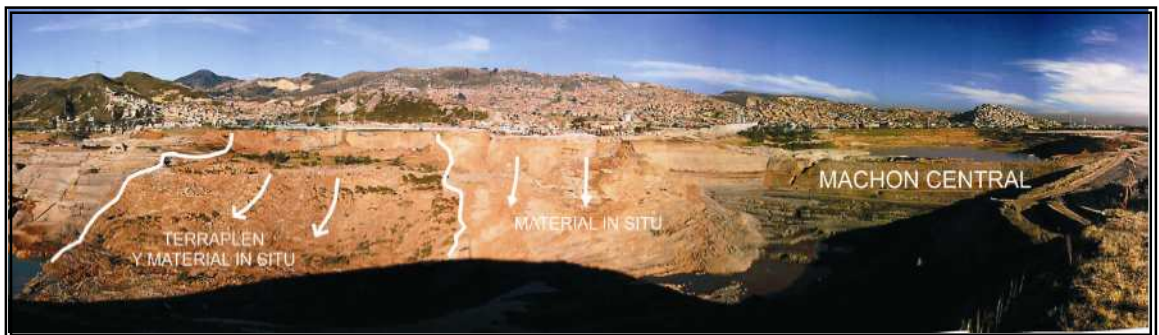
5.1.1 Secuencia del Movimiento.

Con base en información de campo y movimientos observados durante el colapso total se determina que la falla se inició en el talud de la Planta Trituradora, dentro del Talud Oeste de la mina – paralelo a la autopista al llano o Avenida Boyacá -.

Sector donde la secuencia de materiales está constituida principalmente de conglomerados cementados, bastante rígidos y frágiles, características que permiten considerar que la falla debió ser muy rápida como producto del deslizamiento de los conglomerados sobre el nivel de turbas y arcillas orgánicas ubicadas sobre la cota 2520 msnm (Fotografía 3 y 4, Figura 7)



Fotografía 3. Despegue de la falla en la cota topográfica 2520. Presencia de Turbas y arcillas orgánicas. Condición antes de la falla.



Fotografía 4. Las flechas de la derecha, Material in situ, muestran el bloque por donde se inició el movimiento. Bloque derecho que posteriormente arrastra el bloque izquierdo del terraplén y material in situ. La parte alta del Bloque izquierdo corresponde al terracedo y reconfiguración de un deslizamiento ocurrido en el año de 1993. Condición posterior a la falla.

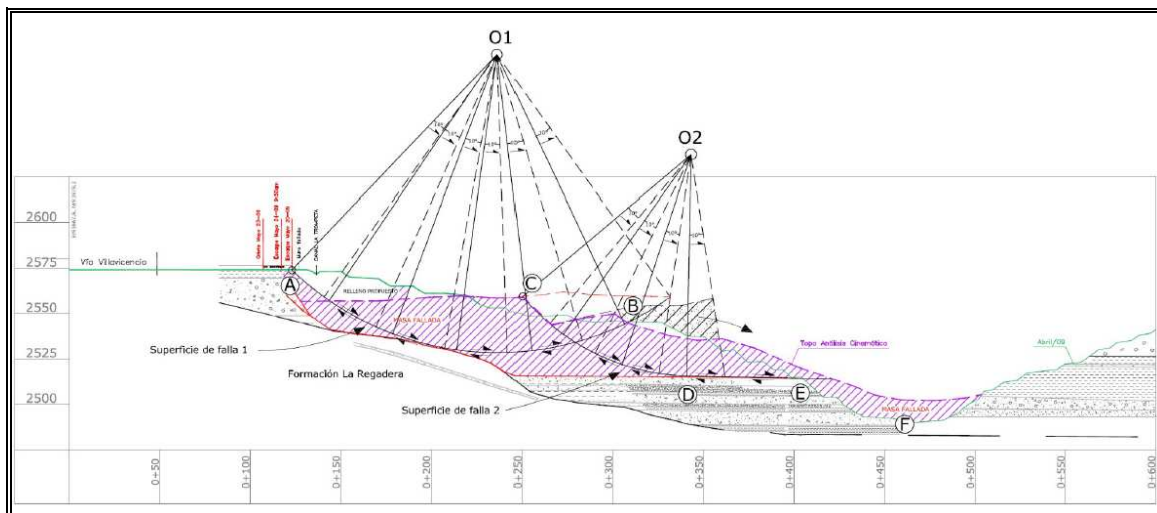


Figura 7 Secuencia de movimiento (Geología y Geotecnia Ltda.)

Entre los investigadores del deslizamiento del Talud de Codeipa se coincide que la falla se desarrolló sobre la capa de turba ubicada espacialmente sobre la cota 2520 msnm, cuyo movimiento genera fallas internas fraccionando el conjunto en grandes bloques.



Fotografía 5. Vista lateral de la masa deslizada y su fragmentación en bloques.

La morfología de la falla en grandes bloques, como se ilustra en la Fotografía 5 y en la Figura 7, muestra un gran escarpe hacia el oeste, de 30 a 40 metros de altura, un hundimiento de la corona de unos 20 a 30 metros y una rotación del orden de 10° en sentido contra horario, que genera hacia el Este, un escarpe

intermedio de unos 6m de altura. Empieza allí un ligero descenso de la superficie hasta llegar a ser muy plana en el contacto con el Talud Este



Fotografía 6. Morfología de la parte superior del deslizamiento.

Para Geología y Geotecnia Ltda., una de las empresas consultoras que participo de la investigación del deslizamiento, en un análisis cinemático del fenómeno esquematizado en la Figura 7, sugiere “que se presentaron dos movimientos casi simultáneos e interdependientes. En la parte inferior del talud, la superficie de falla, asumida aquí circular, desde C hasta D, con centro en O2, y planar de D a E, permitió el desplazamiento del material conglomerático hacia el fondo de la mina en F. El desconfinamiento que tal fenómeno produce, y la fuerza de arrastre en el área C-D, induce, simultáneamente, la movilización de la parte superior del talud sobre una superficie de falla, asumida aquí también circular, con centro en O1, y a lo largo del arco A-B”.

En mi concepto, el movimiento tiene un gran componente planar y traslacional, más que de tipo circular, con deslizamiento traslacional sobre el plano débil de las turbas y arcillas orgánicas. Al despegar la parte frontal de la masa deslizada deja espacios o vacíos para que el siguiente bloque en retroceso también se desplace produciendo una morfología de bloques basculados.

En términos generales es claro que en el mecanismo del movimiento, la superficie de falla tiene como despegue de la superficie de deslizamiento los niveles de turba y arcillas orgánicas, y por comprobar que esta superficie de falla se conecte y extienda al contacto con las rocas del terciario caracterizado en algunos sectores por la presencia de un paleosuelo –arcillas orgánicas y/o turbas, que poseen propiedades bajas de resistencia al corte similares a las capas lenticulares de turbas y arcillas interestratificadas en el depósito de gravas.

5.1.2 Evaluación de causas del deslizamiento.

Al elaborar curvas de cohesión requeridas contra la tangente del ángulo de fricción requerido (ver Figura 8) para el talud del sector donde se inicia el deslizamiento, considerando diferentes niveles de saturación. Ubicando en las mismas tablas los parámetros de resistencia obtenidos para la turba, se tiene:

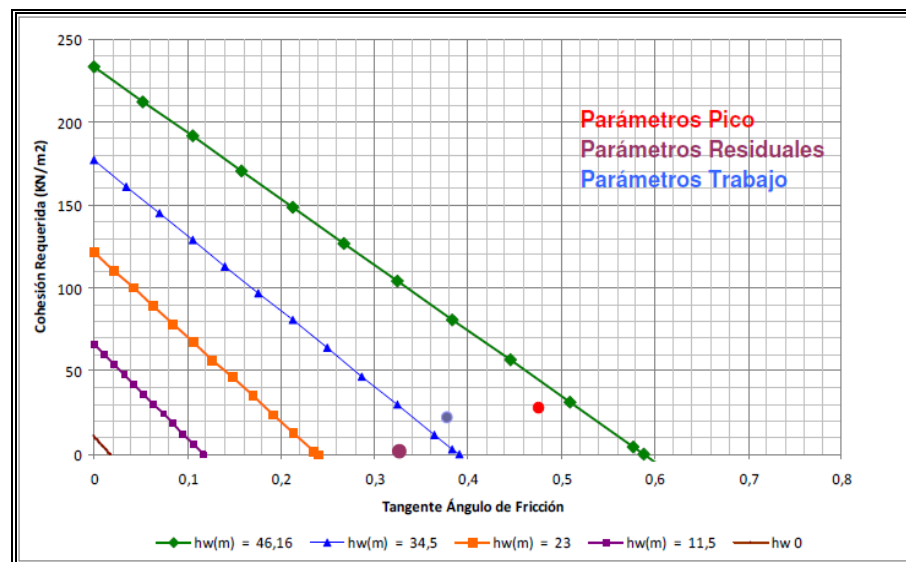


Figura 8. Cohesión requerida VS Ángulo de Fricción requerida. Fuente: Geología & Geotecnia

En las curvas se puede observar que, para la situación en la cual el talud del sector donde se inicia el deslizamiento se encuentra completamente saturado, los factores de seguridad son menores a la unidad para cualquier variación de parámetros de resistencia de la turba, Esto debido a que la curva verde se encuentra localizada por encima de las propiedades de resistencia del suelo, es decir, los parámetros de resistencia disponibles del suelo son menores que los requeridos para llegar a la falla.

Por lo anterior la causa o “detonante” principal es la pérdida de resistencia mecánica de las turbas por efectos del agua. Antes de la falla las posibles entradas o aportes del agua a la masa de suelo podrían corresponder:

- Aguas de proceso, usada para el lavado de finos.
- Aguas apozadas en las pilas y patios de producto terminado.
- Agua infiltrada sobre la masa de suelo cuyo aporte son las malas conexiones y conexiones fraudulentas con fugas de las casas del barrio Villa Jacky, ubicado en la parte alta del talud.
- Aguas infiltradas del lavadero de vehículos ubicado en la parte alta del talud fallado y colindante con el Barrio Villa Jacky.
- Aguas infiltradas del canal en tierra que corre paralelo al separador de la avenida Boyacá.
- Aguas infiltradas del canal de la Trompeta.

Como se aprecia se tiene el listado del posible aporte de aguas, pero no la cuantificación de la entrada del agua y su influencia sobre la masa, turbas y arcillas orgánicas del depósito aluvial. Queda la incertidumbre de cuál fue la fuente de aporte principal de agua que desencadenó la pérdida de las propiedades de la resistencia de las capas de turba.

5.2 PERFILES PARA ANÁLISIS GEOTÉCNICOS.

En el área de investigación para los análisis geotécnicos, se ubican secciones topográficas que tiene en cuenta la orientación de las condiciones geométricas son las más desfavorables para la estabilidad de los taludes que configuran el área de influencia de la masa fallada. Para el área de influencia del deslizamiento se determinaron para análisis de estabilidad y seguimiento a los programas de mitigación 4 perfiles, de Sur a Norte; perfiles: PC-38, PC-29, PC-1 y PC-27. Ver figura 9.

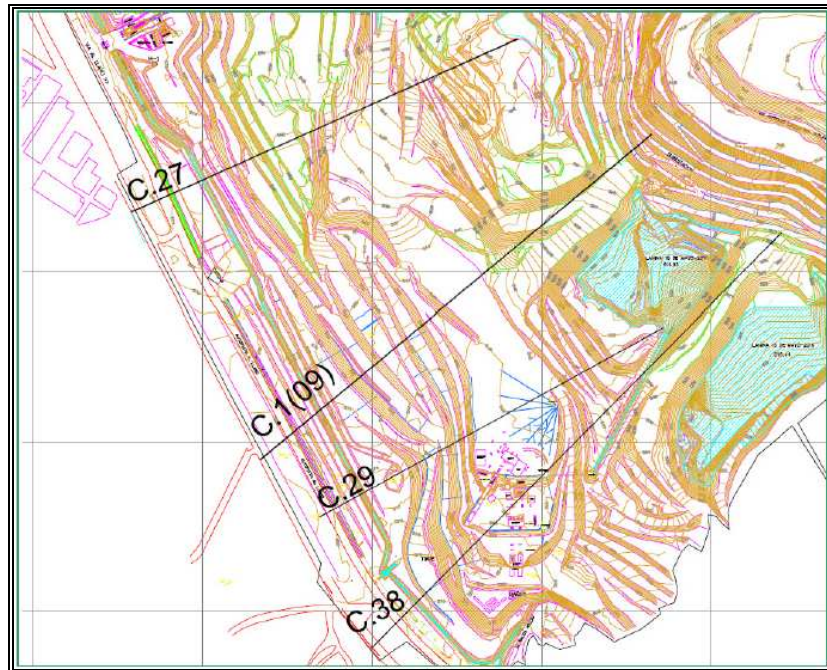
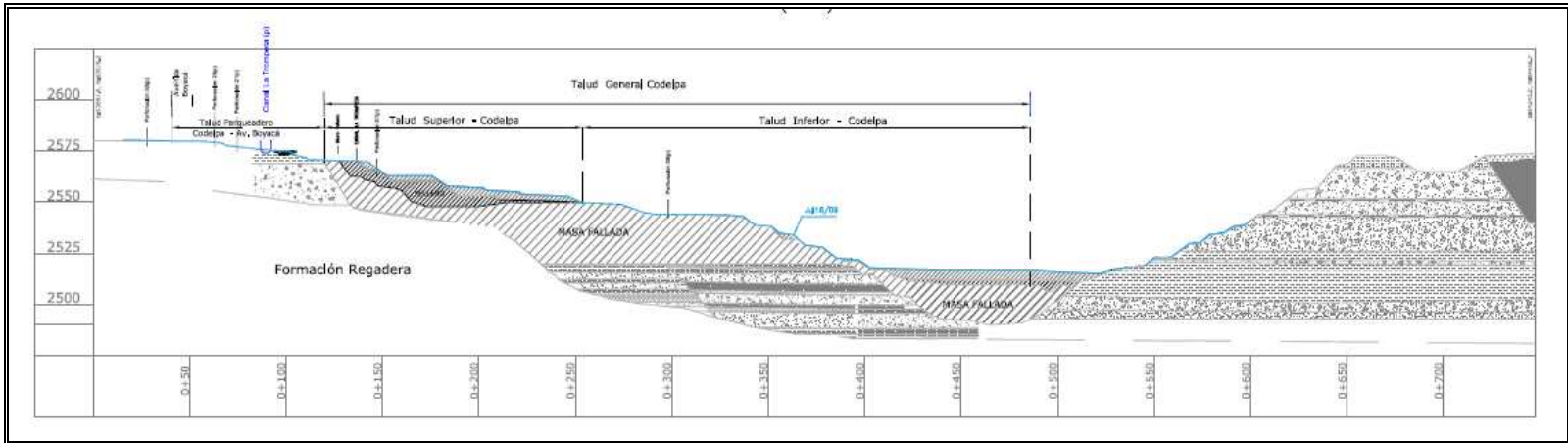
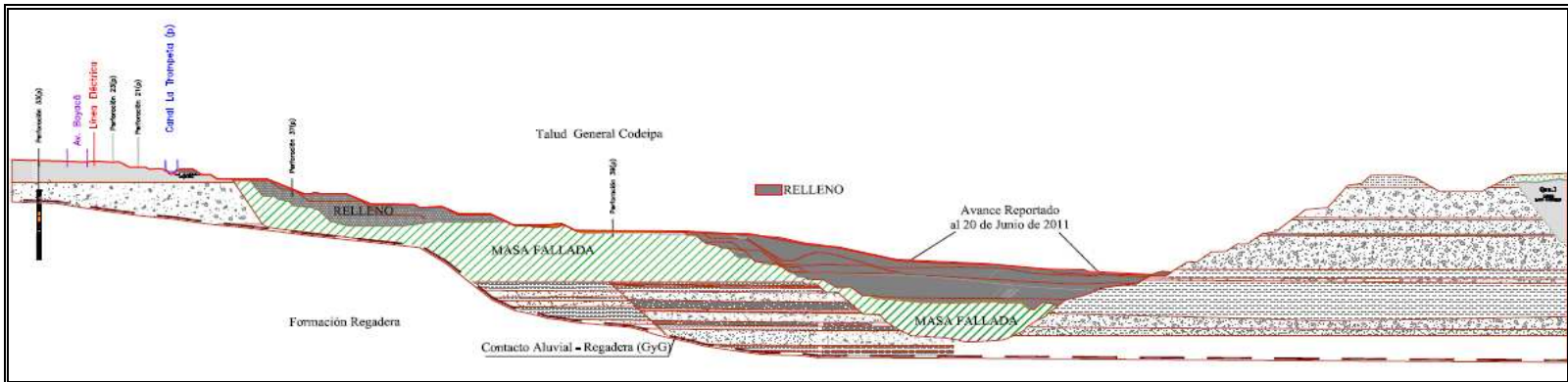


Figura 9. Ubicación de secciones topográficas para análisis geotécnicos en el área de influencia del talud minero Codeipa.

En la Figura 10 a la figura 13, se encuentran las secciones geológico – geotécnicas que se han empleado, a través del tiempo, para la realización de los análisis geotécnicos de estabilidad y seguimiento a evolución de las obras de mitigación planteadas.

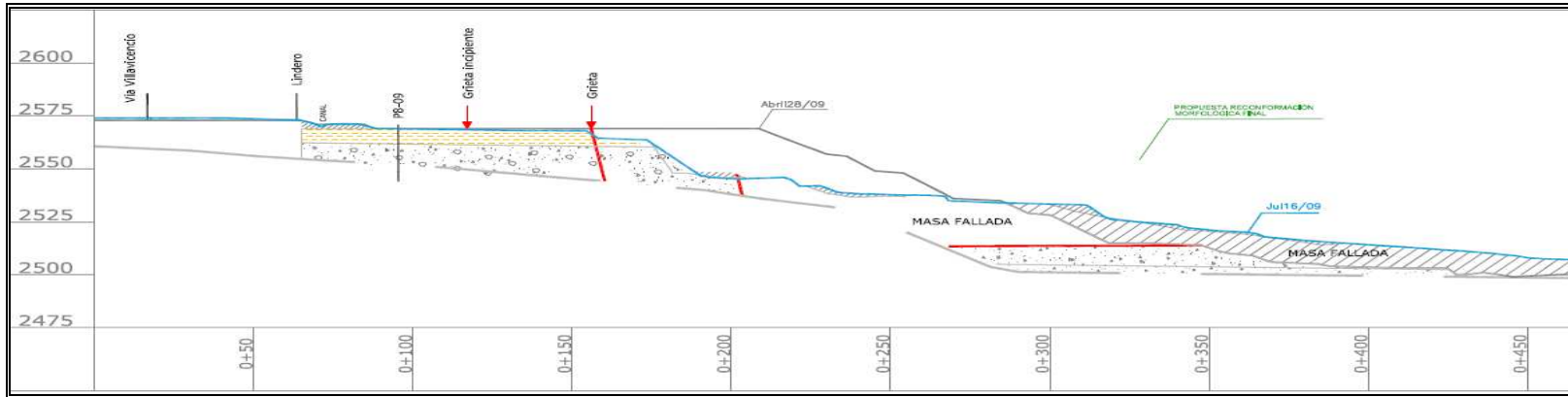


Fuente: Geología y Geotecnia Ltda. GYGINF_039. Agosto 2009

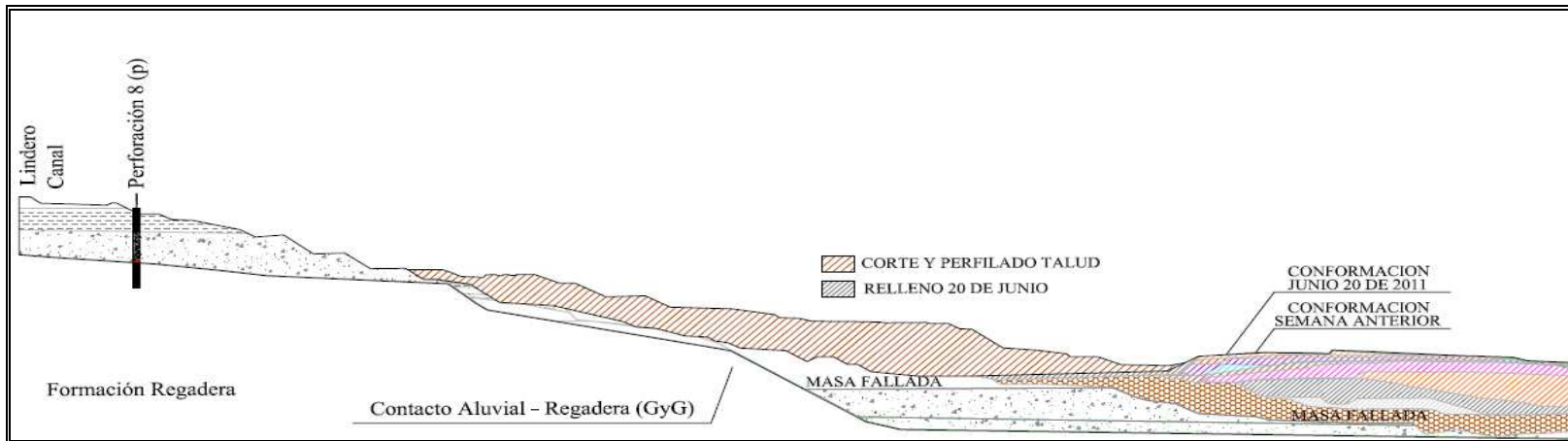


Fuente: Archivo Rafael Rincón. Junio 2011.

Figura 10. Perfil Geotécnico C1 (09). Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).

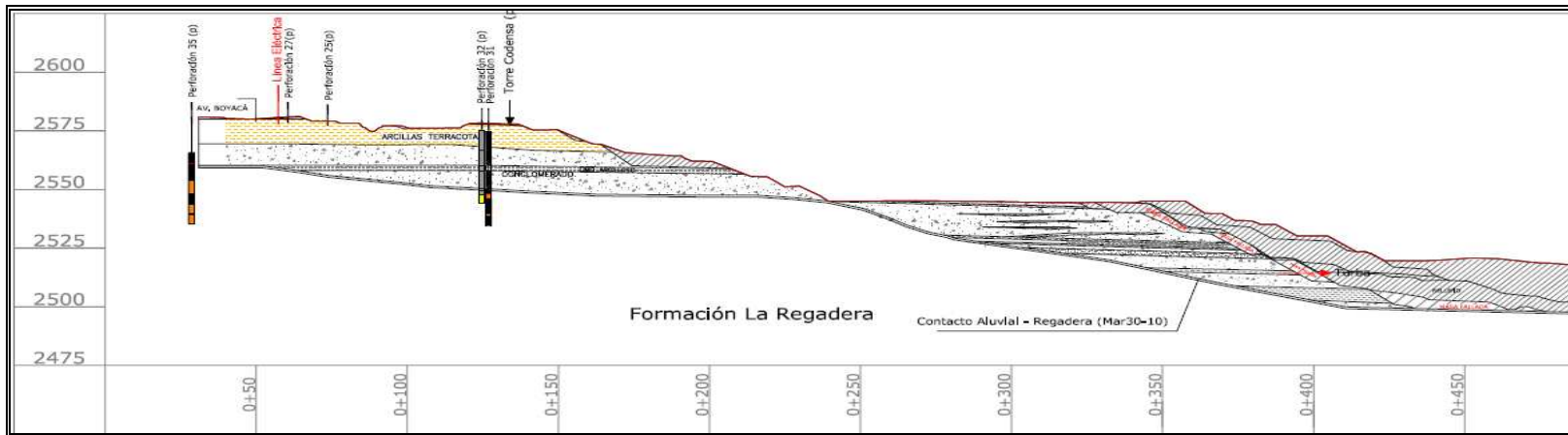


Fuente: Geología y Geotecnia Ltda. GYGINF_039. Agosto 2009.

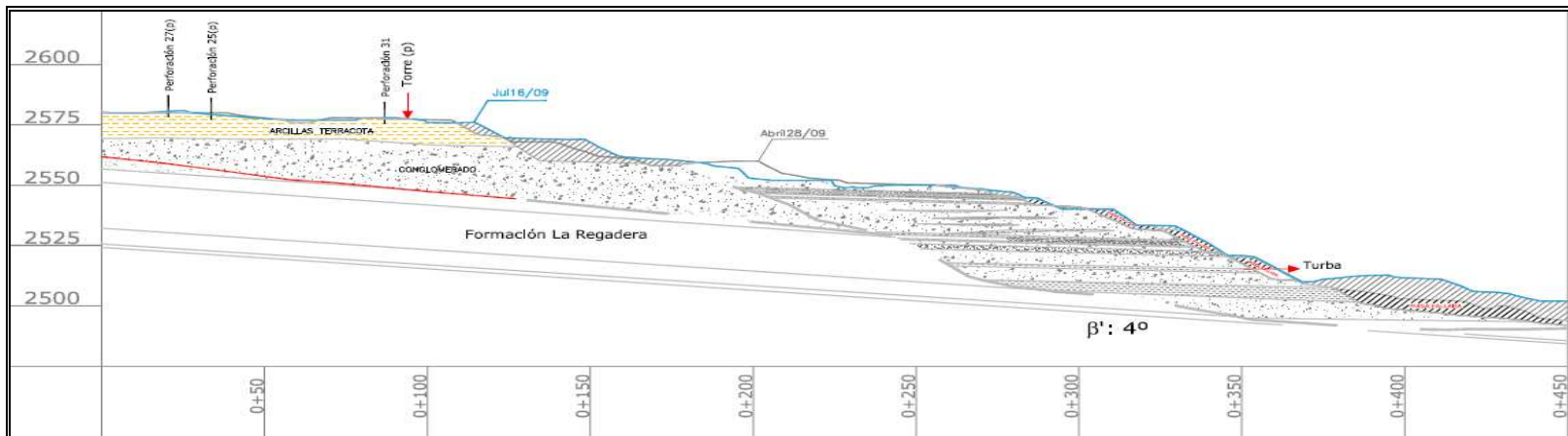


Fuente: Archivo Rafael Rincón. Junio 2011.

Figura 11. Perfil Geotécnico C27. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).

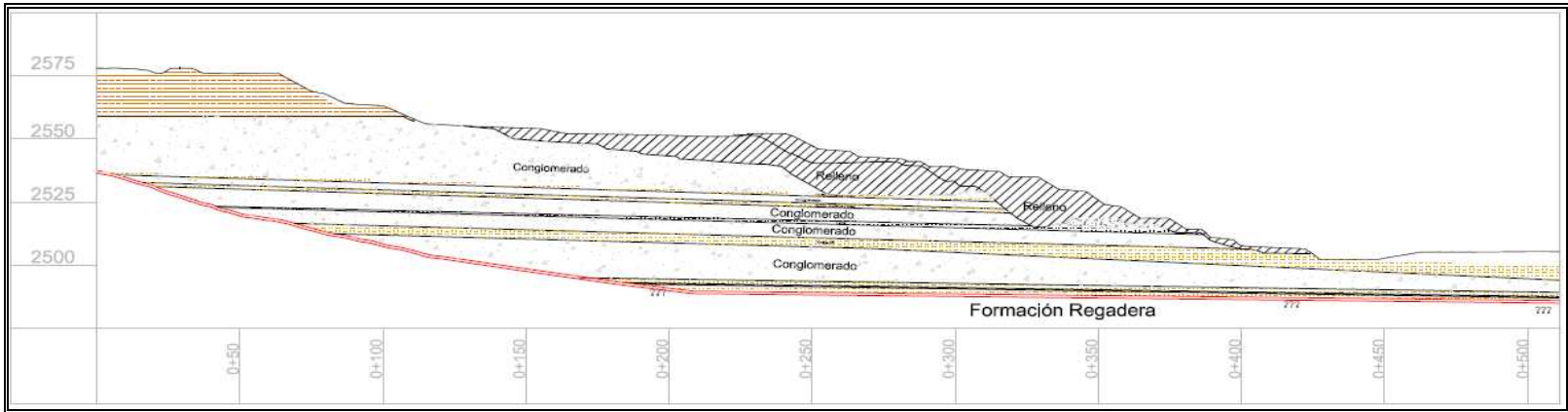


Fuente: Geología y Geotecnia Ltda. GYGINF_039. Agosto 2009.

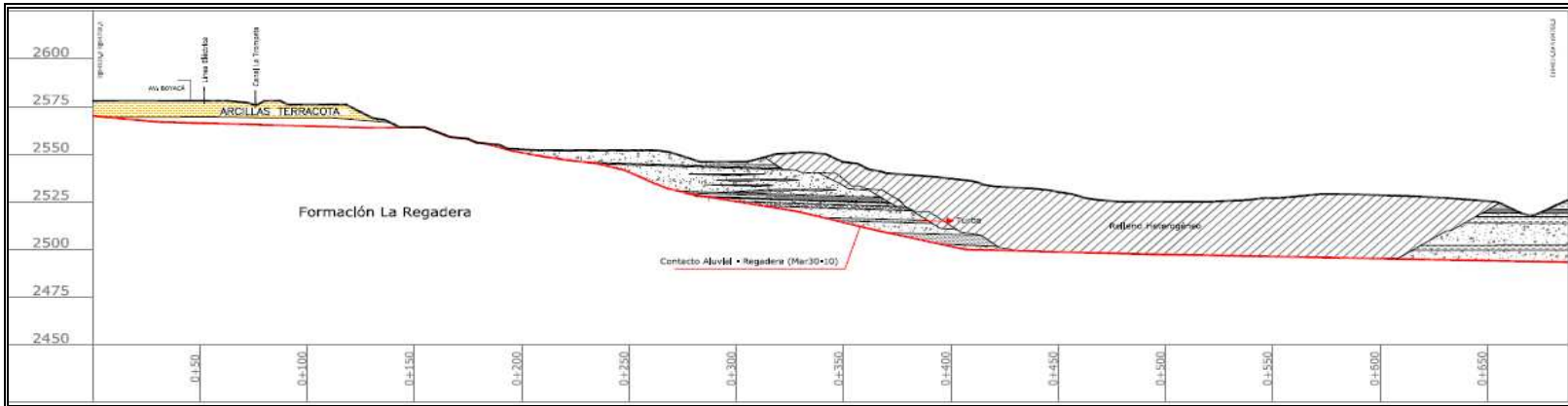


Fuente: Archivo Rafael Rincón. Junio 2011.

Figura 12. Perfil Geotécnico C29. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).



Fuente: Geología y Geotecnia Ltda. GYGINF_039. Agosto 2009.



Fuente: Archivo Rafael Rincón. Junio 2011.

Figura 13. Perfil Geotécnico C38. Litología actualizada con base registros obtenidos con base en perforaciones y Relleno técnico de contrapeso (obra de mitigación).

5.3 ANÁLISIS GEOTÉCNICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES Y EVALUACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA. DOS MESES DESPUÉS DEL DESLIZAMIENTO.

A los dos meses de ocurrido el deslizamiento, con el modelo geológico y secciones geotécnicas definidas en el numeral 5.2, con la morfometría de los taludes actualizada y empleando los parámetros geomecánicos registrados en la tabla 1, se realizó el análisis de estabilidad de los taludes considerados más críticos por medio del programa interactivo Slide 5.04, usando el Método del Equilibrio Límite de “Bishop Simplificado”. Los análisis geotécnicos determinísticos consideran las condiciones ambientales críticas del efecto de un sismo con aceleración horizontal $a_h = 0.2g$ (microzonificación sísmica de Bogotá) y el agua simulando taludes parcialmente saturados.

La saturación de la masa rocosa se simuló mediante el coeficiente de presión de poros, ru , que es igual al peso unitario del agua por la altura de agua sobre el peso unitario del suelo por la altura del suelo. Es decir el valor puede variar entre 0 para seco y 0.42 para el material saturado. Debido a las condiciones hidrológicas del área, donde predomina la evaporación, se asume un valor de ru para el análisis geotécnico de:

Tabla 2. Valores RU

Material	% de Saturación	Ru
Conglomerado	25%	0,10
Arcillas	30%	0,15
Turbas	30%	0,15

Coeficiente de presión de poros (Ru):

$$Ru = \frac{u}{\gamma_t H_s}$$

Donde:

u : Presión de poros

γ_t = peso unitario total

Hs altura de la columna de suelo

El nivel de Amenaza se valora con base en la resolución 227 del 13 de Julio de 2006, (Reglamentación de la DPAAE) la cual se basa en el valor del factor de seguridad, FS, obtenido en los análisis de estabilidad.

Tabla 3. Evaluación Amenaza DPAAE.
Resolución 227 de Julio 18 de 2008

a) Nivel de Amenaza en Condición Estática

Nivel de Amenaza	Condición Normal FS
Baja	> 1.9
Media	1.2 - 1.9
Alta	< 1.2

b) Nivel de Amenaza en Condición Extrema

Nivel de Amenaza	Condición Extrema (50 años) FS
Baja	> 1.9
Media	1.2 - 1.9
Alta	< 1.2

Los resultados de los análisis geotécnicos obtenidos se presentan en la Tabla 4, Análisis de estabilidad condición: post – deslizamiento: 2 meses. En la tabla se relaciona el tipo de mecanismo de la falla geotécnica con el que se realizan los respectivos análisis y los resultados en términos del Factor de seguridad, FS;

El factor de seguridad, FS, se define (etsecpb, 2005) como el valor que cuantifica la diferencia entre las condiciones reales que presenta el talud, y las condiciones que llevan a su rotura. El factor de seguridad es el coeficiente mínimo de todos los coeficientes de seguridad asociados a todas las superficies de deslizamiento posible, donde:

$$FS = \frac{\int \tau_R \cdot ds}{\tau \cdot ds}$$

Donde :

τ_R = es la resistencia al corte máxima que se puede movilizar a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento.

τ_m = es la resistencia al corte movilizada a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento.

ds = es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie de deslizamiento.

Cuando $FS < 1$, el movimiento a lo largo de la superficie es posible. En el caso que se presenten distintas superficies, con $FS < 1$, el movimiento es posible a lo largo de todas ellas.

Tabla 4. Análisis de estabilidad Condición Post-Deslizamiento: 2 meses

Perfil	Talud Análisis	Tipo de Falla	Estático	0.1g	0.2g	Amenaza 0.2g	Amenaza Estático
C38	Talud General	Circular-Slope Search					
	Talud Superior	Circular-Slope Search					
C29	Falla Contacto Reg.	No Circular-Block Search	1,96	1,47	1,15	Media	Baja
	Falla Relleno	Circular-Slope Search	1,42	1,18	1,00	Media	Media
	Talud Superior	Circular-Slope Search					
C1	Codeipa General	Contacto Terciario	2,24	1,49	1,06	Media	Baja
	Codeipa Superior	Contacto Terciario	1,73	1,30	1,01	Media	Media
	Codeipa Inferior	Circular-Slope Search	1,40	1,04	0,82	Alta	Media
C27	Manas General CDR	Contacto Terciario	1,24	0,88	0,66	Alta	Media
	Manas Circular	Circular - Slope Search					
	Manas Superior	No Circular-Block Search					

Fuente Datos: Geología & Geotecnia Ltda

La evaluación del modelamiento geotécnico en los perfiles de análisis del talud deslizado Codeipa, enseña que sólo cumple con los niveles de amenaza requeridos por la DPAE en condiciones estáticas para el perfil PC-29 (análisis de falla por contacto, tipo de falla No circular-Investigación de Bloque) y perfil C1 (análisis de falla general, tipo de falla No circular – Investigación de Bloque por el contacto con el terciario). Los demás perfiles y tipos de fallas analizadas (condición estática y sismo $a_h=0.2g$), no cumplen con lo requerido en la norma DPAE, presentando niveles de amenaza medio y alto. Ver los resultados gráficos de los análisis de estabilidad en las Figuras 14, 15 y 16.

Las medidas y obras de mitigación propuestas se deberán enfocar al cumplimiento de los niveles de amenaza solicitados por la DPAE en la resolución 227 de 2006.

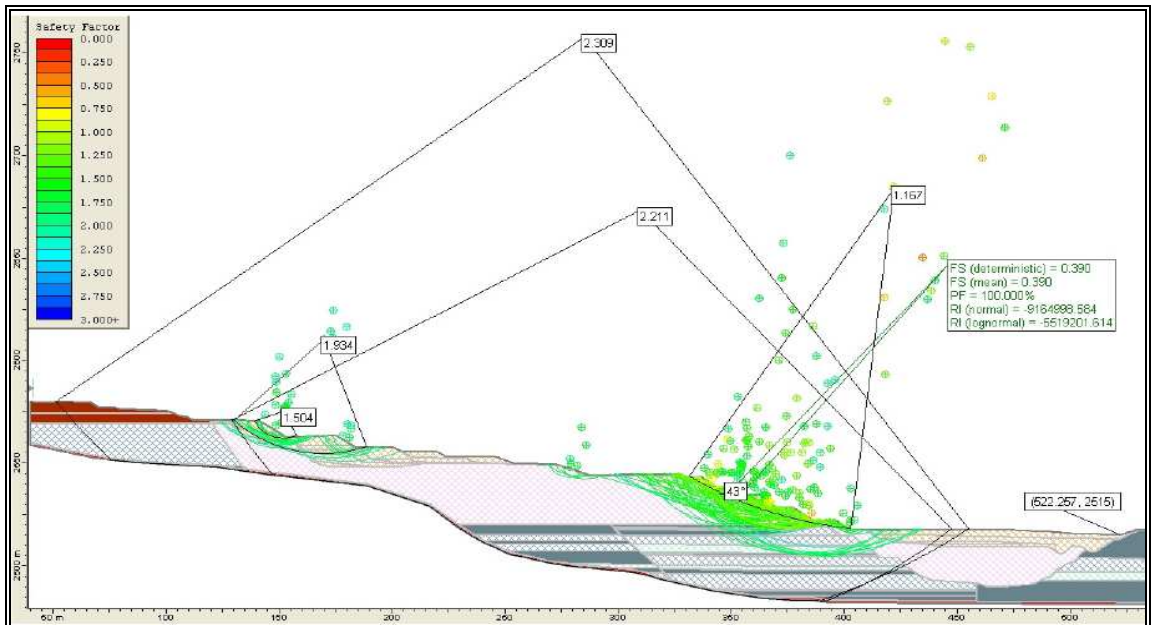


Figura 14. Talud Codeipa P-C1. Análisis Estático para la condición de julio de 2009 (Fuente: Geología & Geotecnia Ltda)

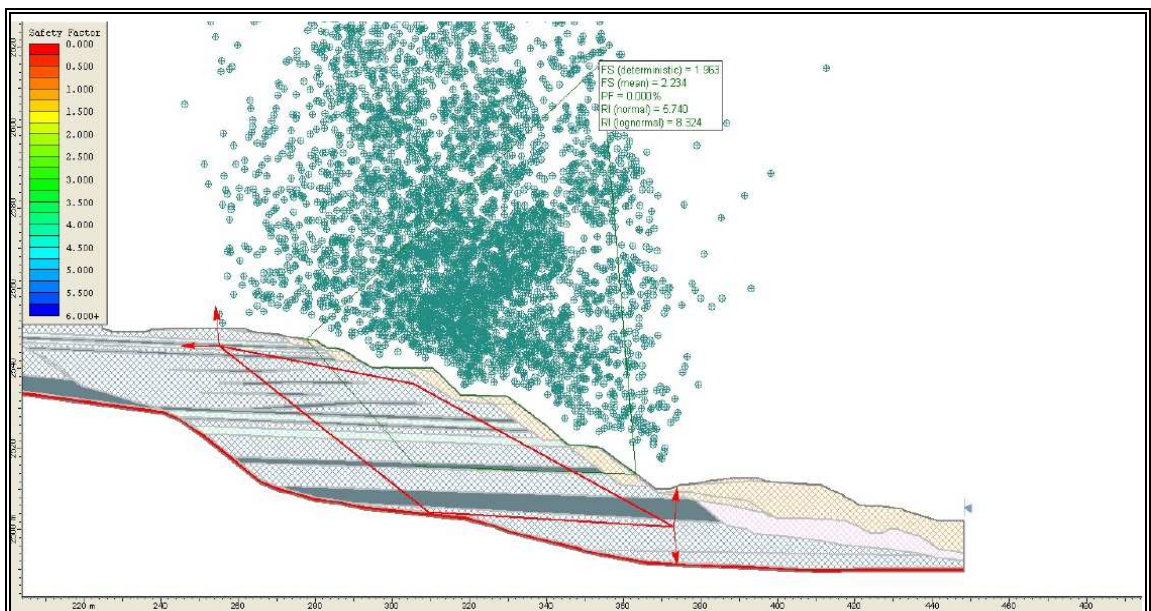


Figura 15. Perfil C29. Análisis de superficies de falla en condición estática. Julio de 2009 (fuente: Geología y Geotecnia Ltda).

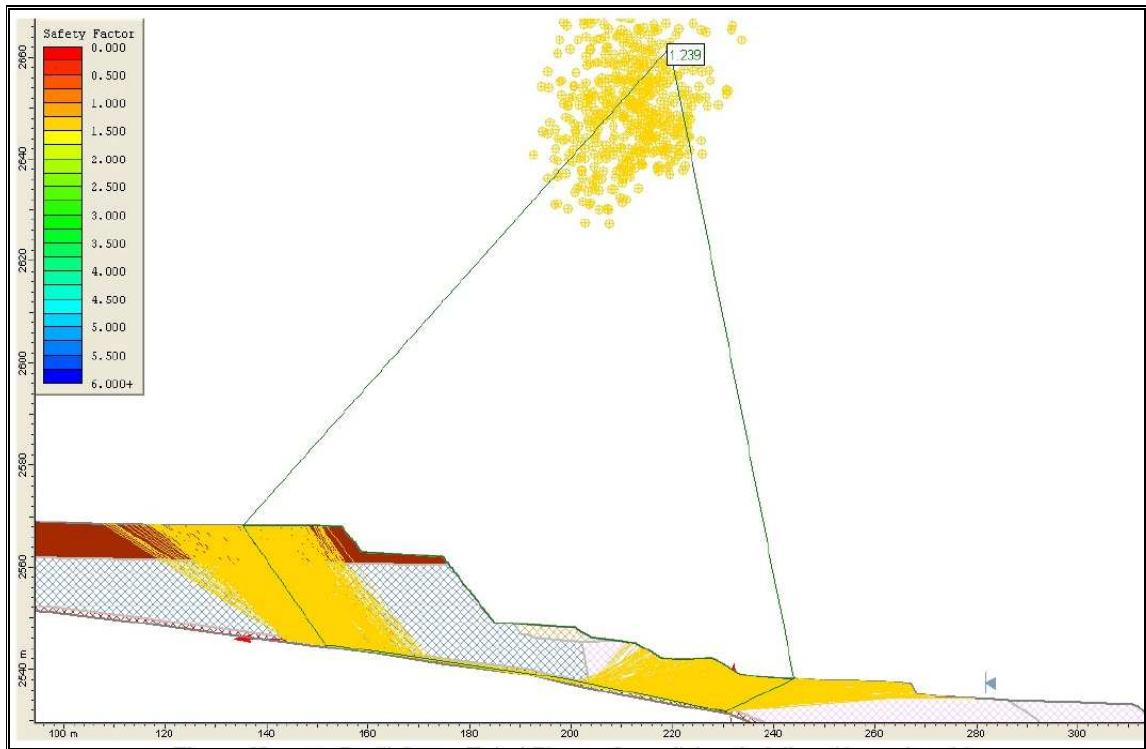


Figura 16. Perfil PC-27.

Superficies de falla críticas para condición estática. Análisis de falla general por el contacto con el terciario (Fuente: Geología & Geotecnia Ltda.).

5.4 MAPA DE AMENAZAS.

La Figura 17, corresponde al plano de Amenazas en condiciones dinámicas con la presencia de un sismo con aceleración horizontal $a_h = 0.2g$ y la Figura 18, corresponde al mapa de amenazas en condición estática. Los niveles de Amenaza están definidos por la DPAE y se encuentran en la Tabla 5 de este documento. Los mapas de amenazas de manera integral abarcan todos los taludes mineros e incluye el sector del deslizamiento, Talud Codeipa”.

El mapa es el producto de los análisis geotécnicos bidimensionales realizados en los taludes mineros de las minas del Tunjuelo operadas por Cemex y cubre el área del deslizamiento. Éstos mapas son una herramienta de planificación que permite

dirigir acciones y esfuerzos, enfocando y priorizando los programas de reconformación en los lugares donde la amenaza es alta o media. En los mapas de amenaza referenciados anteriormente, los programas y obras de mitigación se deben enfocar en los sectores coloreados en rojo, los cuales que se encuentran según los análisis geotécnicos en Amenaza Alta.

Tabla 5. Memoria Plano de Amenaza en Condiciones Ambientales Críticas (0.2g)

Area	Perfil	Talud Análisis	Tipo de Falla	Estático	0.1g	0.2 g	Amenaza 0.2 g
8151	C38	Talud General	Circular-Slope Search	2,408	1,797	1,421	Baja
		Talud Superior	Circular-Slope Search	2,041	1,650	1,371	Baja
	C29	Falla Contacto Reg.	No Circular-Block Search	1,683	1,346	0,98	Alta
		Falla Relleno	Circular-Slope Search	1,774	1,34	1,064	Media
		Talud Superior	Circular-Slope Search	2,33	1,731	1,304	Baja
	C1	Codeipa General	Contacto Terciario	2,99	1,651	1,133	Media
		Codeipa Superior	Contacto Terciario	2,263	1,312	0,912	Alta
		Codeipa Inferior	Circular-Slope Search	2,187	1,732	1,289	Media-Baja
	C27	Manas General CDR	Contacto Terciario	2,189	1,382	0,99	Alta
		Manas Circular	Circular - Slope Search	2,209	1,399	1,016	Media
		Manas Superior	No Circular-Block Search	2,574	1,814	1,238	Media
	C31	Lago Carrillo	No Circular-General	1,985	1,436	1,110	Media
		Lago Carrillo	No Circular-Turba	1,441	0,985	0,729	Alta
	RM 056	C17	Carrillo - Dique 1	Circular - Grid Search	1,367	1,106	0,917
C5		Avda Boyacá	No Circular-Block Search	2,007	1,698	1,320	Baja
C7		Paralelo B. México	No Circular-Block Search	3,382	1,922	1,236	Media
C35		B. México	No Circular-Block Search	1,081	0,866	0,712	Alta
		B. México	No Circular-Block Search	1,164	0,970	0,813	Alta
C33		Machón Central	No Circular-Block Search	2,237	1,536	1,157	Media
C32		Machón Central TW	Circular - Slope Search	1,993	1,408	1,071	Media
PC		Katamaná	No Circular-Block Search	1,765	1,156	0,826	Alta
C10		Santa María Pozo Azul N	No Circular-Block Search	3,137	1,625	1,085	Media
		Dirección Pozo	Circular - Slope Search	1,759	1,644	1,230	Media
C11		Santa María Pozo Azul	No Circular-Block Search	2,991	1,865	1,335	Baja
		Dirección Pozo	Circular - Slope Search	2,797	2,016	1,38	Baja
C12		Santa María PA	No Circular-Block Search	1,455	1,161	0,975	Alta
		Dirección Pozo	No Circular-Block Search	2,680	1,982	1,63	Baja
C32		Machón Central TE	No Circular-Block Search	5,010	1,932	1,207	Media
C8		México. Río Tunjuelo	Circular - Grid Search	1,577	1,347	1,16	Media
		B. México	Circular - Slope Search	3,491	2,762	2,91	Baja
C9	México. Río Tunjuelo	Circular - Grid Search	1,879	1,535	1,288	Media	
	B. México	Circular - Slope Search	2,171	2,605	2,766	Baja	
C 13	Guaquera - Pozo Azul	Circular - Grid Search	2,339	1,603	1,186	Media	
C14	Guaquera - Artilleria	Circular - Grid Search	2,93	1,771	1,301	Baja	
C15	Carrillo - Guaquera	No Circular-Block Search	2,445	1,578	1,116	Media	

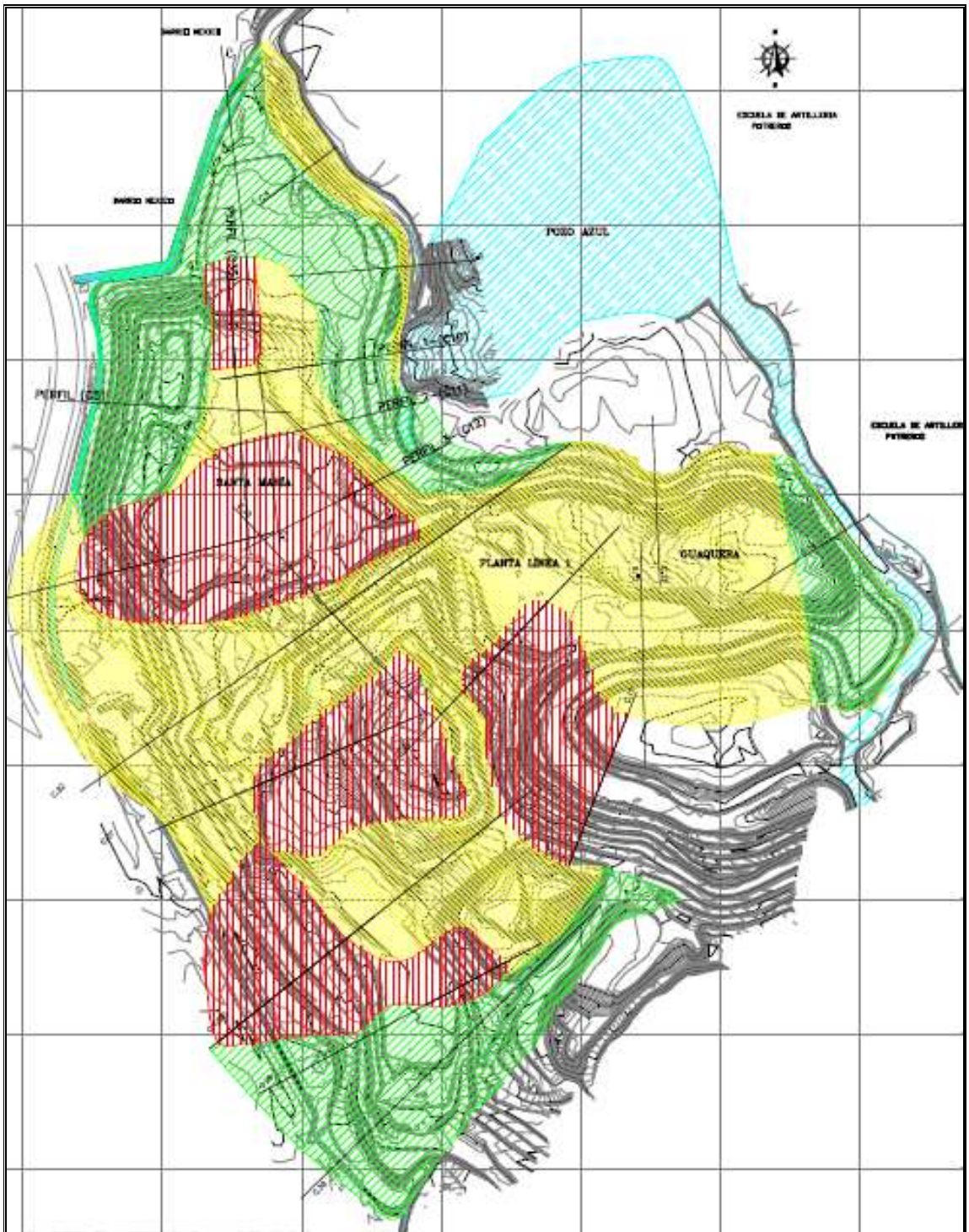


Figura 17. Plano de Amenazas para análisis geotécnico en condiciones ambientales de un sismo con $a_h=0.2g$. (Elaboró: Rafael Rincón) Rojo: Amenaza Alta – Amarillo: Amenaza Media – Verde Amenaza Baja.

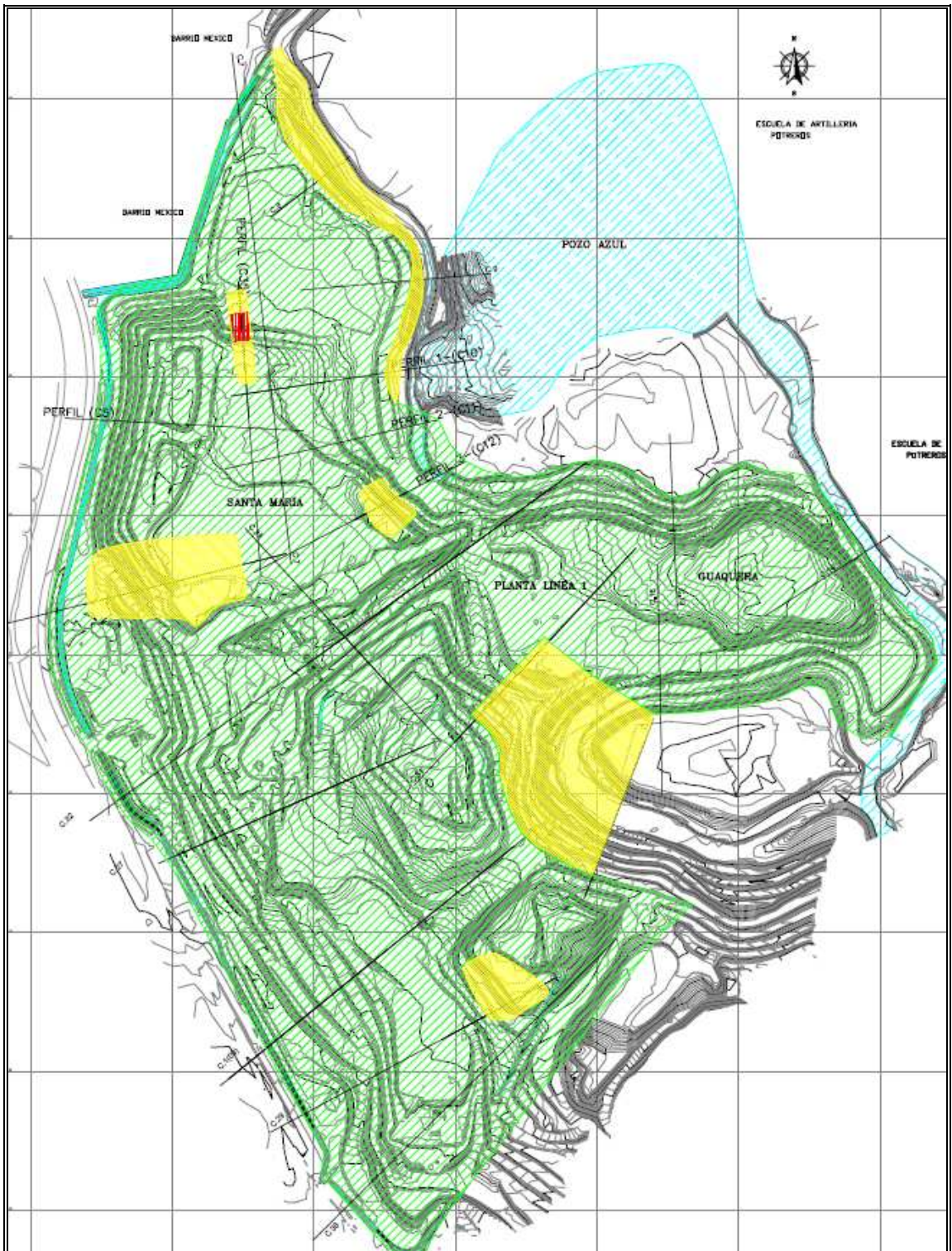


Figura 18. Plano de Amenazas para análisis geotécnico en condiciones actuales. (Elaboró: Rafael Rincón). Estática Amenaza Alta – Amarillo: Amenaza Media – Verde Amenaza Baja.

6. OBRAS Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN.

Las características morfológicas, litológicas, sedimentológicas, de resistencia de los materiales e hidrológicas, que hacen parte del área de influencia del deslizamiento permiten considerar las siguientes obras de mitigación:

- **Obras hidráulicas** de drenaje superficial como cunetas, zanjas en tierra y Obras para el manejo de las aguas subsuperficiales e infiltración, entre ellas, drenes sub horizontales, trincheras drenantes y filtros volumétricos.
- **Obras y técnicas de estabilización del terreno**, como cortes y retiro de material fallado en la parte superior y adecuación de contra pesos en la parte inferior. El terraceo acompañado del sellado de grietas.
- **Obras Verdes**, definidas en reforestación y revegetalización con especies nativas que desarrollan raíces profundas. Entre este tipo de obras se tienen las obras biomecánicas para controlar y prevenir efectos de erosión y deslizamientos.

6.1 OBRAS Y TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN

6.1.1 Medidas y Acciones Inmediatas al deslizamiento.

La corona del deslizamiento quedó a pocos metros de distancia y mantuvo en riesgo que por efectos de fallas retrógresivas pueden afectar dos estructuras civiles de importancia para la ciudad de Bogotá, el corredor oriental de la avenida Boyacá y torres de interconexión eléctrica nacional. Adicionalmente, la masa deslizada quedo profundamente fisurada. Ver Fotografía 7.

6.1.2 Sellado de Grietas y Densificación del Terreno.

Las acciones inmediatas ejecutadas son el sellado de grietas y densificación del terreno por medio mecánico a través del uso de buldózer tipo D7 (peso 25 ton), D8 (peso 30 ton) y D9 (35 ton). La dirección primordial de trabajo de los tractores es Oriente – Occidente de tal manera que el material arrastrado por las cuchillas confinan la pata del talud de la corona del deslizamiento contra la avenida Boyacá. El fin es evitar la infiltración de aguas lluvias en la masa deslizada, mejorar la resistencia al corte de la parte superior y confinar parcialmente la pata del escarpe de falla.



Fotografía 7. Operación de buldózer según indica la flecha: de acuerdo a la topografía de abajo hacia arriba, confinando la parte baja del escarpe de falla.

6.1.3 Cortes en la parte alta del talud y Contrapesos en la parte inferior.

Cortes de material in situ en el sector del escarpe de falla, su traslado a la parte inferior de la masa fallada y contra el escarpe de falla para restarle altura al escarpe del talud fallado. Adicionalmente, se adecuó como contrapeso escombros no clasificados provenientes de las obras de trasmilenio de la ciudad de Bogotá.



Fotografía 8. Descabece en la parte alta de la corona del deslizamiento.



Fotografía 9. Terraceo en el escarpe del talud fallado y construcción de contrapesos en la parte baja y media del talud deslizado.



Fotografía 10. Disposición técnica, en la parte baja de la masa deslizada, de escombros como contrapeso de estabilización.

6.1.4 Manejo de Aguas infiltradas.

La acción se dirige a reducir al máximo los efectos negativos del agua – disminución de la presión de poros- infiltrada o subterránea y el agua superficial o de escorrentía que pueda ingresar a la masa deslizada. El manejo se concentró sobre los flujos de agua que aparecieron sobre los flancos del deslizamiento y en algunos sectores de la masa fallada donde aparecieron frentes húmedos. Para evacuar éstas aguas se construyeron y tallaron por medio de una excavadora zanjas en tierra y se condujeron a los puntos más bajos del pit minero, para de allí ser bombeada a un lago que cuyo régimen hidrológico es independiente al área de influencia del deslizamiento.

Aquí, a juicio del autor, se recomienda:

- Usar una excavadora de brazo largo que permita buscar o llegar hasta el punto donde aflora el agua, captar está agua, controlar su flujo en canales tierra e incorporarla en un diseño de manejo de aguas que la conduzcan a lugares donde minimice su efecto sobre la masa deslizada.



Fotografía 11. Afloramiento de aguas internas en la masa deslizada.



Fotografía 12. Canalización y evacuación de aguas que aparecieron en el flanco derecho del deslizamiento

- Si las condiciones de estabilidad de las cunetas o zanjas en tierra lo permiten, se recomienda mantener abiertas las cunetas unos días para observar su comportamiento con relación al volumen o caudal, para ello hay que implementar puntos de aforo y medidas permanentes cada doce horas. Simultáneo se debe hacer el levantamiento topográfico para su localización espacial, ya que es información relevante que se emplea para definir los diseños geométricos para el manejo global de las aguas e incluirlas en los análisis de estabilidad.
- Cuando las condiciones de estabilidad de las zanjas o cunetas excavadas no son buenas, se deben construir lo más pronto posible, filtros volumétricos o trincheras drenantes en piedra de dimensiones menores a 15 centímetros de arista mayor, recubiertos con geotextil 1600 NT. Aunque continúe la deformación en la masa deslizada, en su movimiento, éstas estructuras de drenaje aportarán algo de resistencia al corte.

6.1.5 Obras y técnicas de Estabilización que permiten cumplir con la resolución 227 de 2006 exigida por la Dirección de Emergencias Prevención y Atención de Desastre de la ciudad de Bogotá –DPAE-.

El cumplimiento a mediano y largo plazo con los parámetros mínimos de estabilidad exigidos por la DPAE con relación a la estabilidad y nivel de amenaza en el deslizamiento del talud Codeipa, se propone a través de un diseño de reconfiguración morfológica con carácter de estabilidad geotécnica, y su ejecución consiste en la disposición técnica de materiales externos (rellenos) en los sectores donde se presentó el deslizamiento. Los conceptos iniciales de reconfiguración morfológica y análisis geotécnicos de estabilidad los elaboró la firma consultora Geología & Geotecnia Ltda. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran los resultados de los análisis de estabilidad para el Diseño Final en términos del factor de seguridad y en las Figura 19 a Figura 21 los resultados gráficos de los análisis de estabilidad.

Tabla 6. Análisis de Estabilidad Diseño Morfológico Final

Perfil	Talud Análisis	Tipo de Falla	Estático	0.1g	0.2g	Relleno Hidráulico
C26	Talud General	Circular-Slope Search	2,85	2,07	1,59	Cota
	Nivel Amenaza		Baja	Baja	Baja	2535
C29	Falla Contacto Reg.	No Circular-Block Search	2,82	1,92	1,44	
	Nivel Amenaza		Baja	Baja	Baja	
C1	Codeipa General	Contacto Terciario	4,5	2,03	1,29	
	Nivel Amenaza		Baja	Baja	Media-Baja	
C27	Manas General CDR	Contacto Terciario	3,9	1,94	1,28	
	Nivel Amenaza		Baja	Baja	Media-Baja	

Fuente Datos: Geología & Geotecnia Ltda

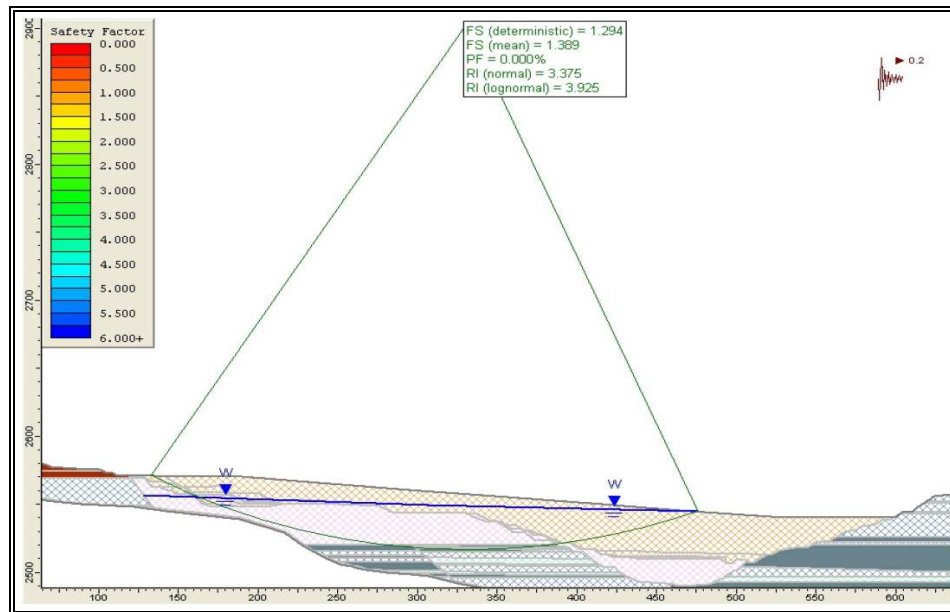


Figura 19. Perfil C1. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconfiguración. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde FS= 1.294 (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).

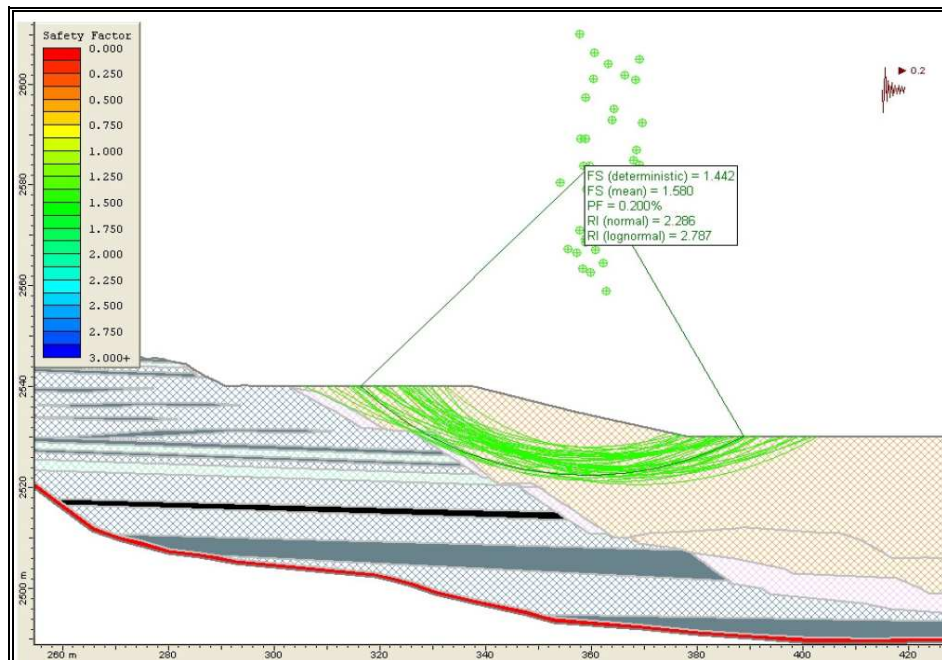


Figura 20. Perfil C29. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconfiguración. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde FS= 1.442 (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).

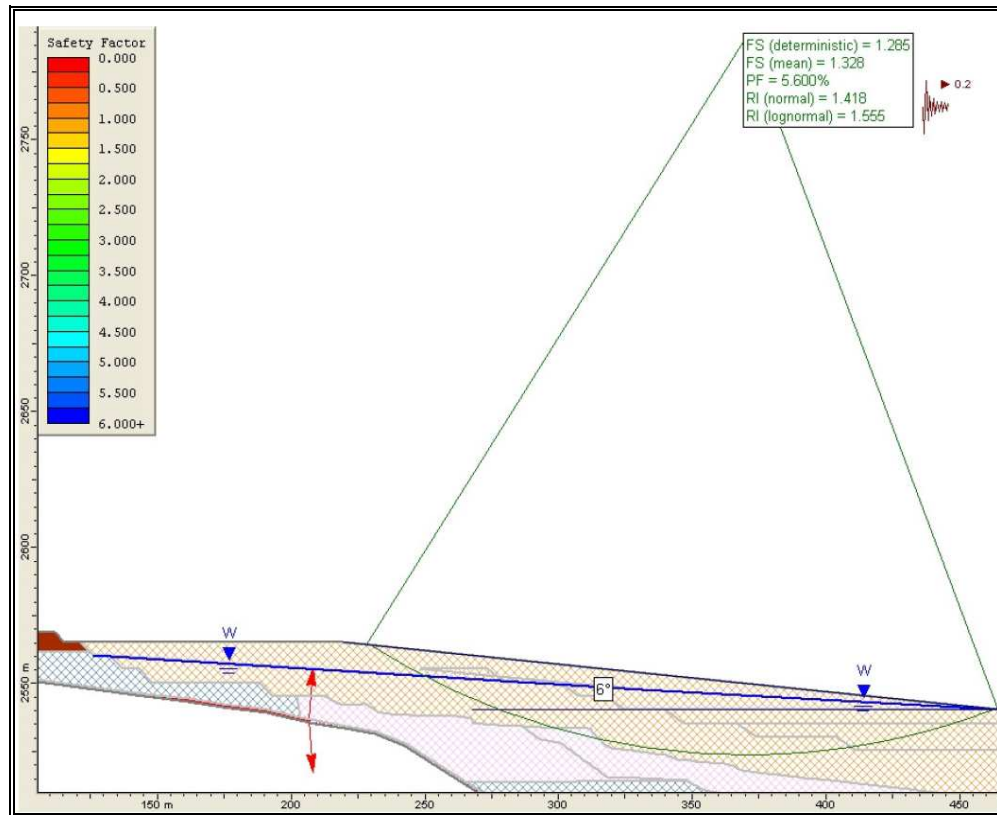


Figura 21. Perfil C27. Superficies de falla críticas obtenidas para el Diseño Final de Reconformación. Cumple con la norma 227 de 2006 requerido por la DPAE, Donde FS= 1.285 (análisis dinámico con $a_h=0.2g$ y talud parcialmente saturado).

El alcance del diseño de reconformación morfológica se extiende a toda el área de influencia de las excavaciones mineras de Cemex Colombia en el sector de las minas el Tunjuelo. Ver Figura 22. Diseño Reconformación Morfológica Final del área minera de Cemex Colombia S.A.

El plan de restauración morfológica Final el cual hace parte de las obras de mitigación requeridas para estabilizar el Talud de Codeipa, cumple con los Factores de Seguridad para FS=1.3 con sismo de aceleración 0.2g. La geometría del diseño considera tres diques cuya estructura se adosan y contrapesan en el oriente el talud del Sector de Carrillo –talud contra el antiguo cauce de río Tunjuelo – y al occidente el talud que colinda con la avenida Boyacá. En el espacio entre

los diques se dispondrán los lodos provenientes del proceso de lavado y beneficio de la planta de trituración línea 2.

El diseño de la restauración final del pit minero cuenta las siguientes características geométricas:

Angulo del talud final de diseño: 5°. Longitud máxima de relleno con relación a un plano horizontal 490 metros. Cotas de relleno: Cota inferior: 2.540 m.s.n.m. y Superior 2.569 m.s.n.m.

Taludes parciales: longitud de las bermas: entre 10 y 100 metros. Altura entre terrazas: 5 metros. Ángulo de los taludes: 36°.

Relleno de escombros entre las cotas 2.545 m.s.n.m. y 2.565 m.s.n.m., ángulo de inclinación del relleno: 5°, longitud en la horizontal del relleno: 160 metros.

6.1.6 Recomendaciones Técnicas sobre la Reconformación Morfológica. (Contrapesos Geotécnicos).

En la adecuación y conformación de materiales térreos y escombros que se usarán como contrapesos geotécnicos de las obras de mitigación planteadas en el Diseño de Reconformación Final, se deben considerar los siguientes lineamientos técnicos:

6.1.6.1 Manejo de Capa Vegetal en taludes, bermas y fondo de la excavación.

La superficie de fundación de la escombrera debe estar limpia de restos de materia orgánica y vegetal. Para ello, con la cuchilla del buldózer se raspará el poco material vegetal que aparece en las paredes de los taludes, bermas y fondo de la excavación.

- El material vegetal se debe apilar en la esquina norte de la mina, de allí se trasladará al vivero al área de compostaje.

6.1.6.2 Recepción y Conformación de Escombros y estériles de mina.

- Materializar con topografía el Diseño geométrico de la Reconformación final. Enfocado a mejorar la estabilidad del área afectada por el deslizamiento y en los antiguos taludes mineros.

Condición Geotécnica: para cumplir norma DPAE.

- i. Fase I, Llevar el relleno con escombros a la cota 2.545 m.s.n.m., que permite confinar a esta altura las capas mecánicamente débiles de arcillas y arcillas orgánicas.
 - ii. Fase II, Llevar el relleno con Escombros a la Cota 2.570 m.s.n.m.
- Adecuación de Plataformas-Terrazas (Módulos). Periodos secos.
Llevar la configuración de las escombreras a tener plataformas o terrazas de 50 metros de ancho X 400 metros de largo.
Dividir la plataforma en dos sectores.
 - i. Un sector de recepción de escombros. Descargar viajes de manera organizada. Filas separadas cada 5 metros.
 - ii. En el otro sector estará el buldózer Tipo D7, extendiendo y compactando. Una vez terminada la extendida y compactada, se inicia nuevamente el ciclo. El paso de las volquetas ayuda en la compactación.
 - Las terrazas tendrán configuración en escalera, con alturas entre ellas máximo de 10 metros. Las terrazas se construirán gradualmente. Al llegar a las cotas

de recomendación geotécnica, éstas desaparecerán configurando un solo patio.

- Geometría de los taludes temporales de trabajo.

Altura entre Terrazas: 5 metros.

Angulo del talud: $>38^\circ$

Bermas. Mantener bermas mayores a 20 metros.

- Densificación del material.

Los escombros descargados se extenderán y tendrán compactación mecánica a través de las pasadas del buldózer y el paso obligado de las volquetas cargadas y vacías.

La altura entre capas extendidas y compactadas debe ser máximo de 1 metro.

- Ensayos geomecánicos. Se realizaran perforaciones de percusión y lavado, y toma de muestras inalteradas en tubo de pared delgada para la caracterización geomecánica de los materiales de relleno. La frecuencia depende del avance y volumen de los escombros y estériles conformados.

Con la información anterior realizar análisis de estabilidad geotécnica.

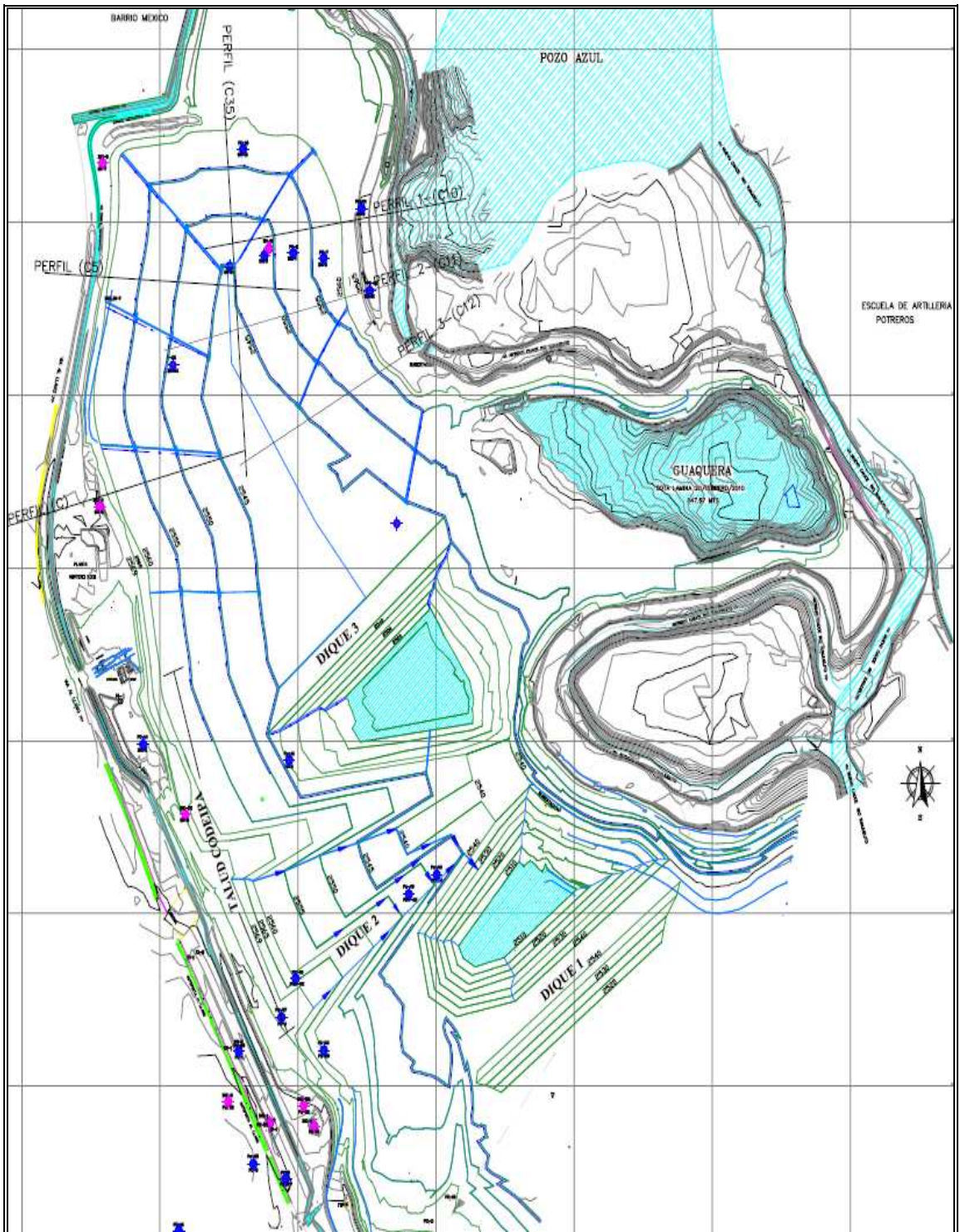


Figura 22. Diseño de Reconformación Morfológica Final y Diseño Final de Obras Hidráulicas.

6.2 MANEJO DE AGUAS SUPERFICIALES E INFILTRACIÓN.

6.2.1 Diseño Fase I.

En la Figura 23 se presenta el diseño para el manejo de las aguas superficiales en su primera fase el cual está integrado al manejo de aguas inicial que se realizó al momento que se presentó el deslizamiento. La estructura de estabilización y reconfiguración en terrazas de la primer fase o temporal, para el manejo óptimo para el manejo de aguas considera la construcción de filtros volumétricos y cunetas revestidas en concreto o geomembrana.

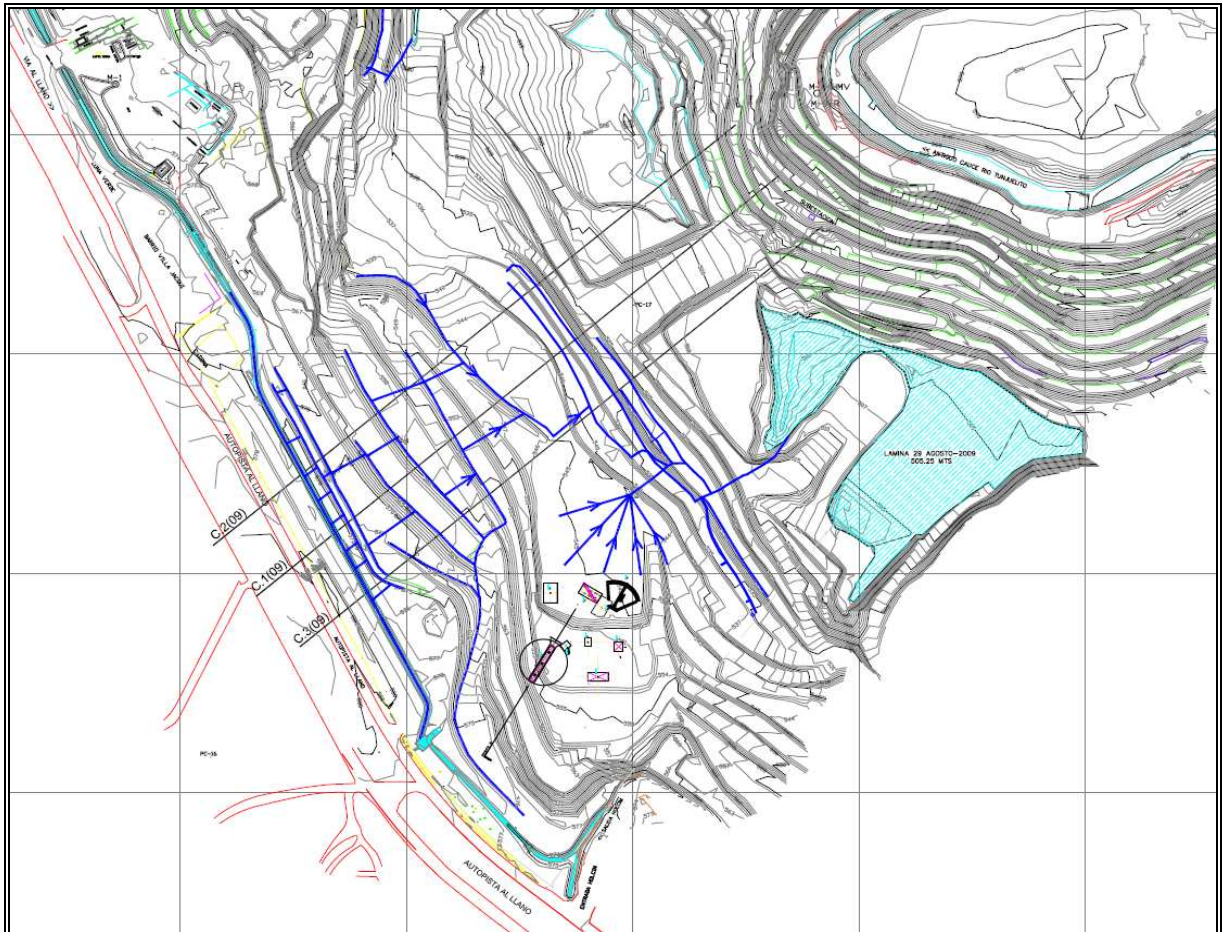


Figura 23. Distribución de la red de drenaje y ubicación temporal de obras hidráulicas en su primera fase.

La configuración morfométrica escalonada temporal que se adelanta para reconformar y estabilizar definitivamente el talud fallada, permite proyectar una red interconectada para el manejo de las aguas superficiales y de infiltración. El diseño de la red de drenaje tiene en cuenta la construcción de filtros volumétricos hacia la pata de los taludes parciales y sobre ellos en su parte superior cunetas revestidas en geomembrana y/o concreto.



Fotografía 13. Construcción Filtro Volumétrico. Excavación, tallado, extendido geotextil y disposición de piedra para filtro.



Fotografía 14. Construcción filtro en roca sobre pata de un talud. Sellado y cosido del filtro.



Fotografía 15. Construcción cunetas revestidas en geomembrana y cajas para distribución del agua a una terraza inferior a través de la mangueras de 3".



Fotografía 16. Marco izquierdo: Filtros transversales en las caras de los taludes. Marco derecho Caja para captación y distribución del agua a las terrazas inferiores



Fotografía 17. Cunetas recubiertas con geomembrana, caja colectora y distribuidora de agua

6.2.2 Cálculos Hidráulicos para Diseños de Canales internos temporales.

La evaluación hidrológica tiene en cuenta los aspectos geométricos de la superficie por donde escurre el agua lluvia en taludes mineros y de reconfiguración, la información meteorológica y consideraciones hidráulicas que ayudan a determinar la sección de canales y/o cunetas internas.

Las cunetas tienen la finalidad de evitar el paso de las aguas de escorrentía a los frentes mineros temporales y en las áreas de taludes o ladera de restauración parcial, además, conducir de manera controlada éstas aguas a los lagos destinados para su almacenamiento final.

6.2.2.1 Áreas aferentes. En el área de influencia de la mina y en el área del Diseño parcial de restauración; las aguas superficiales para efectos de la estimación del área aferente y sus respectivos caudales, se considera las siguientes sectorizaciones: (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**)

- Diseño de Restauración:

Área aferente en la depresión del diseño. Área 1_(m2)

Área aferente en laderas parciales. Área 2_(m2)

- Taludes Mineros Actuales.

Área aferente en taludes y bermas. Área 3_(m2)

- Áreas:

Área 1_(m2) 260.563

Área 2_(m2) 40.757

Área 3_(m2) 21.713

6.2.2.2 Intensidad de las precipitaciones. Con base en la información de la Estación Meteorológica del IDEAM, ubicada en el relleno sanitario Doña Juana se determinó la intensidad de los aguaceros críticos para periodos de retorno de 10 y 20 años, las cuales son: (Ver Tabla 7. Datos Información Meteorológica Estación Doña Juana.– Información Meteorológica Estación Doña Juana y Anexo 2 – Cálculos Intensidad de Precipitaciones y Caudales)

I (10 años) = 35.46 mm/hora (9.8507E-06 m3/sg)

I (20 años) = 37.91 mm/hora (1.0530E-05 m3/sg)

Tabla 7. Datos Información Meteorológica Estación Doña Juana.

Unidades en mm. Promedio Máximo en 24 horas en 19 años: 49.0mm

A#O	EST	ENT	ENERO	* FEBRE	* MARZO	* ABRIL	* MAYO	* JUNIO	* JULIO	* AGOST	* SEPTI	* OCTUB	* NOVIE	* DICIE	VR ANUAL	PROM	DESCEN
1991	10	3	4.1	26.1	22	19	6.6	10	15.4	5.8	4.3	8.0	10.1	26.1	49.0		
1992	1	9.6	7.9	6.3	19.2	6	6.5	9.6	9.6	8.5	8.0	6.8	22.3	9.5	22.3	44.1	
1993	11	26	5.5												32.1	43.0	
1994	11	29	21.5	31.9	17	3	19.9	11	16.7	15.2	7.4	11.1	44.1	7.0	44.1	42.4	
1995	11	2.1	3.5	16	10.9	3	45.2	12.6	3	6.8	9.4	6.5	11.2	49.0	24.7	49	39.4
1996	1	18.4	18.3	33.3	13	42.4	5.7	14	7.7	21.8	31.0	14.0	20.0	42.4	39.4		
1997	1	39.4	7.4	23.4	7.7	14.2	24	8.2	4.2	17.0	10.9	21.3	1.2	39.4	32.1		
1998	1	3.9	7	32	9.9	39.4	19.4	15.8	14.4	7.8	21.6	23.8	27.6	39.4	31.3		
1999	1	8	21	17.1	15.7	11.8	11.5	3.7	15.8	16.4	22.5	31.3	9.0	31.3	30.1		
2000	1	14.7	23	28.4	27	18.9	17.4	14	15.4	14.4	22.5	10.7	13.0	28.4	30.0		
2001	1	5.5	27.8	22.3	8.8	18	11.1	12.1	6.6	18.0	9.8	14.7	16.1	27.8	28.4		
2002	1	2.5	1.9	10.3	23.1	19.3	22.5	10.5	8.6	5.8	26.0	10	11.6	26	27.8		
2003	1	8.6	7.9	14.1	26.2	7.3								26.2	26.2		
2004	1											30.1	28.7	15.0	30.1	26.1	
2005	1	4.6	14	18	16	20.3	17.5	16	5.2	17.5	14.8	10.0	7.8	20.3	26.0		
2006	1	12.4	1.6	13.5	30.8	21.5	26	17.3	9.0	6.3	43.0	32.7	5.0	43	24.2		
2007	1	0	6.5	7.3	21.3	12.2	24	9.8	9.0	4.7	30.0	6.4	18.8	30	22.3		
2008	1	2.3	5.4	11.5	17.3	23.7	24.2	17.1	17.2	10.2	19.2	18.0	16.1	24.2	21.5		
2009	1	5.2	14.7	12.5	21.5	13.1	6.2	8.9	3	7.0	6.1			21.5	20.3		
MEDIOS			10.8	11.1	19.1	18.1	20.7	15.4	11.9	10.5	10.8	18.9	22.2	12.7	22.2		
MAXIMO S			39.4	27.8	33.3	30.8	45.2	26.0	17.3	17.2	21.8	43.0	49.0	27.6	49.0		
MINIMO S			0.0	1.6	6.3	7.7	6.0	5.7	3.7	4.2	1.2	4.3	6.4	1.2	0		

Depresión Diseño Reconformación

Ladera Parcial D. Reconformación

Taludes y bermas Mineras. Actual.

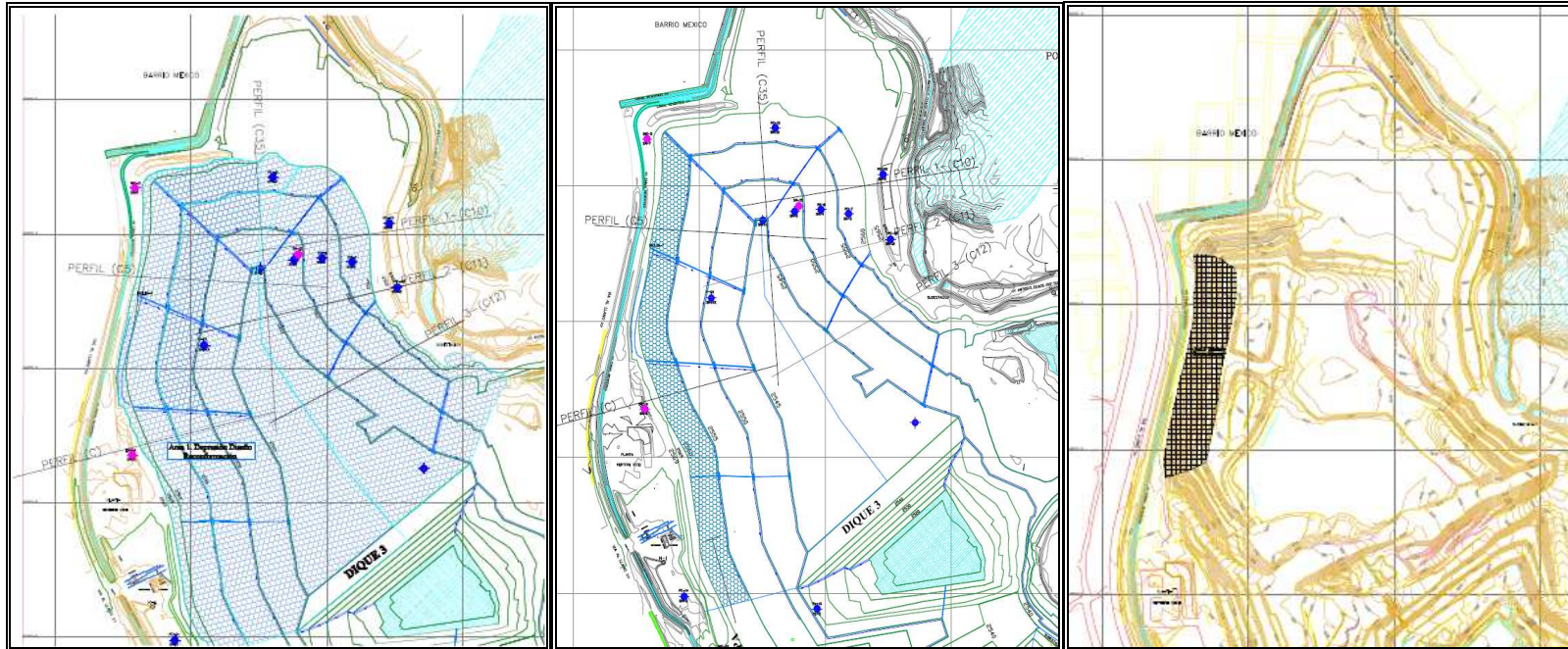


Figura 24. Áreas Aferentes.

6.2.2.3 Cálculo de Caudales. Los caudales para los tres sectores en taludes mineros y reconfiguración parcial y tiempos de retorno de los aguaceros pico, 10 y 20 años, son:

Tabla 8. Cálculo de caudales

Sector	TR=10 años Q (m ³ /seg)	TR=20 años Q (m ³ /seg)
Área 1	1.115	1.254
Área 2	0.180	0.193
Área 3	0.104	0.111

De acuerdo a los resultados de Q obtenidos, y la consideración que las obras hidráulicas son temporales se asume el caudal para la determinación de las dimensiones de las cunetas, considerando un tiempo de retorno de 10 años. Con $Q = 1.115 \text{ (m}^3\text{/seg.)}$ y $Q = 0.180 \text{ (m}^3\text{/seg.)}$ para obras que tiene en cuenta el Diseño de Restauración y el caudal $Q = 0.180 \text{ (m}^3\text{/seg.)}$ para taludes y bermas mineras actuales. Los diseños de canales finales se confirmarán una vez, se aclare con los entes del estado cual será la reconfiguración y restauración final del área.

En las Tabla 9 y 10, se presentan los resultados de I (intensidad), cálculos de Q (caudales) y determinación de dimensiones de las secciones de cunetas en la Tabla 11.

6.2.2.4 Determinación de secciones de cunetas. La experiencia muestra que la sección de cunetas tipo trapezoidal, son más eficientes; por lo tanto para las cunetas, por ahora consideradas definitivas en el plan de restauración, se aconseja construir este tipo de cuneta revestida en concreto. Para el manejo de aguas en los taludes mineros actuales se presenta también las dimensiones de la

geometría trapezoidal, no obstante, por ser temporales se pueden construir con la geometría en V, siempre y cuando el área de la sección permita movilizar el caudal aquí calculado. Sección cuneta tipo A. Geometría Trapezoidal

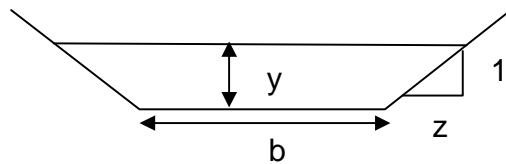


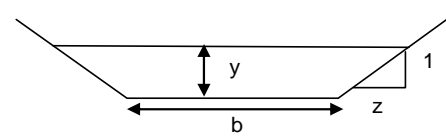
Tabla 10. Cálculos Hidráulicos, Escenario: Taludes, Bermas Mineras

AÑO	PRECIPITACION MAX /24HORAS	TIEMPO DE RETORNO	10	TIEMPO DE RETORNO	20
1	49.0	$I = K/(t+b)n$	para Colombia	$I = K/(t+b)n$	para Colombia
2	44.1	b(minutos) =	10	b(minutos) =	10
3	43.0	n =	0.5	n =	0.5
4	42.4				
5	39.4	$P1h/P24h =$	0.3	$P1h/P24h =$	0.3
6	39.4				
7	32.1	Por el tipo de estructuras se toma un Tiempo de retorno de 10 años.		Por el tipo de estructuras se toma un Tiempo de retorno de 20 años.	
8	31.3				
9	30.1	Relacion : $P1h/P24h = 0.3$		Relacion : $P1h/P24h = 0.3$	
10	30.0				
11	28.4	→ P24 horas max. =	49.0 mm	→ P24 horas max. =	49 mm
12	27.8	P 1 hora = P24 horas* 0.3 =	14.7 mm	P 1 hora = P24 horas* 0.3 =	14.7 mm
13	26.2				
14	26.1	→ $14.7 \text{ mm} = K/(60+10)^{0.5} =$	$K = 14.7 * (70).0.5$	→ $14.7 \text{ mm} = K/(60+20)^{0.5} =$	$K = 14.7 * (80).0.5$
15	26.0				
16	24.2	K =	122.99	K =	131.48
17	22.3				
18	21.5	I para calculo (tr 10 años)	$I = K /((tc+10)^{0.5})$	I para calculo (tr 20 años)	$I = K /((tc+10)^{0.5})$
19	20.3	I (10 años) =	38.45 mm/hora 1.06819E-05 m3/seg	I (20 años) =	41.11 mm/hora 1.14194E-05
			tc (Kírpich) (Tiempo de concentración según Kírpich)	Tc Bureau Re. USA (Tiempo de concentración según Bureau Re.)	
			L (m) = $14 \text{ tc} = 0.06663 * (L/(So)^{1/2})^{0.77}$	L (m) = 280 0.17402113	
			H max. (msnm) 2560 0.23 minutos	Tc= $60(11.9^{1/3}/DH)^{0.385}$ H max. (msnr) 2565 8415.252	
			H min. (msnm) 2555	Dhen pies H min. (msnrr) 2545 8349.636	
			So = 36% 63	L en millas	
			7.937253933 7.937253933 3.31662479		
			Area Area C	Tc= 4.12651446 minutos	
			Area 1_(m2) 21713 0.45 Sector Norte		
				I para calculo (tr 10 años) $I = K /((tc+10)^{0.5})$	
			Q = C*I*A 10 años	I (10 años) = 32.72 mm/hora 9.08963E-06 m3/seg	
			Q1 = 0.104370998	Q1 = 0.08881344	
			Q2 = 0	Q2 = 0	
			Q3 = 0	Q3 = 0	
			Q4 = 0	Q4 = 0	
			Q = C*I*A 20 años		
			Q1 = 0.11157729		
			Q2 = 0		
			Q3 = 0		
			Q4 = 0		

Tabla 11. Sección Cuneta Trapezoidal

Para un canal trapezoidal tenemos:

Q = Caudal de diseño en m3/seg.
 A= Area de la seccion del flujo en m2
 b = Base del canal.
 y = Altura de la lamina de agua.
 z = 1 (pared del canal a 45°)
 n= coeficiente de rugosidad Manning.
 P= Perimetro mojado.
 R= Radio Hidraulico
 S = Pendiente del canal.



Aplicando Manning tenemos que:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

$$AR^{2/3} = \frac{Qn}{S^{1/2}}$$

$$A = (b + zy)y$$

$$R = \frac{A}{P}$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$$

Material de la pared	n de Manning
Concreto	0.012
Concreto Pulido	0.010
Ladrillo	0.013
Tierra	0.021
Tierra con piedras o hierbas	0.029
Grava	0.024

Canal en Concreto Diseño Restauración - Depresión:
 Fondo Cubeta.

Q (m3/seg)=	1.155	y (m)	b (m)	A	P	R	(AR) ^{2/3} ©
n =	0.012	0.4	0.35	0.3	1.481371	0.202515	0.1035
S=	0.020	0.35	0.55	0.315	1.539949	0.204552	0.109357
z=	1.000						0
b (m) =							
y (m)=							
(AR) ^{2/3} (q)=	0.0980						

Canal en concreto Diseño Restauración - Laderas Parciales:

Q (m3/seg)=	0.181	y (m)	b (m)	A	P	R	(AR) ^{2/3} ©
n =	0.012	0.2	0.35	0.11	0.915685	0.120129	0.0268
S=	0.010						
z=	1.000						
b (m) =							
y (m)=							
(AR) ^{2/3} (q)=	0.0263						

Canales en concreto Taludes y Bermas Mineras. Situación Explotación

Q (m3/seg)=	0.112	y (m)	b (m)	A	P	R	(AR) ^{2/3} ©
n =	0.010	0.14	0.3	0.0616	0.69598	0.088508	0.0122
S=	0.010						
z=	1.000						
b (m) =							
y (m)=							
(AR) ^{2/3} (q)=	0.0112						

Q (m3/seg)=	0.000	y (m)	b (m)	A	P	R	(AR) ^{2/3} ©
n =	0.010	0.25	0.2	0.1125	0.907107	0.124021	0.0279779
S=	0.020						
z=	1.000						
b (m) =							
y (m)=							
(AR) ^{2/3} (q)=	0.0000						

6.2.2.5 Recomendaciones sección cunetas.

6.2.2.5.1 Diseño Reconformación:

- Depresión del Diseño de Reconformación

Material: Concreto. $n= 0.010$ (n de Manning)

$Q=1.155$ m³/seg.

Y+ borde libre = 0.50 m.

b= 0.35 m

m= 2%.

- Laderas Parciales Diseño de Reconformación:

Material: Concreto. $n= 0.010$ (n de Manning)

$Q=0.180$ m³/seg.

Y+ borde libre = 0.35 m.

b= 0.20 m

m= 2%.

6.2.2.5.2 Cunetas Taludes y Bermas Mineros. Mina Actual.

Material: Concreto. $n= 0.010$ (n de Manning)

$Q=0.104$ m³/seg.

Y+ borde libre = 0.25 m.

b= 0.20 m

m= 2%.

El diseño de la red de drenaje considera capturar las aguas superficiales de escorrentía, mediante cunetas ubicadas en la pata de los taludes de la mina actual

y en las laderas del diseño de reconformación parcial, marcando niveles o curvas topográficas. A partir de estas cunetas casi paralelas a las curvas de nivel se construyen perpendicularmente colectores o tanquillas, espaciadas aproximadamente cada 250 metros. A partir de éstas tanquillas a través de mangueras de 3" y 4" se bajan las aguas hasta el eje de la ligera depresión morfológica o fondo del retrollenado, donde se construirá una cuneta en concreto principal, sobre ella se descolarán las aguas al lago ubicado al sur de la mina.

6.2.2.6 Colectores o tanquillas. Las tanquillas colectoras y sus descoles se diseñan con tuberías de características flexibles en cuanto a material y diámetro. Normalmente son superficiales y funcionan transportando los flujos de agua hacia su destino final. El tamaño de las tanquillas colectoras queda determinado por el caudal de diseño calculado, el que a su vez, queda definido por el período de retorno adoptado.

6.2.2.6.1 Área de Tanquillas Recolectoras. (At)

$$At = Q / Tes$$

$$At = 10.84 \text{ m}^3 / \text{hora} = 1.6 \text{ m}^2 \quad (Q = 0.180 \text{ M}^3/\text{sg})$$

$$6.7 \text{ m}^3 / \text{m}^2 * \text{hora}$$

At = área colector en 1.6 m².

Q= caudal a tratar en 10.8 m³ por hora (se asume Q, de ladera parcial del Diseño reconformación por ser el sector representativo o tipo para el diseño).

Tes= tasa específica del recolector en m³ / m² * hora. Para efectos de cálculo se emplea una tasa específica 6.7 m³/m²*hora

Cálculo ancho / largo de tanquilla

Considerando una relación de ancho/largo de 1/3 para efecto de calcular las dimensiones de las tanquillas recolectoras, se aplica la fórmula:

$$At = Lg \times An$$

Lg = largo de la tanquilla en metros

An = ancho de la tanquilla en metros.

y aplicando la relación ancho 1/3 tenemos.

Asumiendo Lg=1, se tiene:

$$At = Lg \times An$$

$$1.6 \text{ m}^2 = An = 1.6 \text{ m}$$

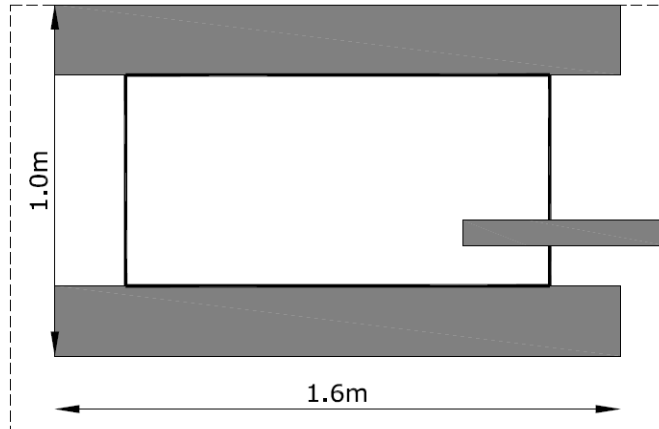
$$1 \text{ m}$$

Las dimensiones de tanquilla son :

largo 1.0 metros

ancho 1.6 metros

alto operacional 0.5 m, Luego volumen tanquilla= 0.8 m³.



6.3 OBRAS VERDES. REVEGETALIZACIÓN.

El papel de la revegetalización como obra ambiental, en esta fase de la estabilización del deslizamiento de Codeipa, es minimizar la erosión laminar y la

degradación del talud por las aguas de escorrentía y la meteorización en los taludes temporales y finales en la estructura minera de reconfiguración. Como valor agregado adicional está la mejora del paisaje. La medida consiste en la empedricación con cespiones de pasto kikuyo, que generan raíces profundas y forma carpetas de césped denso que reducen la infiltración de las aguas superficiales de escorrentía.



Fotografía 18. A la izquierda compactación, tallado y perfilado de taludes. A la derecha repoblación vegetal de taludes finales (parte alta de talud fallado).



Fotografía 19. Aspecto de la revegetalización en taludes superiores finales reconfigurados del talud Codeipa

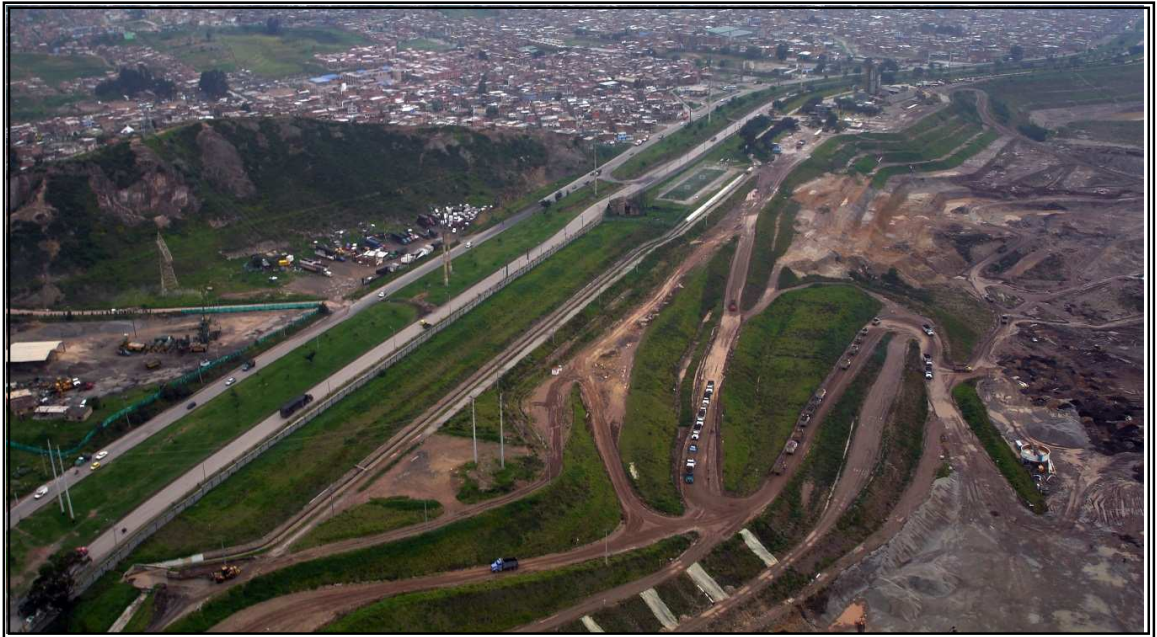


Fotografía 20. Labores de extendido de cespiones de pasto kikuyo sobre tierra negra (*Pennisetum clandestinum* H.).



Fotografía 21. Cambios morfológicos y paisajísticos en el área del deslizamiento.

En el recuadro de la izquierda imagen inmediata del deslizamiento (mayo de 2009). A la derecha imagen 3 meses después (agosto de 2009), en esta última se observa el avance en la empradización.



Fotografía 22. Panorámica de estado de la reconfiguración y revegetación de la parte alta y media del talud deslizado (julio de 2010).

7. INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO

La instrumentación seleccionada para monitorear el comportamiento de la masa deslizada, la posterior masa conformada técnicamente y los materiales rocosos y suelos no afectados por el deslizamiento que constituyen la ladera del talud Codeipa, se orienta a conocer a través del tiempo las posibles deformaciones superficiales, potenciales movimientos profundos y el régimen subterráneo del agua que pueda afectar la estabilidad de éste. Además, el monitoreo es un herramienta que ayudará activar alarmas que se deben incluir en el plan de emergencia.

Las deformaciones y movimientos en el área de influencia del deslizamiento son controladas y monitoreadas a través de la siguiente instrumentación instalada: Ver Figura 25.

- Ocho (7) Piezómetros tipo Casagrande.
- Dos (1) Piezómetros de Hilo Vibrátil, ubicados sobre la Turba –plano de falla sobre la Turba- con objeto de medir presiones de poros.
- Cuatro (5) Inclínómetros biaxiales.
- Dos líneas de Mojones sobre las terrazas conformadas del Talud Codeipa, con una cantidad de 63 mojones instalados.
- Dos líneas de mojones sobre el separador de la Avenida Boyacá, ubicadas al occidente de las anteriores líneas, con una cantidad de 64 mojones instalados.
- Diez (10) extensómetros, ubicados en las terrazas superiores del talud Codeipa.

En la Tabla 12 relaciona el tipo de la instrumentación y la profundidad a la cual se instaló.

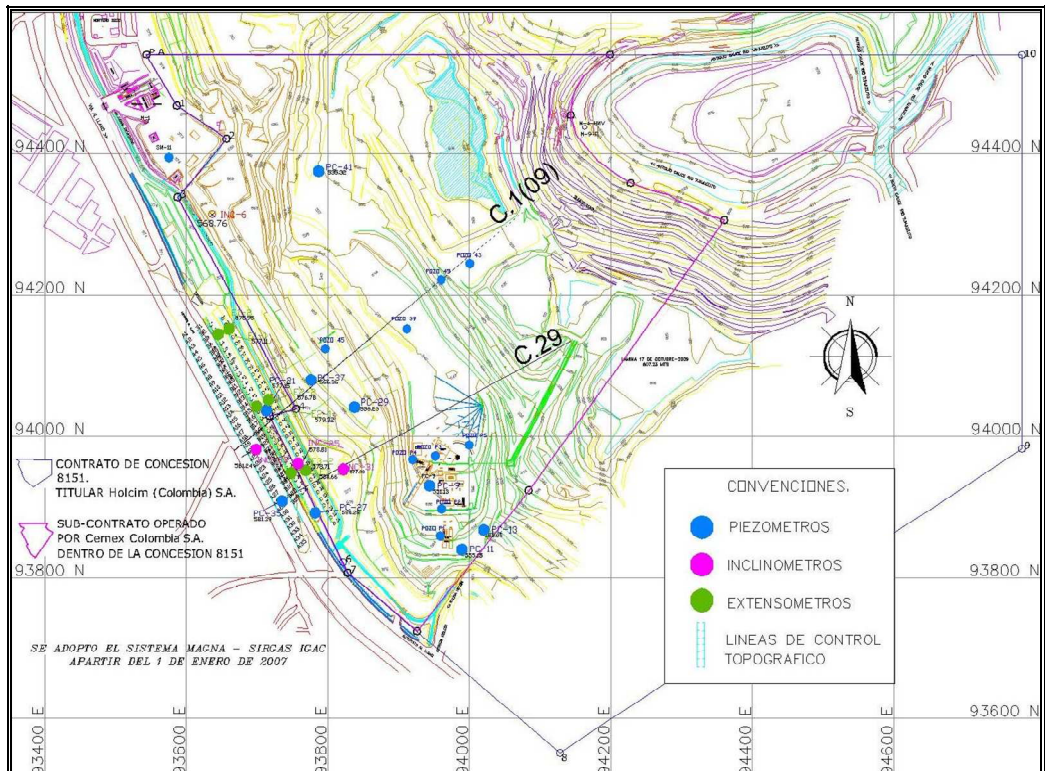


Figura 25. Ubicación Instrumentación para monitoreo del Talud Codeipa

Tabla 12. Mina El Tunjuelo. Instrumentación en Área influencia Deslizamiento Taludes Codeipa

Pozo	ESTE	NORTE	ELEVACION	Instrumentación	Metros
SM-11	93575,78	94395,32	574,04	Piezómetro CS-11	33,6
SM-8	93637,02	94314,14	568,72	Inclinómetro 6	24,45
49	93960,42	94221,96	527,42	Piezómetro Hilo Vibratil 2	16,00
47	93960,42	94221,96	527,42	Piezómetro CS-16	36,00
45	93796,59	94124,43	557,96	Piezómetro Hilo Vibratil 1	46,00
43	94000,94	94244,42	524,08	Piezómetro CS-17	25,00
41	93787,11	94377,29	535,11	Piezómetro CS-6	36,00
39	93911,91	94151,87	548,45	Sin Instrumentación	34,00
37	93775,98	94079,23	563,84	Piezómetro CS-5	30,30
35	93735,35	93909,50	581,48	Piezómetros CS-4	30,20
33	93698,79	93981,50	580,89	Inclinómetro 3	35,00
31	93823,58	93953,46	577,83	Inclinómetro 2	40,00
29	93837,36	94041,08	558,23	Sin Instrumentación	27,35
27	93782,25	93892,52	578,95	Piezómetro CS-3	30,00
25	93759,36	93957,27	578,68	Inclinómetro 1	39,00
23	93689,55	94051,51	579,20	Sin Instrumentación	27,50
21	93714,26	94040,05	577,25	Piezómetro CS-1	30,00
TOTAL METROS PERFORADOS					540,40

7.1 CONTROL DE MOVIMIENTOS SUPERFICIALES EN LA ZONA VECINA AL DESLIZAMIENTO.

Para la investigación de posibles movimientos superficiales – verticales y horizontales - en las zonas vecinas al deslizamiento, se instaló una serie de puntos de control superficial, constituida por referencias sobre mojones debidamente localizados y anclados en el sitio, referencias que sirven tanto para control planimétrico como de control altimétrico, siguiendo una metodología apropiada, tal como se indica a continuación.



Fotografía 23. Detalle de los mojones y la referencia tomada para el control de asentamientos y movimientos horizontales.

7.1.1 Control Planimétrico por visuales.

El control por visuales simplemente consiste en establecer cuanto se alejan de la visual del anteojo -teodolito - una serie de puntos inicialmente alineados y materializados sobre el terreno con respecto a dicha visual. Aunque sencillo en su concepto, el control por visuales es bastante dispendioso en campo si se compara con el control por coordenadas, pero más efectivo para determinación de movimientos superficiales del terreno.

7.1.2 Control alimétrico con nivel de colimación.

Control mediante nivel de colimación aunque mucho más dispendioso que el control alimétrico con estación topográfica, es un método de control que permite determinar pequeños asentamientos que no son fácilmente detectados con un control normal por coordenadas (midiendo ángulo horizontal, ángulo vertical y distancia). Sin embargo se debe tener en cuenta el grado de sofisticación de la estación que se utilice.

En el caso particular del talud de Codeipa, en la zona hacia la Boyacá, se materializaron para el control planimétrico por visual y para control alimétrico mediante nivel de colimación, cuatro líneas de mojones subparalelas. Dos líneas están localizadas hacia la parte alta del talud Codeipa sobre terrazas que se incluyen en las obras de mitigación del deslizamiento. Las otras dos líneas están sobre el separador de la infraestructura vial de la Avenida Boyacá.

7.1.3 Niveles de Alerta para Deformaciones Horizontales y Verticales en Líneas de Mojones.

Tabla 13. Niveles de Alerta. Control Topográfico. Magnitud y Velocidad.

Descripción	Deformación	Valor	Niveles de Alerta			Precisión
			Amarilla	Naranja	Roja	
Mojones de Topografía	Deflexión Horizontal	Valor	Entre -12mm y +12mm	Entre -24mm y +24mm	Entre -36mm y 36mm	+/- 2mm
	Deflexión Vertical	Velocidad	Duplica entre controles	Entre 2 controles: 2.5 veces la anterior	Triplifica entre controles	+/- 2mm

7.1.4 Control con extensómetros elementales.

Para el monitoreo de movimientos horizontales a nivel de superficie, paralelamente al método de las visuales topográficas, se instalaron extensómetros donde los movimientos horizontales se pueden controlar conociendo cuanto se alejan o se acercan parejas de puntos localizados sobre la superficie del terreno.



Fotografía 24. Extensómetros instalados sobre material conformado en las terrazas superiores el talud Codeipa. Varillas de ½" en forma de L ancladas sobre el terreno. La deformación horizontal se mide con un calibrador por la el movimiento relativo en los extremos de las varillas.

Los extensómetros instalados sobre las bermas altas del talud Codeipa son paralelos a la dirección al talud y permiten establecer movimientos del talud en dicha dirección y advertir la aparición y apertura de grietas en la zona localizada entre ambos puntos.

En la interpretación de deformaciones o movimientos superficiales es necesario considerar que aunque no haya desplazamiento entre dos puntos, se estén moviendo simultáneamente los dos puntos a la misma velocidad. Igual que en el control de convergencia en un túnel, cuando se presenta variación en la distancia entre ambas referencias, no se sabe a cabalidad, si se movió el uno o el otro o ambos. Por lo anterior, conviene que estos extensómetros sean lo más continuos posible, que no sean demasiado puntuales (no monitorear únicamente una grieta sino toda una zona en la cual se puedan suscitar grietas) y que en lo posible no se afecten por condiciones distintas al deslizamiento (se anclan en el terreno para evitar daños).

A medida que se avance en la reconfiguración del talud, estos extensómetros se irán prolongando en las distintas bermas. Por lo anterior, en su interpretación se

debe tener en cuenta la diferencia de fecha correspondiente a las lecturas iniciales.

7.1.4.1 Niveles de Alerta en Deformaciones Horizontales de Lecturas en los Extensómetros. Cuando hay riesgos de afectación de viviendas e infraestructura, conviene implementar desde un principio una serie de niveles de alerta sobre las deformaciones o movimientos que se presenten en la instrumentación instalada; niveles de alerta que se deben revisar y cambiar de acuerdo a la evolución de la estabilidad del deslizamiento u obra civil que éste sometida a monitoreo geotécnico. Los niveles de alerta propuestos con base en la experiencia del consultor Salazar Ferro Ingenieros S.A. para el control y monitoreo en el talud Codeipa, que son conservadores y pueden ser discutibles, se determinan en la Tabla 13, 14 y 15.

En la interpretación de los movimientos encontrados en la instrumentación instalada, las alertas no pueden referirse únicamente a los valores máximos puntuales. Es necesario definir las en función de las tendencias en el tiempo, valoradas con el debido criterio (no es lo mismo que doble en un día el asentamiento de un punto que ya llevaba 4 mm que doble el asentamiento de otro que ya tenía 3 cm de asentamiento). Y en ciertos casos, en la calificación de la gravedad de un registro de instrumentación deben incluirse cuestiones no numéricas como la forma que adopta una línea de visual planimétrica o como la forma que adopta un inclinómetro en profundidad y que puede ser indicativa de una superficie de falla.

Tabla 14. Niveles de Alerta. Extensómetros.

Descripción	Deformación		Niveles de Alerta			Precisión
			Amarilla	Naranja	Roja	
Extensómetros Horizontales	Deflexión Horizontal Superficial	Valor	Entre -1.0cm y +1.0cm	Entre -3.0cm y +3.0cm	Entre -5.0cm y +5.0cm	Centésimas de milímetro
		Velocidad	Duplica entre controles	Entre 2 controles: 2.5 veces la anterior	Triplica entre controles	

7.2 CONTROL DE MOVIMIENTOS HORIZONTALES PROFUNDOS EN LA ZONA VECINA Y DENTRO DE LA MASA DEL DESLIZAMIENTO: INCLINÓMETROS.

Para complementar la investigación del movimiento superficial en alrededores y dentro de la masa deslizada y de los materiales conformados técnicamente planteados en las obras de mitigación; a medida que se avanzaba con las perforaciones, las cuales en su mayor parte atravesaron toda la secuencia litológica involucrada en el deslizamiento, el plano principal de falla y el potencial plano de falla en el contacto con el terciario, se instalaron 4 inclinómetros biaxiales con el objeto de monitorear y detectar a través del tiempo movimientos en profundidad sobre el plano de falla de la masa deslizada u otros potenciales de puntos de superficie de falla que se puedan generar después del movimiento del 20 de mayo.

Como instrumento de monitoreo, la tubería de inclinómetro no es más que una simple guía plástica cuya deformación se mide a través de un torpedo que se introduce en el tubo estableciendo lecturas cada 50 cm en profundidad. Se compara el cambio en la inclinación de dicha tubería entre dos controles, donde los cambios registrados corresponden al cambio en la inclinación de la masa de suelo en cual queda inmersa dicha tubería. Las lecturas permiten conocer el cambio de ángulo de la tubería con respecto a la vertical cada 50 cm, se puede establecer por cálculo la geometría la curva de deflexión horizontal de la tubería (lo que se movió horizontalmente dicha tubería con respecto a cualquiera de sus extremos) en el plano de trabajo (plano que corresponde a un juego ranuras de la tubería diametralmente opuestas).



Fotografía 25. Inclinómetros. Monitoreo en inclinómetros 3 y 4 en el talud de Codeipa.

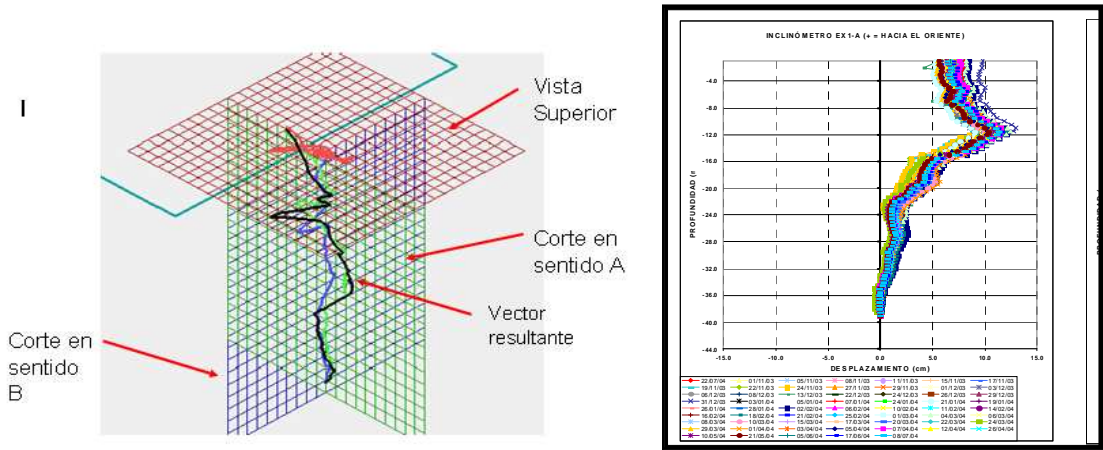


Figura 26 Registros de deformación acumulada en la tubería del inclinómetro 1.

El análisis de la información de un inclinómetro consiste en proyectar la curva de deflexión horizontal en el espacio en los planos principales (plano horizontal, planos verticales ortogonales).

7.2.1 Niveles de Alerta por Deformaciones Registradas en Inclinómetros.

Tabla 15. Niveles de Alerta. Inclinómetro.

Descripción	Deformación		Niveles de Alerta			Precisión
			Amarilla	Naranja	Roja	
Torpedo Sonda Biáxial	Deflexión Horizontal en Profundidad	Valor	Entre -36mm y 36mm	Entre -72mm y +72mm	Entre -10.8cm y +10.8cm	+/- 2mm
		Velocidad	Duplica entre controles	Entre 2 controles: 2.5 veces la anterior	Triplifica entre controles	+/- 6mm en 30 m

7.3 INVESTIGACIÓN DEL RÉGIMEN DE AGUAS.

7.3.1 Piezómetros de Hilo Vibrátil.

En lo que corresponde al régimen de aguas, un factor detonante en deslizamientos de taludes corresponde al régimen de presión de poros en la masa de suelo del talud. La noción de presión de poros o presión intersticial no debe confundirse con la noción de nivel freático poco pertinente en taludes susceptibles de tener recargas superiores y en los cuales existen intercalaciones de capas muy permeables y capas mucho menos permeables como en este caso corresponde al Talud Codeipa. Tampoco puede confundirse una presión de poros alta con un gran volumen de agua.

En un principio, se implementaron piezómetros de tubo abierto en la zona vecina al deslizamiento, algunos de los cuales indican una cierta cabeza de agua en la zona de la gravas. Sin embargo, se convino en instalar piezómetros en lo posible de hilo vibrátil en la zona deslizada una vez se terminará el movimiento de tierras correspondiente y una vez se tuviera una cierta claridad en cuanto a su ubicación y profundidad. Para tal efecto, se han instalados dos (2) piezómetros de hilo vibrátil.

7.4 MEDICIÓN DE LA COLUMNA DE AGUA. PIEZÓMETROS CASAGRANDE.

Este control se hace por medio de piezómetros tipo Casagrande instalados en sitios estratégicos. Los piezómetros son instrumentos de medición geotécnica de respuesta lenta, que permiten detectar los cambios en el régimen de presiones de poros ocasionados por la alteración de los factores climáticos o mecánicos del suelo.

Este consta de una tubería PVC con diámetro de 1½ pulgada, con la longitud deseada según los diseños y el cual tiene en su parte inferior un filtro, permitiendo el paso de agua del terreno hacia el interior de la tubería que lo compone. En la parte superior se instala un tapón perforado (sin pegar) al tubo que sirve como protección. La medición de la presión se hace utilizando una sonda eléctrica con la cual se mide el nivel de agua. Esta sonda incluye un carrete con el cable graduado en metros, y una batería de 9 voltios.

La columna de agua registrada resulta de la diferencia entre la profundidad de instalación del piezómetro y la profundidad a la cual se encuentra el nivel del agua. En el procesamiento de la información se puede utilizar una hoja de cálculo electrónica, o emplear una interface gráfica en tres dimensiones y tiempo. Cada piezómetro tipo Casagrande, debe tener un registro de las lecturas obtenidas.



Fotografía 26. Piezómetro de Casagrande o tubo abierto.

7.4.1 Niveles de Alerta para movimientos horizontales profundos y cuadro de precisiones en inclinómetros.

Tabla 16. Niveles de Alerta Inclinómetro

Descripción	Deformación		Niveles de Alerta			Precisión
			Amarilla	Naranja	Roja	
Torpedo Sonda Biáxial	Deflexión Horizontal en Profundidad	Valor	Entre -36mm y 36mm	Entre -72mm y +72mm	Entre -10.8cm y +10.8cm	+/- 2mm
		Velocidad	Duplica entre controles	Entre 2 controles: 2.5 veces la anterior	Triplica entre controles	+/- 6mm en 30 m

7.4.1 Periodicidad de la Toma de Registros. La toma de las lecturas se ha implementado a medida que se va instalando la instrumentación. Los piezómetros e inclinómetros se instalan inmediatamente se termina el hueco de la perforación. La periodicidad de las medidas se regulariza con la frecuencia relacionada en la siguiente tabla:

Tabla 17. Frecuencia de Lecturas.

Tipo	Equipo	Cantidad	Frecuencia
Mojones	Topografía	1	semanal
Extensómetros	Micrometro	1	semanal
Piezómetros	Sonda Eléctrica	1-2	semanal
Inclinómetros	Torpedo	2	semanal

7.5 MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA. (FUENTE NATIVA LTDA.)

En el esquema de la figura se muestran las líneas isopiezas del área de trabajo, en él se incluyen los datos medidos de los piezómetros con los que cuenta Cemex de Colombia S.A.

En el esquema adjunto se observa que la piezometría del área se encuentra a 2560 metros y disminuye hacia el norte hasta alcanzar valores de 2540. Entre los 2560 y los 2555 m el gradiente hidráulico es muy tendido, mientras que a partir de los 2550m se hace más importante, posiblemente producto de la depresión mediante pozos de bombeo que se hace en el sector minero.

La realidad de la presencia de agua en el área es la identificación de puntos piezométricos a partir de los piezómetros instalados en las perforaciones

ejecutadas, y no a la presencia de una superficie continua que marque un gradiente hidráulico y unas líneas de flujo. En campo la expresión marcada es el flujo del agua a través de canales internos o superficies discontinuas por lo tanto no se puede hablar de un acuífero de gran potencial.

La interpretación no válida es que la dirección del flujo subterráneo es hacia el este, hacia la dirección de la excavación o hueco minero que se tenía antes del deslizamiento, tal como lo plantean las líneas de flujo interpretadas en la Figura 27.

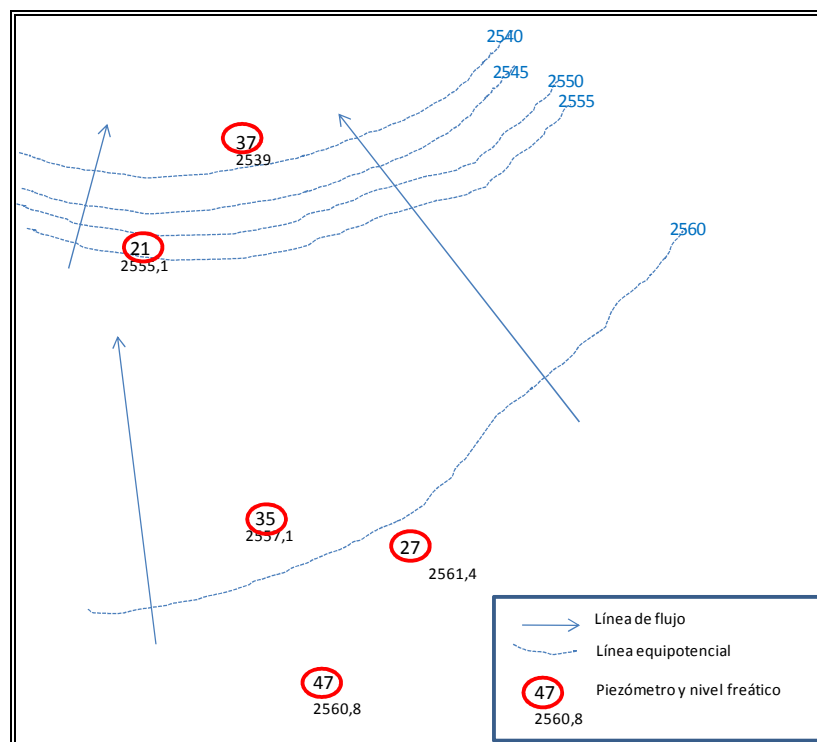


Figura 27. Diagrama esquemático en el que se muestran las isopiezas y la interpretación por comprobar de las líneas de flujo en el área de estudio.

Respecto de la recarga de los acuíferos en la zona, se puede afirmar que en la zona de estudio, la recarga a los acuíferos (formaciones Regadera y río Tunjuelo), es de dos tipos: una autóctona y directa a partir del agua de lluvia que cae directamente sobre las rocas que conforman ambas formaciones, y la otra recarga

es la producida por la Quebrada Trompeta que lo hace directamente a ambas formaciones y a través de su contacto geológico, en su ingreso al valle; esto se concluye por los niveles freáticos reportados en los piezómetros construidos por Cemex de Colombia S.A. con posterioridad al deslizamiento.

8. SEGUIMIENTO A LA ESTABILIDAD Y CONTROL DE DEFORMACIONES EN EL TALUD CODEIPA.

8.1 ANÁLISIS GEOTÉCNICOS PERMANENTES.

En las medidas de control y seguimiento que se implementan para reportar y conocer los avances y eficacia en la ejecución de las obras de mitigación planteadas para la estabilización en los taludes de Codeipa, posterior al deslizamiento ocurrido el 20 de mayo de 2009, se hacen evaluaciones periódicas de la evolución de la estabilidad de éstos taludes, en función de los factores de seguridad relacionados con el avance en la reconfiguración de materiales estériles y escombros, ubicados por diseño geotécnico en taludes y en el fondo de la excavación minera. Como ejemplo del seguimiento se presenta en la Tabla 18, la evolución del factor de seguridad y el Nivel de Amenaza a través del tiempo, en el perfil C-27.

Tabla 18. Evolución del factor de Seguridad

Fecha	TALUD GENERAL C 27								
	Perfil C27- Falla General / Factor de seguridad			Perfil C27- Falla General Parametro Factor de seguridad			Perfil C27- Falla Talud Sup. Factor de seguridad		
	Estático	0.1g	0.2g	Estático	0.1g	0.2g	Estático	0.1g	0.2g
12-jun-09	1,55	0,96	0,69	2,38	1,46	1,04	1,56	1,31	1,08
23-jul-09	1,52	0,95	0,68	2,45	1,44	1,07	1,79	1,39	1,12
30-jul-09	1,53	0,95	0,68	2,23	1,43	1,03	1,95	1,44	1,12
08-sep-09	1,52	0,95	0,67	2,23	1,43	1,03	1,93	1,45	1,13
26-nov-09	1,52	0,95	0,68	2,22	1,43	1,03	1,90	1,42	1,12
31-dic-09	1,55	0,95	0,68	2,36	1,45	1,03	2,23	1,65	1,27
18-ene-10	1,55	0,95	0,68	2,36	1,45	1,03	2,23	1,65	1,27
24-ene-10	1,55	0,95	0,68	2,36	1,45	1,03	2,23	1,65	1,27
05-feb-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
11-feb-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
18-feb-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
24-feb-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
03-mar-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
08-mar-10	1,57	0,95	0,68	2,35	1,45	1,03	2,22	1,67	1,28
14-mar-10	1,57	0,95	0,68	2,19	1,45	1,04	2,20	1,64	1,27
20-mar-10	1,57	0,95	0,68	2,19	1,45	1,04	2,20	1,64	1,27
28-mar-10	1,57	0,95	0,68	2,19	1,45	1,04	2,20	1,64	1,27
04-abr-10	1,54	0,95	0,68	2,29	1,43	1,03	2,44	1,76	1,33
23-abr-10	1,54	0,95	0,68	2,29	1,43	1,03	2,71	1,86	1,39
29-abr-10	1,54	0,95	0,68	2,29	1,43	1,03	2,84	1,96	1,44
06-may-10	1,48	0,92	0,66	2,21	1,40	1,01	3,03	1,96	1,43
20-may-10	1,48	0,92	0,66	2,22	1,40	1,01	2,86	1,96	1,45
04-jun-10	1,36	0,86	0,61	2,08	1,33	0,97	2,55	1,82	1,23
17-ago-10	1,36	0,86	0,61	2,19	1,38	0,99	2,57	1,84	1,24
30-ago-10	1,36	0,86	0,61	2,22	1,41	1,02	2,55	1,78	1,21
21-Ene-11	1,66	0,98	0,69	2,53	1,51	1,05	2,49	1,77	1,35
17-feb-11	1,66	0,98	0,60	2,50	1,57	1,12	2,51	1,80	1,39
06-mar-11	1,97	1,19	0,86	2,14	1,47	1,11	2,71	1,97	1,44
18-mar-11	1,63	1,16	0,86	2,16	1,48	1,10	2,80	1,98	1,45
07-abr-11	1,73	1,16	0,86	2,16	1,48	1,09	2,13	1,48	1,11
20-abr-11	1,67	1,13	0,83	2,13	1,46	1,11	2,06	1,45	1,08
05-may-11	1,67	1,13	0,83	1,96	1,30	1,02	2,03	1,46	1,23
25-may-11	1,65	1,12	0,83	2,19	1,54	1,19	2,45	1,66	1,23
04-jun-11	1,65	1,18	0,83	2,20	1,54	1,19	2,46	1,67	1,23

Colore Verde: Amenaza Baja - Amarillo: Amenaza Media – Rojo: Amenaza Alta

Las Figura 28 y 29 Muestran la evolución gráfica del factor de seguridad en el periodo: junio de 2009 y junio 4 de 2011.

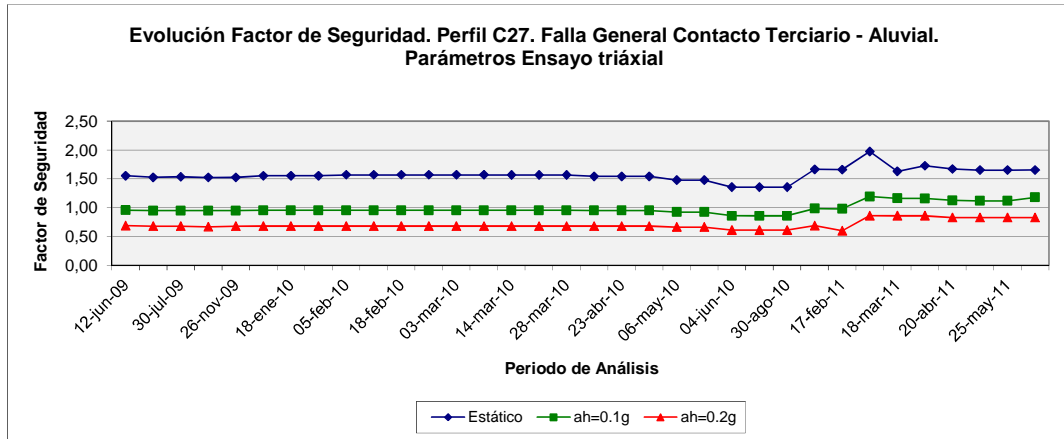


Figura 28. Gráfica de la evolución del factor de seguridad FS, a partir de junio de 2009.

El análisis de estabilidad considera una falla entre el contacto de las rocas del terciario con el depósito aluvial reciente y como material débil el paleosuelo del contacto constituido por arcilla orgánica y la propiedad de resistencia obtenida por un ensayo triaxial tipo CUU

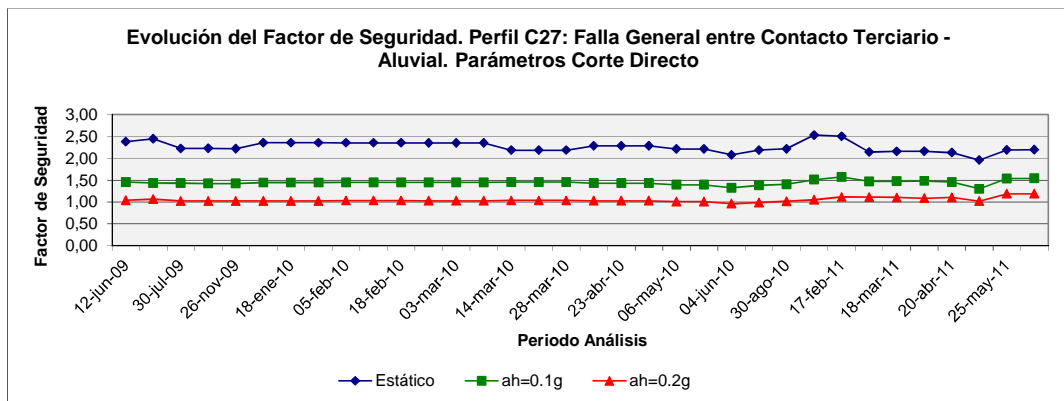


Figura 29. Misma condiciones de mecanismo de falla de la gráfica anterior. Considera como propiedad geomecánica para la falla de la materia orgánica los valores obtenidos de promedios aritméticos de ensayos de corte directo.

8.2 MONITOREO PERMANENTE

8.2.1 Deformaciones Profundas. Inclínómetros.

A través del seguimiento a las lecturas y registros de los inclinómetros se lleva un control estricto de las deformaciones que se presentan en los materiales involucrados en el deslizamiento. Adicionalmente, en la mina con base en los análisis de estabilidad se diseñó un sector que permite llevar a cabo una explotación racional y técnica. En la parte alta de esta excavación minera, que hace parte y colinda con la masa fallada se instaló para controlar deformaciones y presión del agua: inclinómetros y piezómetros respectivamente. A manera de ejemplo se muestran los registros obtenidos y analizados a través del tiempo, del inclinómetro 6. Ubicado en l parte alta del frente minero.

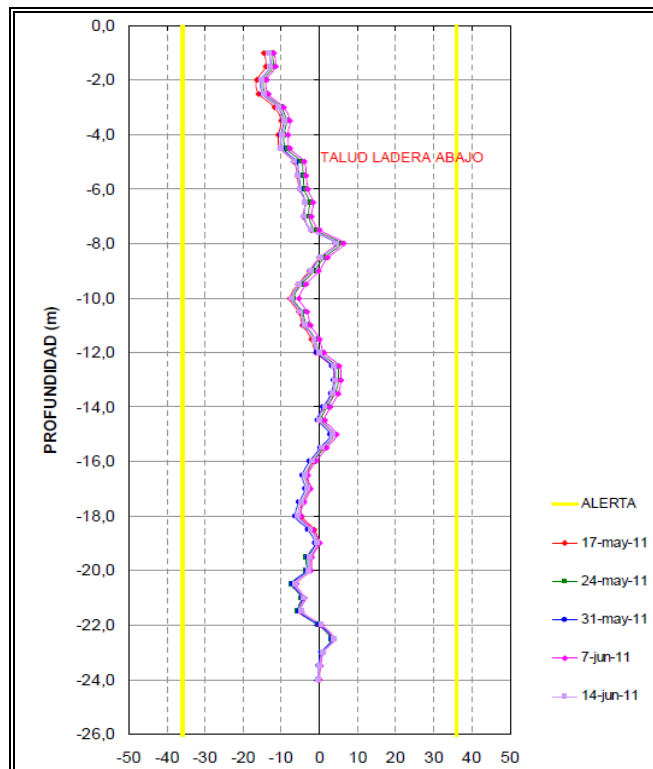


Figura 30. Deformación máxima acumulada (mm). Perforación SM-8 (inclinómetro 6). Lectura de referencia 28 de junio de 2009. (fuente C&U Instrumentación).

8.2.2 Niveles Piezométricos

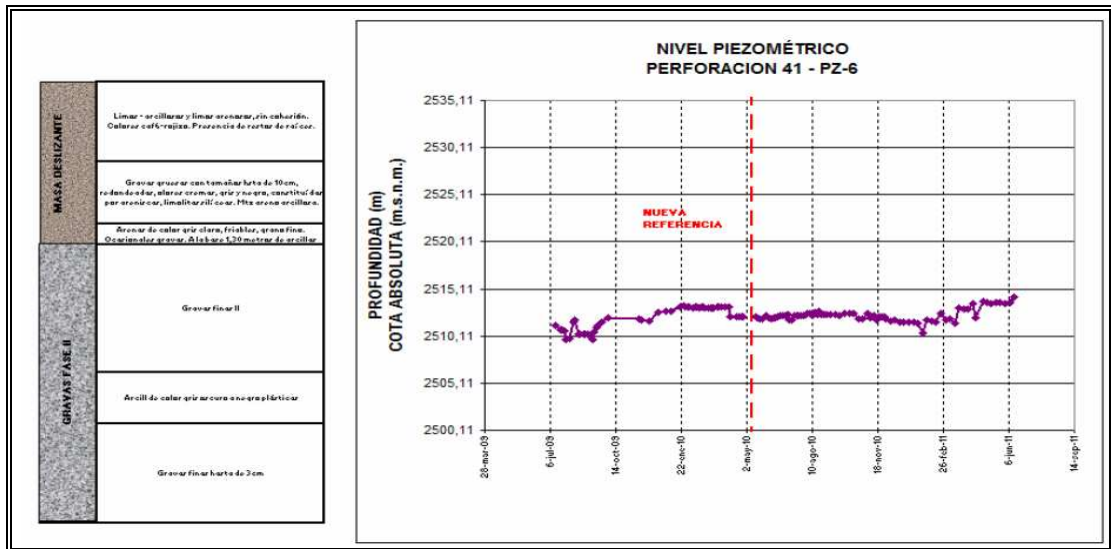


Figura 31. Lecturas acumuladas del nivel piezométrico en la perforación P-41. Con una oscilación máxima del nivel del agua de 3.44 metros. La cota topográfica media del nivel del agua es 2512.31 msnm.

8.2.3 Deformaciones Superficiales. Extensómetros. Ejemplo del Registro continuo de los extensómetros E2-1 y E2-2. El extensómetro E2-1 presenta deformaciones cercanas a 20 mm, debido al relleno mal clasificado y la presencia de arcillas expansivas.

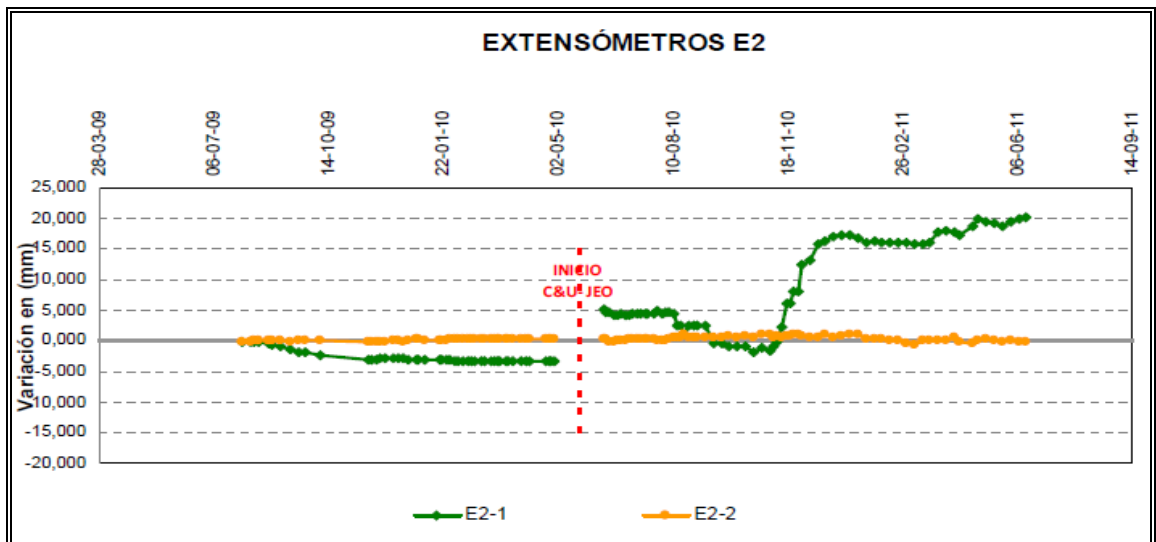


Figura 32. Oscilaciones en las lecturas de los extensómetros ubicados en la berma de la terraza 2, que corresponde a relleno de escombros mal clasificado..

9. CONCLUSIONES.

En la última campaña de perforaciones se encuentra un cambio en los contornos del basamento económico, específicamente, hacia la parte más Noroccidental del área, en donde la unidad terciaria se encuentra topográficamente más arriba del modelo del basamento anterior y una adelgazamiento de las Gravas de Fase I - unidad litológica de interés económico -. Adicionalmente, en este sector los estudios geotécnicos revelan unas condiciones de estabilidad medias a bajas, con una zona débil de potencial falla entre el contacto de las rocas de la Formación Regadera y el depósito aluvial.

La superficie de contacto entre los materiales de macizo rocoso y suelo (Rocas del Terciario y Depósito Fluvio – Torrencial) es una zona débil, con propiedades mecánicas pobres a medias, donde potencialmente se pueden generar superficies de falla y activación del deslizamiento.

La causa o “detonante” principal del deslizamiento es la pérdida de resistencia de las turbas por efectos del agua, con listado identificado de posibles fuentes pero sin determinar cuantitativamente su aporte a la masa de suelo. Los parámetros geomecánicos representativos de los materiales de macizo rocoso y suelos en el área de influencia del son: (viene de la Tabla 19)

Tabla 19. Parámetros Geomecánicos. Deslizamiento Codeipa - Mina

Material	Peso Unitario (kN/m ³)	Cohesión (kN/m ²)	Angulo de Fricción (Grados)
Relleno	19.91	24.53	23.65
Relleno Antiguo (Planta Manas)	20.55	50.00	18.00
Arcillas Grises y Negras	18.93	20.6	20.71
Arcilla Terracota	19.23	17.00	27.05
Conglomerado	24.5	196.2	21.00
Turba	15.21	0	10.00
Arenas y Gravas	19.82	16.68	32.86
Contacto Regadera	20.4	28.16	24.15
Contacto Regadera Triaxial*	20.4	0.00	13.5
Contacto Regadera Residual**	20.4	7.8	23.00
Masa Fallada	20.11	27.17	21.47

* Valores Pico tomados de ensayos triaxiales

** Valores tomados de los promedios de valores residuales obtenidos de los ensayos de corte directo

Fuente: Geología & Geotecnia Ltda

Los planos de amenaza que se enseñan, contruidos a partir de los análisis geotécnicos de estabilidad que cumplen con la resolución de la DPAE, son una herramienta fundamental de planificación en la estabilización y obras de mitigación del deslizamiento del talud de Codeipa, ya que éstos indican donde iniciar la construcción técnica de contrapesos.

Las secciones de cunetas y canales recomendadas para el manejo de aguas superficiales planteadas en el diseño de reconfiguración que cumple norma DPAE, fueron obtenidas de cálculos hidráulicos.

En el área de influencia del deslizamiento, la presencia de agua se determinó a través de los piezómetros instalados en las perforaciones. Las evidencias de campo muestran que no hay una superficie continua que marque un gradiente hidráulico y unas líneas de flujo. El flujo del agua se realiza a través de canales internos o superficies discontinuas por lo tanto no se puede hablar de un acuífero de gran potencial.

El estudio post deslizamiento cuenta con una red de monitoreo que consiste de extensómetros y 4 líneas de mojones y referencia topográficas para el control de deformaciones superficiales. Las deformaciones profundas son medidas a través de inclinómetros. La presencia de agua en la masa deslizada se monitorea a través de piezómetros tipo Casagrande e hilo vibrátil.

Al momento de la elaboración de este trabajo, el comportamiento del deslizamiento muestra un comportamiento estable, según los registros obtenidos en los dos años de continuo monitoreo.

BIBLIOGRAFÍA

Cemex Colombia S.A. Informe de Seguimiento y Control de las Actividades de Reconformación y Estabilización del Talud Codeipa (Mina Tunjuelo, Bogotá). Informes 1 a 75. Años 2009 – 2010 – 2011.

Cemex Colombia S.A. Actualización de la Estabilidad Geotécnica del Talud Codeipa, Evolución de los Factores de Seguridad. Perfiles: C1 (09)-Codeipa, C27-Planta Manas, C29-Planta Línea 2-Torres Codensa y C38-Lindero Cemex-Holcim. Mina Santa Inés. Operador Minero Cemex Colombia S.A. Informes 1 a 75. Años 2009 – 2010 - 2011

Nativa Ltda., Estudio de la Hidrogeología de la Cuenca la Quebrada Trompeta, Ubicada al Sur de Bogotá. Año 2009

Geología & Geotecnia Ltda., Deslizamiento del Talud Codeipa, Informes Técnicos GYG 039 y 148. Años 2009 y 2010.

Oxigeo Ltda. Deslizamiento del Talud Codeipa. Registro Litológico de Perforaciones. Año 2009 y 2010.

Salazar Ferro Ingenieros S.A., Deslizamiento del Talud Codeipa. Informes de Instrumentación y Monitoreo. Años 2009 y 2010.