

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN  
EN MASA PARA TRES TALUDES UBICADOS EN LAS VIAS EL SECRETO -  
AGUACLARA (5608) (PR89+500) Y MONTERREY-AGUAZUL (6512) (PR13+800  
Y PR 21+600) MEDIANTE UN ANÁLISIS DETERMINÍSTICO UTILIZANDO LA  
TEORÍA DE EQUILIBRIO LÍMITE.**

**JEFERSON ANDRÉS FUENTES GONZÁLEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN  
EN MASA PARA TRES TALUDES UBICADOS EN LAS VIAS EL SECRETO -  
AGUACLARA (5608) (PR89+500) Y MONTERREY-AGUAZUL (6512) (PR13+800  
Y PR 21+600) MEDIANTE UN ANÁLISIS DETERMINÍSTICO UTILIZANDO LA  
TEORÍA DE EQUILIBRIO LÍMITE.**

**JEFERSON ANDRÉS FUENTES GONZÁLEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Civil**

**Director:**

**Ing. WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ  
Profesor Planta, Esc. de Ingeniería Civil  
Universidad Industrial de Santander**

**Codirector:**

**Ing. ANDRÉS EDUARDO ROJAS SÁNCHEZ  
Coordinador de proyectos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2013**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	13
2. GEOLOGÍA REGIONAL	14
3. SITIO CRÍTICO PR 13 + 800	16
3.1 GEOLOGÍA LOCAL: PR 13+800	18
4. SITIO CRÍTICO PR 21+600	19
4.1 GEOLOGIA LOCAL: PR 21+600	20
5. SITIO CRÍTICO PR 89+500	21
5.1 GEOLOGIA LOCAL: PR 89+500	23
6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE EL EQUILIBRIO LÍMITE	24
6.1 FACTOR DE SEGURIDAD	25
6.2 SUPERFICIE DE FALLA	25
7. GEOMETRÍA Y ESTRATIGRAFÍA	26
8. PROPIEDADES DEL SUELO	27
9. MODELO PR 13+800	28
10. MODELO PR 21+600	30
11. MODELO PR 89+500.	33
12. VULNERABILIDAD	36
13. OBRAS DE MITIGACIÓN	38
13.1 PR 13+800. TERRAZAS O BERMAS INTERMEDIAS	39
13.2 PR 89+500. DRENES DE PENETRACIÓN	40
14. CONCLUSIONES	42
CURRICULUM	44
BIBLIOGRAFÍA	45

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa de localización general tramos Monterrey-Aguazul y El Secreto-Aguaclara	13
Figura 2. Estratigrafía regional de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio [2].	15
Figura 3. Ubicación esquemática de la masa deslizada respecto al drenaje natural en PR 13+800, costado izquierdo.	17
Figura 4. PR13+800.Deslizamiento rotacional en suelo, costado izquierdo.	17
Figura 5. Mapa geológico que muestra la presencia de depósitos de terraza Qt cerca de la zona del fallo crítico en el PR 13+800 [3]	18
Figura 6. Esquema topográfico del talud en el costado occidental del PR 21+600.	19
Figura 7. PR 21+600. Vista del talud, costado izquierdo, en el que se presentan desplomes y flujos de lodos.	20
Figura 8. Mapa geológico que muestra la presencia de suelos de la Formación caja en cercanías al fallo crítico en el PR 21+600 [3].	20
Figura 9. Esquema topográfico del talud en el costado occidental del PR 89+500.	21
Figura 10. PR 89+500. Agrietamientos en el borde externo de la calzada.	22
Figura 11. PR 89+500. Pérdida de suelos de la estructura de la vía por lavado y presencia de clasto soportado.	22
Figura 12. PR 89+500. Mapa geológico que muestra la presencia de depósitos de terraza en la zona del fallo crítico [4]	23
Figura 13. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante [5].	25
Figura 14. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud, PR 13+800.	28
Figura 15. Modelo del talud bajo condiciones estáticas. PR 13+800	29
Figura 16. Modelo de talud bajo condición dinámica. PR 13+800	30

Figura 17. PR 21+600.Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.	31
Figura 18. PR 21+600.Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.	32
Figura 19. PR 21+600.Modelo de talud bajo condición dinámica.	32
Figura 20. PR 89+500. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.	34
Figura 21. Modelo del talud bajo condiciones estáticas modelado mediante retrocálculo. PR 89+500.	34
Figura 22. PR 89+500. Modelo de talud bajo condición dinámica modelado mediante retrocálculo.	35
Figura 23. PR 13+800.Modelo de talud con terraceo bajo condición estática.	39
Figura 24. PR 13+800.Modelo de talud con terraceo bajo condición dinámica.	40
Figura 25. PR 85+900. Modelo de talud con drenes de penetración bajo condición dinámica.	41

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Factores de seguridad mínimos establecidos en NSR-10	27
Tabla 2. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo, PR 13+800	28
Tabla 3. PR 13+800. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo.	29
Tabla 4. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo, PR 21+600.	30
Tabla 5. PR 21+600. Factores de seguridad obtenidos con el software Slope W para escenarios estático y dinámico	31
Tabla 6. 89+500. Propiedades de suelo obtenidas en los ensayos de laboratorio,	33
Tabla 7. PR 89+500. Factores de seguridad obtenidos utilizando los parámetros efectivos arrojados por el ensayo de corte directo.	33
Tabla 8. PR 89+500. Factores de seguridad obtenidos utilizando retrocálculo.	34
Tabla 9. Criterios de Evaluación de Amenaza del modelo,	36
Tabla 10. Determinación del nivel de amenaza para los taludes estudiados en condición estática	37
Tabla 11. Determinación del nivel de amenaza para los taludes estudiados en condición estática.	37
Tabla 12. Factores de seguridad con terraceo del talud para escenarios estático y dinámico PR 13+800.	40
Tabla 13. Factores de seguridad con Drenes de penetración para escenarios estático y dinámico PR 89+500.	41

## RESUMEN

**Título:** DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA TRES TALUDES UBICADOS EN LAS VIAS EL SECRETO - AGUACLARA (5608) (PR89+500) Y MONTERREY-AGUAZUL (6512) (PR13+800 Y PR 21+600) MEDIANTE UN ANÁLISIS DETERMINÍSTICO UTILIZANDO LA TEORÍA DE EQUILIBRIO LÍMITE.\*

**Autor:** JEFERSON ANDRÉS FUENTES GONZÁLEZ\*\*

**Palabras clave:** Equilibrio límite, Factor de seguridad, Talud, Estabilidad, Angulo de fricción, Cohesión.

El presente estudio fue realizado con la finalidad de determinar el nivel de amenaza que presentan tres taludes ubicados a lo largo de los corredores viales de El Secreto – Aguacalera (PR89+500) y Monterrey – Aguazul (PR13+800 Y PR 21+600) sobre el borde Oriental de la Cordillera Oriental Colombiana, en la zona conocida como Piedemonte de los llanos Orientales, departamento de Casanare, así como proponer soluciones geotécnicas que mitiguen los problemas de inestabilidad que se pudieren presentar.

Para esto se utiliza la teoría del equilibrio límite, con el fin de determinar factores de seguridad en condiciones estáticas y dinámicas elaborando un modelo en el software *Slope W*. Para la elaboración de dicho modelo se utilizaran los parámetros: ángulo de fricción, cohesión, peso unitarios, niveles freáticos y cargas externas, obtenidos de los estudios realizados por el **CONSORCIO ESTUDIOS VIALES 2012**.

En consecuencia, las obras a realizar están encaminadas, en su mayoría, al manejo adecuado de las aguas lluvia mediante la implementación de drenes de penetración, zanjas de coronación y estructuras de descole y revegetalización, pues éstas constituyen una barrera importante en la interceptación de las aguas provenientes de las partes más altas.

En cuanto a la estabilidad de los taludes, el más crítico requiere la adecuación de terrazas para garantizar su estabilidad. Por tanto, se ha propuesto como tratamiento general la limpieza de la zona del pie del talud con retiro de detritos, con el fin de liberar la zona para almacenamiento de nuevo material que caerá en el futuro y mantener los taludes en posición casi vertical que aparenta estabilidad al deslizamiento. El carácter erosivo de los suelos implica que tender los taludes es exponerlos más a la acción del agua, lo que no garantiza su estabilidad.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingeniería de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Ing. WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ, Profesor Planta, Esc. de Ingeniería Civil. Codirector: Ing. ANDRÉS EDUARDO ROJAS SÁNCHEZ, Coordinador de proyectos

## ABSTRACT

**Título:** DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE AMENAZA POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA PARA TRES TALUDES UBICADOS EN LAS VIAS EL SECRETO - AGUACLARA (5608) (PR89+500) Y MONTERREY-AGUAZUL (6512) (PR13+800 Y PR 21+600) MEDIANTE UN ANÁLISIS DETERMINÍSTICO UTILIZANDO LA TEORÍA DE EQUILIBRIO LÍMITE.

**Autor:** JEFERSON ANDRÉS FUENTES GONZÁLEZ\*\*

**Keywords:** Limit equilibrium, Safety Factor, Slope, Stability, Friction angle, Cohesion.

The present study was undertaken in order to determine the level of threat that present three slopes located along the road corridors of Secreto - Aguacalara (PR89 +500) and Monterrey - Aguazul (PR13 and PR 21 +600 +800) on the Eastern edge of the Colombian Eastern Cordillera, in the area known as the Eastern Plains Piedmont, Casanare department, likewise to propose geotechnical solutions to mitigate the problems of instability that might present.

For this is used the limit equilibrium theory, in order to determine safety factors in static and dynamic conditions by developing a model in software Slope W. For the elaboration of this model will be used as parameters: friction angle, cohesion, unit weight, ground water level, and external loads, obtained from the studies conducted by the CONSORCIO ESTUDIOS VIALES 2012.

Consequently, the works to be performed are aimed mostly at proper management of stormwater by implementing penetration drains, ditches coronation and tail docking structures and revegetation, as they constitute a major barrier in the interception of water from the upper reaches.

As for the stability of the slopes, the most critical terraces requires adapting to ensure its stability. Therefore, it has been proposed as a general cleaning of the FCS area with debris removal, to release the storage area for new material will fall in the future and maintain almost vertical slope which appears sliding stability. The erosive nature of the soils tend slopes means that is exposed to more water action, which does not guarantee stability.

---

\*Degree work

\*\*School of Physics and Mechanical Engineering. School of Electrical Electronics and Telecommunications. Directed by Ing RODRIGUEZ WILFREDO DEL TORO, Professor Plant, Civil Engineering Schools. Co: Mr. ANDRES ROJAS EDUARDO SANCHEZ, Project Coordinator

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto hace parte del módulo de Geotecnia de los **“ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA REHABILITACIÓN DE LAS VIAS EL SECRETO - AGUACLARA (5608) Y MONTERREY-AGUAZUL (6512)”** ejecutados por el **CONSORCIO ESTUDIOS VIALES 2012** en el contrato 2121 de 2011, tramo vial que pertenece a la conexión central troncal del norte- troncal Villagarzón-Saravena.

Dichos estudios son de vital importancia debido a que involucran el corredor de comercio entre Bogotá y Arauca, pasando por Villavicencio y actuando también como infraestructura de apoyo para el transporte de los productos de las empresas exploradoras de petróleo en la región de Meta y Casanare, además de funcionar como un anillo de intercambio económico de la zona de los Llanos Orientales en el proyecto de integración regional entre Brasil, Colombia y Venezuela.

Los tramos viales en estudio se encuentran en el borde Oriental de la cordillera, en una litología que varía entre depósitos aluviales, depósitos coluviales, depósitos fluvio-torrenciales y rocas Terciarias.

Desde el punto de vista estructural, la vía se encuentra dentro del área de influencia de la Falla de Guaicaramo o Falla Frontal. Esto hace que se observen sectores con estratos que tienden a presentar altas inclinaciones, e incluso taludes verticalizados en los que el fracturamiento intenso facilita los procesos de meteorización y erosión concentrada característicos de la zona.

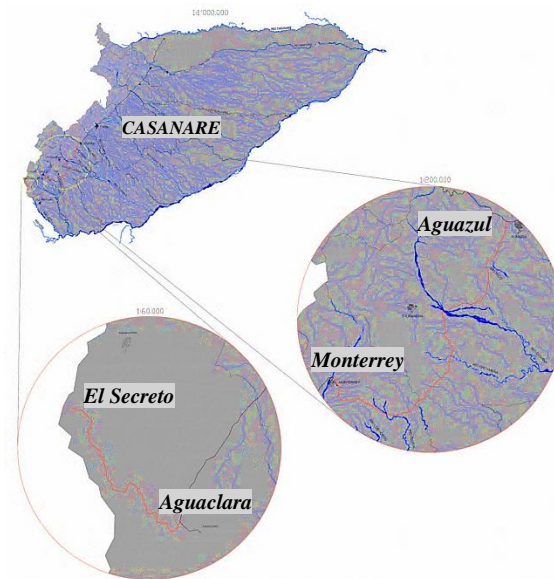
Geomorfológicamente, se tiene al occidente un sistema de montaña alineada con el comportamiento estructural SW-NE; más hacia el Oriente se tienen geoformas en lomas y cerros aislados asociados tanto a depósitos de ladera recientes, como a rocas Terciarias erodadas. En el sector más Oriental se observan morfologías planas a onduladas, asociadas a disección de depósitos aluviales y de terraza.

Por otra parte, desde el punto de vista geotécnico, superficialmente afloran suelos arenosos, limosos y arcillosos, principalmente con tendencia a una baja plasticidad. Sin embargo, por la naturaleza de las fallas, en estos sectores se hace necesario la implementación y/o mejoramiento de las estructuras de control de drenaje y aguas superficiales.

## 1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

Los corredores viales a los que pertenecen los taludes estudiados se encuentran ubicados al Sur-Occidente del departamento de Casanare; en el borde Oriental de la Cordillera Oriental colombiana, concretamente en la zona conocida como Piedemonte de los llanos Orientales. El primer tramo, con una extensión de 77 kilómetros, está ubicado más al occidente y comunica las localidades de El secreto y Aguaclara; el segundo corredor inicia a la altura del río Tua y presenta una longitud de 14 kilómetros que comunican los municipios de Monterrey y Aguazul.

**Figura 1. Mapa de localización general tramos Monterrey-Aguazul y El Secreto-Aguaclara.**



## 2. GEOLOGÍA REGIONAL

A lo largo del Piedemonte llanero se identifican las formaciones correspondientes al terciario, cuyas unidades geológicas son estratigráficamente descendentes, pero geológicamente ascendentes. Según la Agenda Ambiental del municipio de Yopal [1], dichas unidades corresponden a:

**Formación Arcillas del Limbo (*Tal*):** Formación con conjunto lodolítico y arcillolítico, colocado entre conjuntos areníticos.

**Formación Arenisca del Limbo (*Tarl*):** Compuesta por sucesión de capas de arenitas y arenitas conglomeráticas de cuarzo, separadas por dos intercalaciones métricas de lutitas, dando un relieve de escarpes muy sobresalientes.

**Formación San Fernando (*Tsf*):** Relieve bajo deprimido con respecto al terreno, consecuencia de la granulometría prevalentemente lodolítica de esta unidad; en los dos tercios inferiores se observan alineaciones de escarpes delgados y alargados de espesor métrico y decamétrico, expresando tipográficamente intercalaciones areníticas. Esta formación no se encuentra completa por ocurrir a lo largo de las fallas de Támara y Yopal.

**Conjunto Inferior de la Formación Diablo (*Tdi*):** Da al terreno un relieve sobresaliente con tres filos continuos y desatacados alternantes con dos entrantes, corresponden respectivamente a conjuntos de arenitas o de lodositas prevalentes; ocurre sobre ambos flancos de una estructura sinclinal fallada.

**Conjunto superior de la Formación Diablo (*Tds*):** Al igual que el conjunto anterior, da al terreno un relieve sobresaliente, distinguiéndose por sus formas escalonadas constituidas por delgados entrantes y salientes continuos y

demarcados, como si se conformara por paquetes de igual espesor de lodositas y arenitas alternantes.

**Formación caja (Tc):** En el núcleo de los sinclinales de Zapatosa y Nunchía se manifiesta esta unidad, dando al terreno formas deprimidas, y a su vez confirmando el paso de la secuencia prevalentemente lodolítica y arcillolítica. Presenta numerosos filos duros, discontinuos y delgados, separados por entrantes más espesos que los filos (4-5 veces); la formación se distingue porque los filos son más discontinuos y separados que la unidad subyacente.

**Figura 2. Estratigrafía regional de las unidades geológicas presentes en la zona de estudio [2].**

SECCION COLUMNAR	UNIDADES LITOSTRATIGRAFICAS	SIMBOLO	ESPESOR m	
	FORMACION CAJA	Tc	1.000	
	FORMACION DIABLO	Superior	Tds	600
		Inferior	Tdi	600
	FORMACION SAN FERNANDO	Superior	Tsfs	1.500
		Inferior	Tsfi	
	Aren. del Limbo	TarL	270	
	Arc. del Limbo	TaL	250	

### 3. SITIO CRÍTICO PR 13 + 800

El fallo se encuentra localizado en la ladera superior sobre el costado occidental del PR 13 + 800 de la Vía Monterrey-Aguazul, departamento de Casanare-Colombia, aproximadamente a 300 metros del río Cusiana.

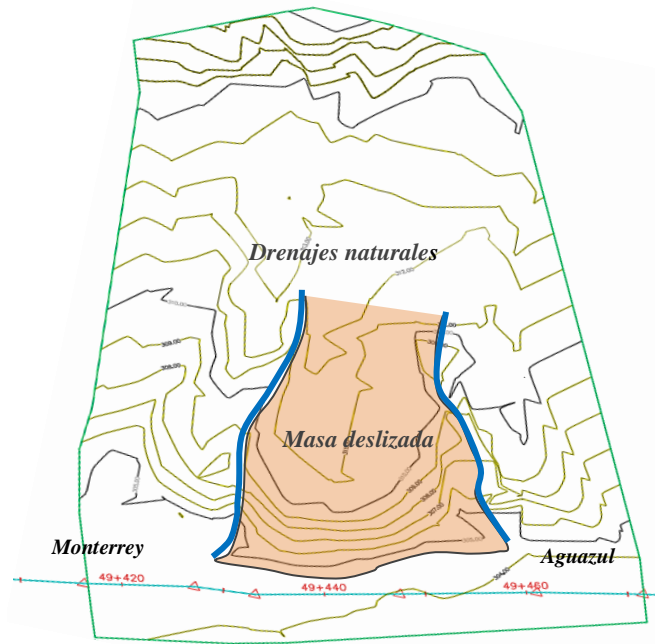
Latitud: 5° 0'45.36"N

Longitud: 72°41'1.06"O

Elevación aproximada: 315 m

Este talud presenta una altura aproximada de 15 metros y una extensión de 50 metros aproximadamente. De la topografía local levantada y la visita de campo se observa que el terreno tiene grandes pendientes del orden del 80% y un suelo con predominancia de arcillas. Además, es importante resaltar que se identificaron drenajes naturales que bordean el escarpe principal, saturando considerablemente el talud en tiempos de lluvias (**Fig. 3**). Estas características de inclinación y saturación elevadas contrarrestan los parámetros de resistencia al corte del suelo, propiciando deslizamientos evidenciados no sólo en el bloque de suelo movilizado, sino también en la reptación de la vegetación circundante.

**Figura 3. Ubicación esquemática de la masa deslizada respecto al drenaje natural en PR 13+800, costado izquierdo.**



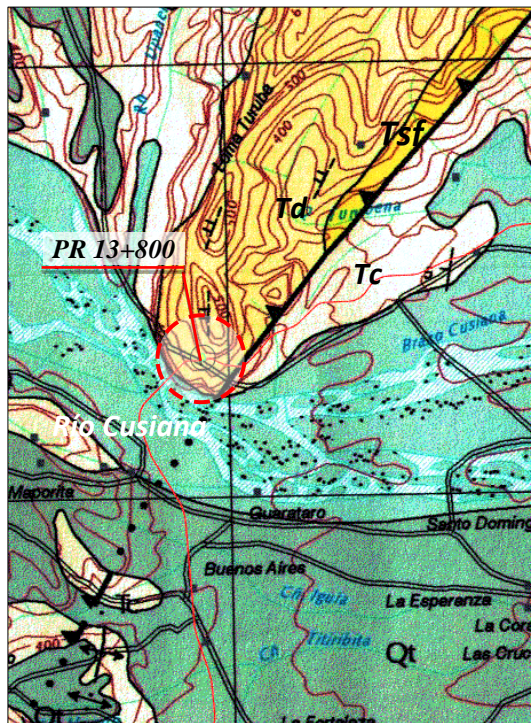
**Figura 4. PR13+800. Deslizamiento rotacional en suelo, costado izquierdo.**



### 3.1 GEOLOGÍA LOCAL: PR 13+800

En el sector se tienen superficialmente suelos transportados correspondientes a depósitos de derrubio Qd, conformados por cantos y suelos arcillosos que formaban parte de depósitos de terraza Qt (Fig. 5).

Figura 5. Mapa geológico que muestra la presencia de depósitos de terraza Qt cerca de la zona del fallo crítico en el PR 13+800 [3]



#### 4. SITIO CRÍTICO PR 21+600

El talud se encuentra localizado en la ladera superior sobre costado occidental del PR 21+600 de la Vía Monterrey-Aguazul, departamento de Casanare-Colombia.

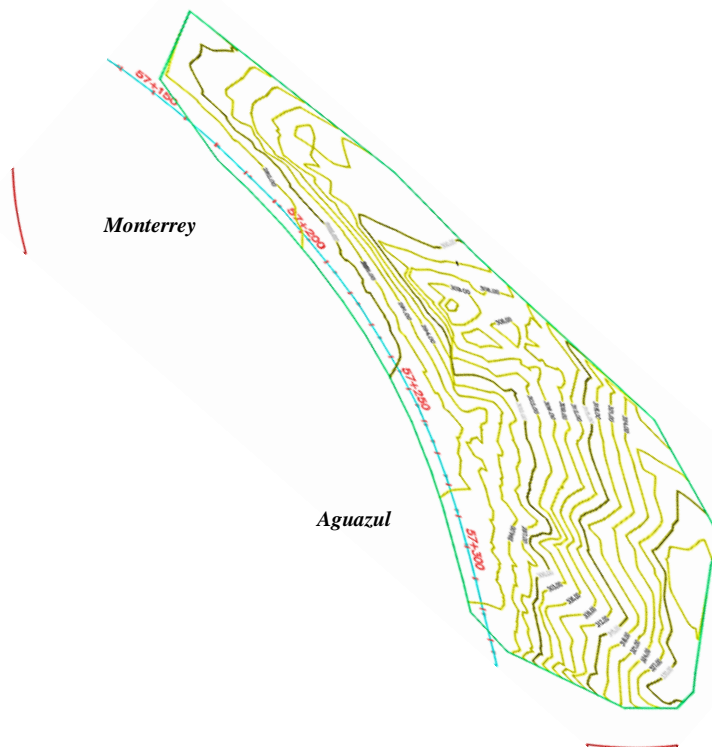
Latitud: 5° 1'49.04"N

Longitud: 72°37'10.84"O

Elevación aproximada: 291 m.

Se tiene un talud con corte en cajón, en una secuencia sedimentaria de intercalación de arcillas y areniscas lodosas, Formación caja. Se presentan desplomes y flujos de lodo que han colmatado los muros de gaviones 3 y 4 niveles (**Fig. 7**), producto de un proceso de erosión generada por caída de aguas lluvia y escorrentía sobre el talud.

**Figura 6.** Esquema topográfico del talud en el costado occidental del PR 21+600.



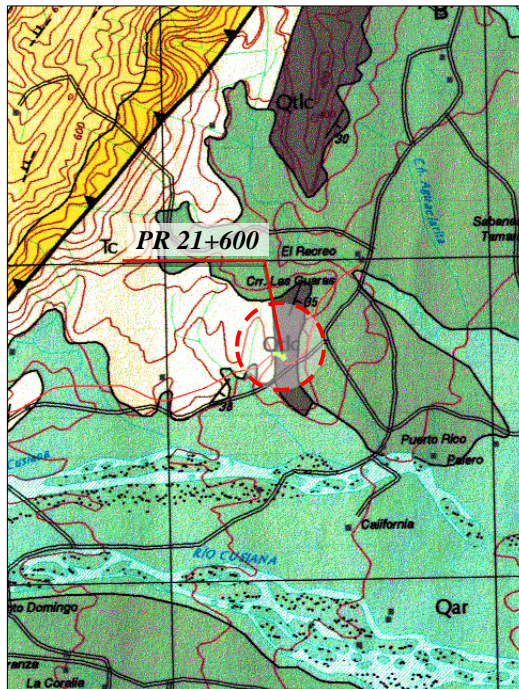
**Figura 7. PR 21+600. Vista del talud, costado izquierdo, en el que se presentan desplomes y flujos de lodos.**



#### **4.1 GEOLOGIA LOCAL: PR 21+600**

En el sector se tienen rocas de la formación caja (**Fig. 8**) constituidas por una secuencia de areniscas deleznables, areniscas lodosas y arcillolitas.

**Figura 8. Mapa geológico que muestra la presencia de suelos de la Formación caja en cercanías al fallo crítico en el PR 21+600 [3].**



## 5. SITIO CRÍTICO PR 89+500

El talud se encuentra localizado en la ladera superior sobre el costado occidental del PR 89+500 de la Vía El Secreto-Aguaclara, departamento de Casanare, Colombia, aproximadamente a 500 metros del río Cusiana.

Latitud: 5° 0'45.36"N

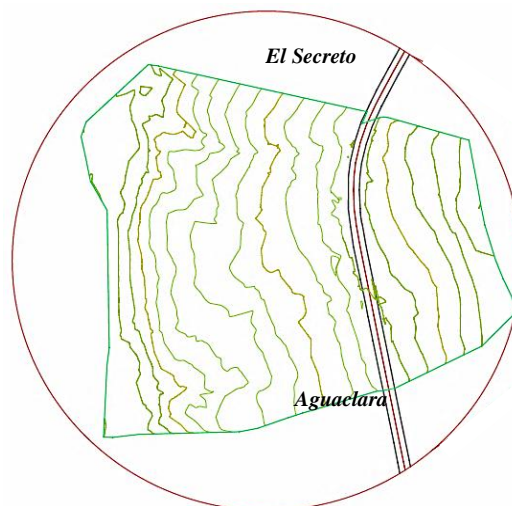
Longitud: 72°41'1.06"O

Elevación aproximada: 315 m.

En este sector, el pavimento presenta agrietamiento importante por movimiento lateral del terreno (**Fig. 10**). Es probable que dicho agrietamiento esté asociado a las variaciones en el grado de saturación del material arcilloso de la sub-rasante, facilitado a su vez por la falta o deterioro de cunetas.

Presenta, además, una morfología típica de deslizamientos rotacionales (actualmente estables) y no existen cunetas en el borde externo, lo cual facilita el lavado de los materiales del talud inferior.

**Figura 9. Esquema topográfico del talud en el costado occidental del PR 89+500.**



**Figura 10. PR 89+500. Agrietamientos en el borde externo de la calzada.**



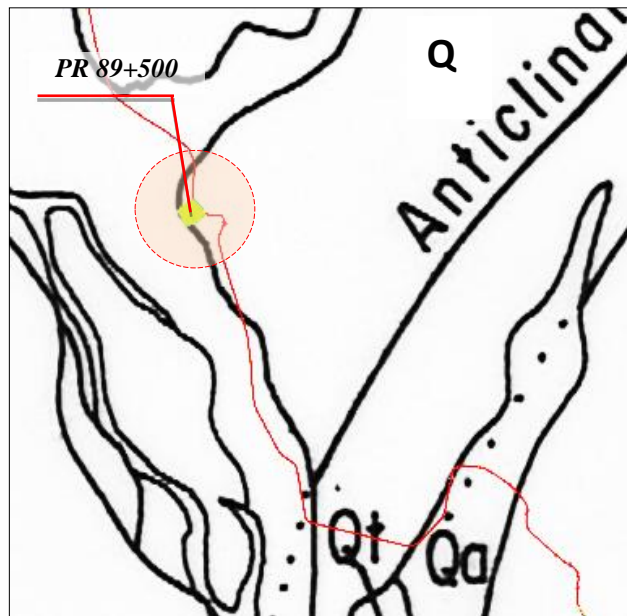
**Figura 11. PR 89+500. Pérdida de suelos de la estructura de la vía por lavado y presencia de clasto soportado.**



## 5.1 GEOLOGIA LOCAL: PR 89+500

El sector corresponde a depósitos de terraza, constituidos por cantos de tamaños bloque y grava en una matriz arcillosa, la cual puede llegar a alcanzar un 50%. El material es lodo soportado y localmente se presenta clasto soportado.

Figura 12. PR 89+500. Mapa geológico que muestra la presencia de depósitos de terraza en la zona del fallo crítico [4]



## 6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD MEDIANTE EL EQUILIBRIO LÍMITE

El método de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes parte de los parámetros básicos de la resistencia de los suelos como son: geometría del talud, presión de poros, cargas estáticas y dinámicas, presencia de grietas de tensión, ángulo de fricción de los materiales, cohesión, etc., para determinar un factor de seguridad. Dicho factor es una medida de la capacidad del suelo del talud para resistir los esfuerzos cortantes que producen la falla.

Aunque existen diferentes métodos de Equilibrio límite, en todos ellos se intenta determinar una superficie de falla, así como las fuerzas o momentos actuantes y resistentes sobre dicha superficie.

Un análisis de equilibrio límite supone que un valor de factor de seguridad  $F.S=1.0$  indica que la pendiente del talud está en el límite entre la estabilidad y la inestabilidad, por lo que éste habrá fallado o estará en estado inminente de falla, ya que las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas.

Estos métodos son los más utilizados en la práctica común, debido a su sencillez, y porque el valor del factor de seguridad obtenido no dista demasiado del valor real.

Además, han sido utilizados por varias décadas para taludes terrestres sujetos a fuerzas gravitacionales Therzagui (1943), Taylor (1948), Bishop (1955), Morgenster y Price (1965 y Janbu 1973) – con el fin de obtener el factor de seguridad como herramienta útil en la toma de decisiones.

## 6.1 FACTOR DE SEGURIDAD

Fellenius (1922)[5], [8] presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al cortante disponible}}{\text{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

En las superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

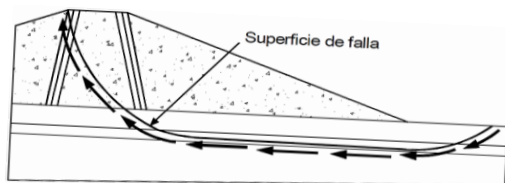
$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

Se asume que el factor de seguridad es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de falla.

## 6.2 SUPERFICIE DE FALLA

El término “superficie de falla” se utiliza para referirse a una superficie asumida, a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud. Sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente (**Fig. 13**).

Figura 13. Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante [5].



## **7. GEOMETRÍA Y ESTRATIGRAFÍA**

El modelo geotécnico se trabajó con las secciones de la topografía levantada para cada uno de los sitios; los tipos de material para los suelos fueron determinados en las exploraciones realizadas para los puntos críticos a ser modelados.

## 8. PROPIEDADES DEL SUELO

Las propiedades de los suelos fueron tomadas de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, de las correlaciones realizadas y de los métodos para la estimación de los parámetros efectivos de cada uno de ellos.

Para la realización de ensayos de corte directo en algunos suelos donde no fue posible hacer muestreo inalterado, se realizó una correlación usando el método de Álvaro González [6] en función de los valores de SPT (Ensayo de Penetración Estándar) corregidos por energía y profundidad.

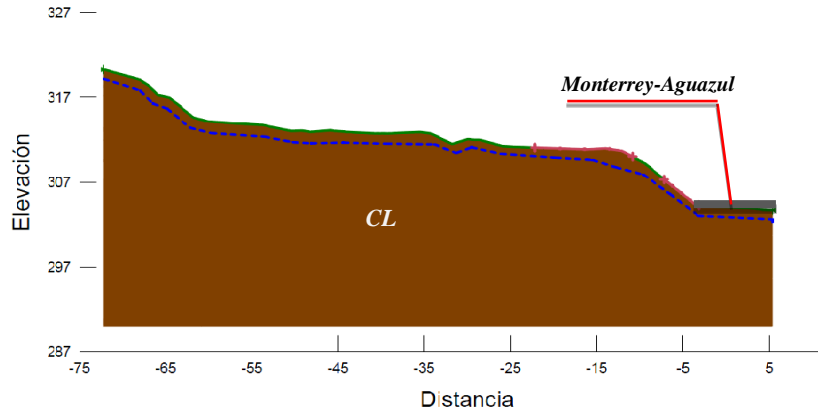
De acuerdo con la Norma NSR-10 [7], la zona de estudio se clasifica como de amenaza sísmica alta, a la que le corresponde un valor medio de aceleración sísmica horizontal de 0.30. La carga sísmica utilizada en el modelamiento consideró la reducción de dos terceras partes de este valor que permite la misma norma, es decir: 0.20.

**Tabla 1. Factores de seguridad mínimos establecidos en NSR-10**

CONDICIÓN DEL TAUD	FSBM
	Diseño
<i>Estática y Agua Subterránea Normal</i>	1.50
<i>Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y coeficiente Sísmico de Diseño</i>	1.05

## 9. MODELO PR 13+800

Figura 14. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud, PR 13+800.



Para establecer los parámetros efectivos  $\phi$  y  $C$  de este sitio crítico se utilizó retrocálculo, debido a la evidencia en campo de falla rotacional en el talud y a que no se contaba con ensayo de corte directo. Los valores así establecidos fueron:  $\phi=17^\circ$  y  $C=10\text{kPa}$  (Ver Fig. 15. Y Fig. 16.), parámetros con los cuales se obtuvieron los factores de seguridad promedio para los escenarios estático y dinámico de 0.99 y 0.69 respectivamente (ver Tabla 3). En cuanto a la línea piezométrica del nivel freático, se considera que está saturando todo el talud por las observaciones descritas en el numeral 4.

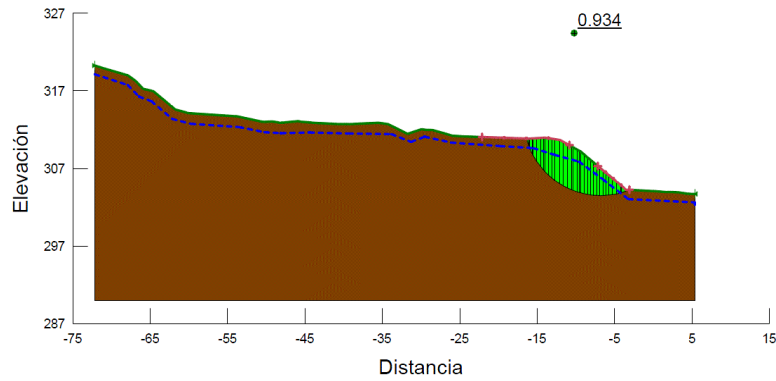
Tabla 2. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo, PR 13+800

Método/F.S.	Estático	Dinámico
<i>Fellenius</i>	0.934	0.667
<i>Bishop</i>	1.031	0.720
<i>Janbú</i>	0.949	0.650
<i>Spencer</i>	1.032	0.726
<i>Promedio</i>	0.990	0.690

**Tabla 3. PR 13+800. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo.**

<b>Modelo: Mohr-Coulomb</b>		
Clasificación		CL
Altura total [m]		15
Fricción [ $\phi^\circ$ ]		23
Cohesión [kPa]		11
Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]		17.25
N.F. [m]		Saturado
Carga sísmica [g]		0.20

**Figura 15. Modelo del talud bajo condiciones estáticas. PR 13+800**



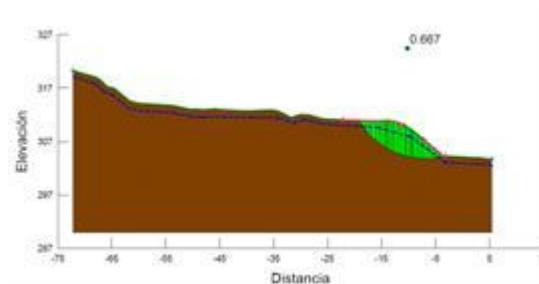
## 10. MODELO PR 21+600

Para el estudio de este sitio crítico se cuenta con información de un ensayo de corte directo tomado sobre muestra inalterada en borde de la vía, posiblemente sobre material caído, por esta razón se toma el valor de la cohesión obtenido en dicho ensayo y se considera que el ángulo de fricción no es confiable. Luego se procede a estimarlo mediante el método de Álvaro González con los valores de N obtenidos en el SPT, obteniendo la información mostrada en la **Tabla 4**.

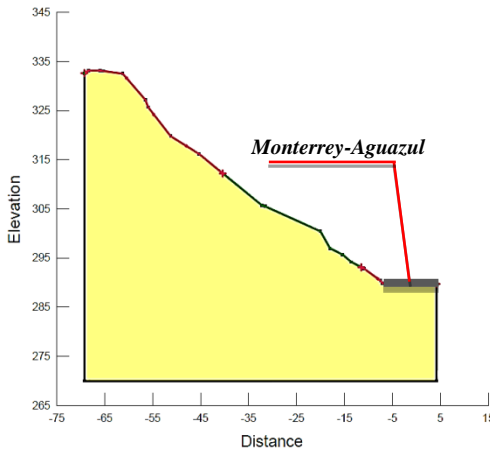
**Tabla 4. Propiedades de suelo utilizadas en la elaboración del modelo, PR 21+600.**

<b>Modelo: Mohr-Coulomb</b>		
Clasificación		CL
Altura total [m]		42
Fricción [ $\phi^\circ$ ]		43
Cohesión [kPa]		20
Peso Unit. [kN/m <sup>3</sup> ]		17.25
N.F. [m]		No se identifica.
Carga sísmica [g]		0.20

**Figura 16. Modelo de talud bajo condición dinámica. PR 13+800**



**Figura 17. PR 21+600. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.**



Los factores de seguridad obtenidos (**Tabla 5**) arrojan una condición de estabilidad tanto para el escenario estático como para el dinámico (**Fig. 18, Fig. 19**). Sin embargo, mediante la observación en campo del talud se identifica un alto grado de erosión, por lo que se decide ejecutar obras que permitan el adecuado manejo de las aguas lluvia.

**Tabla 5. PR 21+600. Factores de seguridad obtenidos con el software Slope W para escenarios estático y dinámico**

<b>Método/F.S.</b>	<b>Estático</b>	<b>Dinámico</b>
<i>Fellenius</i>	1.683	1.178
<i>Bishop</i>	1.796	1.279
<i>Janbú</i>	1.670	1.171
<i>Spencer</i>	1.787	1.284
<i>Promedio</i>	1.734	1.228

Figura 18. PR 21+600. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.

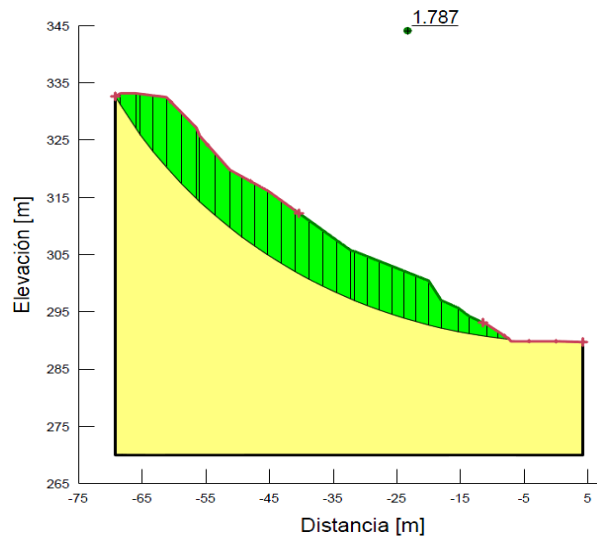
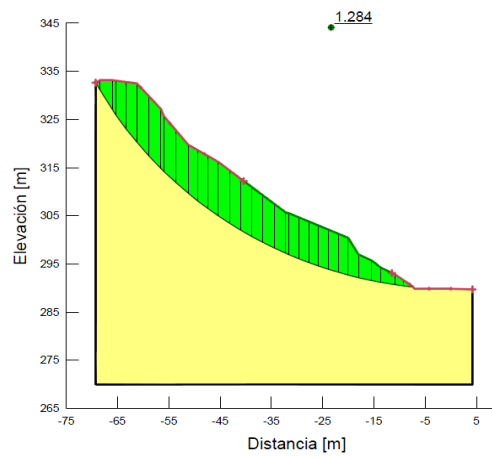


Figura 19. PR 21+600. Modelo de talud bajo condición dinámica.



## 11. MODELO PR 89+500.

En este fallo se cuenta con información obtenida de ensayo de corte directo y peso unitario de una muestra inalterada compilada en la **Tabla 6**. Se obtuvieron los factores de seguridad promedio para los escenarios estático y dinámico de 1.653 y 0.924 respectivamente (**Tabla 7**), evidenciando inestabilidad para el caso dinámico. Sin embargo, debido a la evidencia de falla en campo, se evaluaron los parámetros de resistencia mediante retro cálculo para obtener un F.S estático cercano a 1, con lo cual se determinaron valores de **C=11kPa** y  **$\phi=23^\circ$** , obteniendo así los factores de seguridad

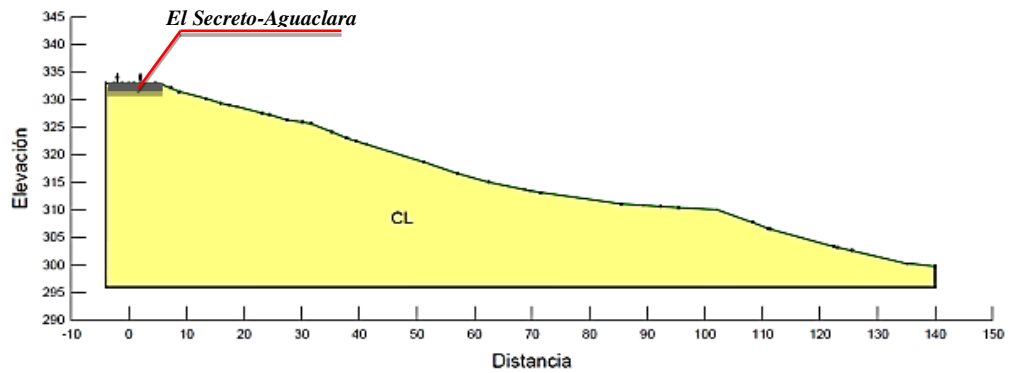
**Tabla 6. 89+500.Propiedades de suelo obtenidas en los ensayos de laboratorio,**

<b>Modelo: Mohr-Coulomb</b>		
<i>Clasificación</i>		<i>CL</i>
<i>Altura total</i>	<i>[m]</i>	<i>37</i>
<i>Fricción</i>	<i><math>[\phi^\circ]</math></i>	<i>27</i>
<i>Cohesión</i>	<i>[kPa]</i>	<i>25</i>
<i>Peso Unit.</i>	<i>[kN/m<sup>3</sup>]</i>	<i>17.2</i>
<i>N.F.</i>	<i>[m]</i>	<i>0 Saturado.</i>
<i>Carga sísmica</i>	<i>[g]</i>	<i>0.2</i>

**Tabla 7. PR 89+500.Factores de seguridad obtenidos utilizando los parámetros efectivos arrojados por el ensayo de corte directo.**

<b>Método/F.S.</b>	<b>Estático</b>	<b>Dinámico</b>
<i>Fellenius</i>	<i>1.525</i>	<i>0.802</i>
<i>Bishop</i>	<i>1.746</i>	<i>0.990</i>
<i>Janbú</i>	<i>1.591</i>	<i>0.888</i>
<i>Spencer</i>	<i>1.751</i>	<i>1.015</i>
<i>Promedio</i>	<i>1.653</i>	<i>0.924</i>

**Figura 20. PR 89+500. Perfil topográfico y modelo geotécnico de talud.**



En cuanto el nivel freático, se considera saturación total del talud debido a afloramientos de agua evidenciados sobre la ladera de la vía y teniendo en cuenta además la cercanía con el Río Cusiana. (Ver **Fig. 21** y **Fig. 22**)

**Tabla 8. PR 89+500. Factores de seguridad obtenidos utilizando retrocálculo.**

Método/F.S.	Estático	Dinámico
<i>Fellenius</i>	1.006	0.484
<i>Bishop</i>	1.195	0.597
<i>Janbú</i>	1.080	0.533
<i>Spencer</i>	1.202	1.617
<i>Promedio</i>	1.12	0.560

**Figura 21. Modelo del talud bajo condiciones estáticas modelado mediante retrocálculo. PR 89+500.**

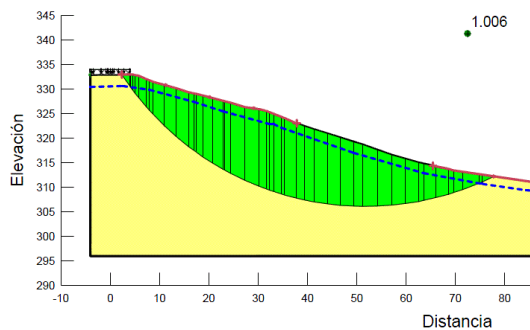
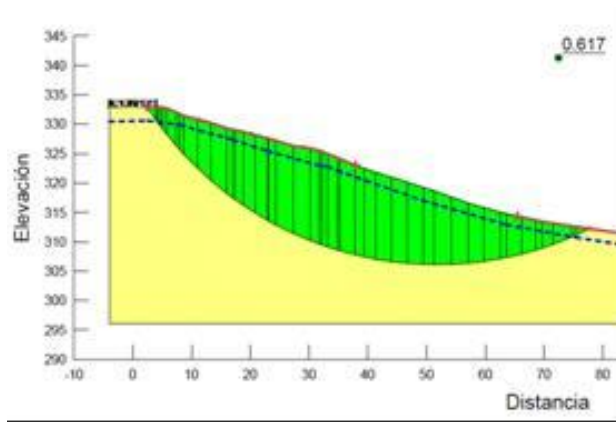


Figura 22. PR 89+500. Modelo de talud bajo condición dinámica modelado mediante retrocálculo.



## 12. VULNERABILIDAD

El Proceso con el cual se determinó el nivel de amenaza que presentaban los sitios críticos descritos fue realizado mediante la clasificación de los factores de seguridad obtenidos en modelos.

Dicha Clasificación se llevó a cabo teniendo en cuenta los criterios utilizados por la CDMB descritos en las “NORMAS TECNICAS PARA EL CONTROL DE EROSION Y PARA LA REALIZACION DE ESTUDIOS GEOLOGICOS GEOTECNICOS E HIDROLOGICOS” establecidas por la misma entidad; esto debido a que para el departamento de Casanare no se encontró información que permitiera determinar el nivel de amenaza. (Ver **tabla 9.**).

**Tabla 9. Criterios de Evaluación de Amenaza del modelo,**

<b>Condición Estática</b>	<b>FS</b>
Amenaza Baja	> 1.5
Amenaza Media	1.25 - 1.5
Amenaza Alta	< 1.25
<b>Condición con Sismo y agua Extrema</b>	<b>FS</b>
Amenaza Baja	> 1.20
Amenaza Media	1.0 – 1.20
Amenaza Alta	< 1.0

Luego, la determinación del nivel de amenaza para los tres sitios crítico según los criterios establecidos por la CDMB se establece en las **tablas 10 y 11.**

**Tabla 10. Determinación del nivel de amenaza para los taludes estudiados en condición estática**

<b>Condición estática</b>		
<b>PR</b>	<b>F.S. Estático</b>	<b>Amenaza</b>
<b>13+800</b>	0.990	Alta
<b>21+600</b>	1.734	Baja
<b>89+500</b>	1.12	Alta

**Tabla 11. Determinación del nivel de amenaza para los taludes estudiados en condición estática.**

<b>Condición dinámica (sismo)</b>		
<b>PR</b>	<b>F.S. Dinámico</b>	<b>Amenaza</b>
<b>13+800</b>	0.69	Alta
<b>21+600</b>	1.228	Baja
<b>89+500</b>	0.56	Alta

### **13. OBRAS DE MITIGACIÓN**

De acuerdo con lo evidenciado en campo y lo establecido en el modelo geotécnico para el tramo El Secreto- Aguaclara, en el PR 89+500 se presenta inestabilidad en condición estática y dinámica, por lo que se recomienda utilizar drenes de penetración, con el fin de disminuir la altura del N.F. y mitigar las condiciones extremas del nivel freático, aumentando de esa manera el factor de seguridad.

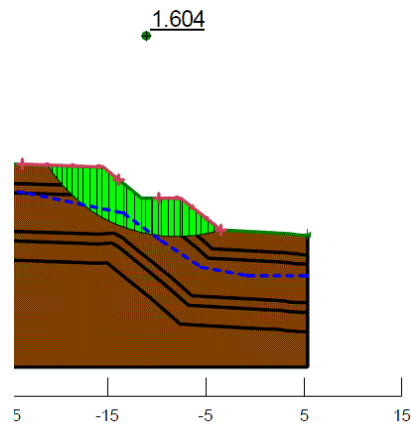
En el tramo Monterrey – Aguazul sobre el PR 13+800 se evidencia (en campo) inestabilidad en condiciones estáticas, razón por la que se propone realizar un escalonamiento del talud con bermas de 4.0 metros de ancho, altura equivalente a la mitad del talud (3m) y revegetalización; en tal caso se deben construir cunetas a lo largo de las bermas y estructuras de descole para evitar formación de procesos erosivos. Se entiende que las secciones son cambiantes y que las bermas deben ser acopladas a ellas, de manera que se ofrezca la seguridad y la eficiencia para evacuación de las aguas requeridas.

Contrariamente, sobre el PR 21+600 se encuentran factores de seguridad mayores de 1 y está clasificado con nivel de amenaza baja, tanto para condición estática como dinámica, por lo que se considera estable por deslizamiento. Sin embargo, la presencia de coluviones que cubren los muros de gaviones presentes en el pie del talud indica desprendimiento de material por efectos erosivos provocados por las lluvias. Debido a lo anterior, se recomienda la implementación de zanjas de coronación que intercepten y conduzcan las aguas adecuadamente, además de un mantenimiento consistente en el retiro de detritos en el espaldón del muro para permitir el almacenamiento de material caído. Complementariamente, se recomienda revegetalizar el talud teniendo en cuenta que la técnica utilizada debe ser indicada para uso en altas pendientes.

### 13.1 PR 13+800. TERRAZAS O BERMAS INTERMEDIAS

“Este sistema disminuye las fuerzas desestabilizadoras actuantes en la zona más crítica. Como indica Suárez [8]: “(...) en esta forma el círculo crítico de falla se hace más profundo y más largo aumentándose el factor de seguridad. Al construir las terrazas, el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, los cuales a su vez deben ser estables. El terraceo se puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación.” (Suárez, 1998: 418)

Figura 23. PR 13+800. Modelo de talud con terraceo bajo condición estática.



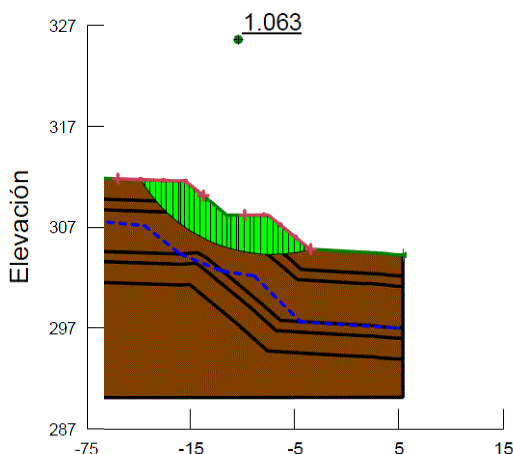
La implementación de las terrazas en el modelo logra elevar el factor de seguridad estático y dinámico a valores de estabilidad requeridos por la NSR-10 (Ver **tabla 1.**). Sin embargo, aunque para el caso estático el nivel de amenaza se clasifica como bajo, para el caso dinámico se considera como amenaza media (**Tabla 12**).

**Tabla 12. Factores de seguridad con terraceo del talud para escenarios estático y dinámico  
PR 13+800.**

<b>Método/F.S.</b>	<b>Estático</b>	<b>Dinámico</b>
<i>Fellenius</i>	1.516	1.005
<i>Bishop</i>	1.606	1.062
<i>Janbú</i>	1.448	0.965
<i>Spencer</i>	1.604	1.063
<i>Promedio</i>	1.540	1.020
<b>Amenaza</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>

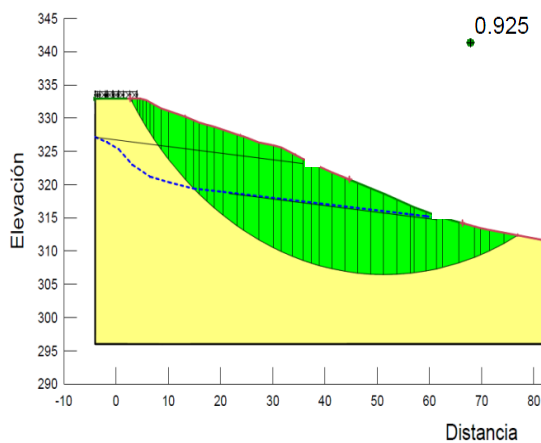
### 13.2 PR 89+500. DRENES DE PENETRACIÓN

**Figura 24. PR 13+800. Modelo de talud con terraceo bajo condición dinámica.**



“(…) consiste en una tubería perforada colocada a través de una masa de suelo mediante una perforación profunda subhorizontal o ligeramente inclinada, con la cual se busca abatir el nivel freático hasta un nivel que incremente la estabilidad del talud. La principal ventaja de los drenes horizontales es que son rápidos y simples de instalar y se puede obtener un aumento importante del factor de seguridad del talud en muy poco tiempo.” (Suárez, 1998: 452)

**Figura 25. PR 85+900. Modelo de talud con drenes de penetración bajo condición dinámica.**



Obteniendo de esta manera los F.S. descritos en la **tabla 13** para el PR 89+500

**Tabla 13. Factores de seguridad con Drenes de penetración para escenarios estático y dinámico PR 89+500.**

<b>Método/F.S.</b>	<b>Estático</b>	<b>Dinámico</b>
<i>Fellenius</i>	1.648	0.922
<i>Bishop</i>	1.823	1.089
<i>Janbú</i>	1.668	0.925
<i>Spencer</i>	1.833	1.075
<i>Promedio</i>	1.833	1.000
<b>Amenaza</b>	<b>Baja</b>	<b>Media</b>

## 14. CONCLUSIONES

En general, a lo largo de los dos corredores viales, según se evidencia en los sondeos y posteriores clasificaciones realizadas en el laboratorio en la zona de estudio, afloran suelos arenosos, limosos y arcillosos principalmente con tendencia a una baja plasticidad y alto grado de erosionabilidad, por lo cual se hace necesaria la implementación y/o mejoramiento de las estructuras de control de drenaje y aguas superficiales.

En algunos puntos de la vía se encontraron agrietamientos longitudinales importantes que de alguna forma han sido producidos por pequeños movimientos laterales, los cuales se deben fundamentalmente a la falta o insuficiencia de los drenajes longitudinales y cunetas que eviten la saturación de los materiales de la estructura de la vía y de la subrasante misma, que como se ha dicho, corresponden casi siempre a suelos con fracción fina importante, en la mayoría de los casos arcillosos.

En consecuencia, las obras a realizar están encaminadas, en su mayoría, al manejo adecuado de las aguas lluvia mediante la implementación de drenes de penetración, zanjas de coronación y estructuras de descole y revegetalización, pues éstas constituyen una barrera importante en la interceptación de las aguas provenientes de las partes más altas.

Se observa que la mayoría de los taludes presentan signos de acción de la erosión, la cual por falta de cunetas en la parte alta de los taludes o deterioro de ellas por el mismo proceso, atacan la parte frontal del talud, depositando los detritos en el pie del mismo, manteniéndose generalmente los taludes con inclinación casi vertical.

Igualmente se encuentra necesario colocar cunetas en gran parte del trazado y en algunos casos reconstruirlas, para que la función de conducir las aguas superficiales se haga con mayor eficacia. Nuevamente, el control de aguas en estos tramos es muy importante debido al carácter erosivo de los suelos.

En cuanto a la estabilidad de los taludes, el más crítico requiere la adecuación de terrazas para garantizar su estabilidad. Por tanto, se ha propuesto como tratamiento general la limpieza de la zona del pie del talud con retiro de detritos, con el fin de liberar la zona para almacenamiento de nuevo material que caerá en el futuro y mantener los taludes en posición casi vertical que aparenta estabilidad al deslizamiento. El carácter erosivo de los suelos implica que tender los taludes es exponerlos más a la acción del agua, lo que no garantiza su estabilidad.

Otra actividad que se debe desarrollar es la de recuperar los muros de contención en gaviones, los cuales en muchos casos se han deteriorado y en algunos otros requieren de mayor capacidad de contención.

## **CURRICULUM**

**Wilfredo**

**DEL TORO RODRIGUEZ**

Ingeniero Civil M Sc

Profesor Planta, Esc. de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

wilfredodeltoro@yahoo.com.mx

**Andrés Eduardo**

**ROJAS SÁNCHEZ**

Ingeniero Civil ESP.

Universidad Industrial de Santander

Coordinador de proyectos

Consorcio Estudios Viales 2012

casanare2121@yahoo.com

**Jeferson Andrés**

**FUENTES GONZÁLEZ**

Estudiante de Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Jandres.efe@gmail.com

## BIBLIOGRAFÍA

[1] “Agenda ambiental del Municipio de Yopal”. Disponible en: <http://yopal.casanare.gov.co/planeacion.shtml?apc=plPlan%20Ambiental-1-&x=2593424>  
[Citado Julio 20 de 2013].

[2] H. D. Jiménez, & T. van der Hammen, “Significado geológico y asociaciones palinológicas de las formaciones Diablo Inferior (Mioceno Tardío) y San Fernando Superior (Mioceno Medio), Piedemonte Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia,” Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales, Vol. 31, No. 121, Diciembre 2007, pp. 481 – 489.

[3] I INGEOMINAS. Ulloa, Carlos E., Rodríguez, Erasmo., et al. 1983. Plancha 211, Tauramena. Escala 1: 100.000

[4] INGEOMINAS. Mapa tectónico Borde Llanero. Planchas 210-211-219-230. Escala 1:100.000.

[5] J. Suarez Díaz, “Análisis de Estabilidad”. En: “Deslizamientos, Vol. 1: Análisis Geotécnico (Cap. 4)” Bucaramanga, División de publicaciones UIS, 2009, pp. 126-136.

[6] A. J. González, “Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT”, X jornadas geotécnicas de la Ingeniería colombiana – SCI – SCG, Bogotá, 1999, pp. 12 – 17.

[7] “Título A - Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente”. En: “Reglamento Colombiano de Construcción sismo resistente (NSR-10)”: Bogotá, Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.

[8] J. Suárez Díaz, “Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales”. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, 1998.