

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA ESTABILIDAD DE LADERA
UBICADA EN EL KM 4+430 VÍA TUNJA-ARCABUCO (BOYACÁ)

GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION FOR THE STABILITY OF THE HILLSIDE
LOCATED AT KM 4 + 430 VIA TUNJA-ARCABUCO (BOYACA)

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA PARA A ESTABILIDADE DA MONTANHA
LOCALIZADA NO KM 4 + 430 VIA TUNJA-ARCABUCO (BOYACÁ)

SICHACÁ GÁMEZ Iván Darío¹

BERNAL VILLATE, Andres Felipe²

¹Estudiante Esp. Geotecnia Vial y Pavimentos, Universidad Santo Tomás, ivan.sichaca@usantoto.edu.co

² Director. Ingeniero Civil. MSc Geotecnia. Universidad Santo Tomas. Andres.bernalv@usantoto.edu.co

Resumen — Este documento presenta la caracterización geotecnia para plantear la metodología de estabilización de la ladera ubicada en la vereda la colorada al noroccidente de la ciudad de Tunja, sobre la vía Tunja-Arcabuco (Ruta 62) a la altura del KM 4+430. Dicho estudio incluye la realización de sondeos, descripción de las pruebas de campo y ensayos de laboratorio con sus respectivos análisis, los cuales permitieron caracterizar los parámetros de resistencia al corte de cada una de las capas de suelo que conforman las partes de la ladera como lo son corona, cuerpo y pie; junto con ello se estableció la ubicación del nivel freático. Con base en la información recolectada se realizó el modelo de la ladera en el programa “Geo-Slope”. La modelación tuvo como propósito definir el factor de seguridad (FS) con el que cuenta actualmente la ladera y partiendo de este investigar y proporcionar una medida de estabilización si fuere necesario.

Palabras clave — Ladera, factor de seguridad, suelo, estabilización, modelo matemático.

Abstract — This document presents the geotechnical characterization to propose the stabilization methodology of the slope located in the vereda la colorada to the northwest of the city of Tunja, on the Tunja-Arcabuco road (Route 62) at the height of KM 4+430. This study includes the execution of soundings, description of the field tests and laboratory trials with their respective analyses, which allowed characterizing the parameters of resistance to cutting of each one of the layers of soil that conform the parts of the slope such as crown, body and foot; together with this the location of the phreatic level was established. Based on the information collected, a model of the slope was made in the "Geo-Slope" program. The purpose of the modeling was to define the safety factor (SF) that the slope currently has and, based on this, to investigate and provide a measure of stabilization if necessary.

Keywords — *Slope, safety factor, soil, stabilization, mathematical model.*

Resumo — Este documento apresenta a caracterização geotécnica para propor a metodologia de estabilização do talude localizado na aldeia la colorada a noroeste da cidade de Tunja, na estrada Tunja-Arcabuco (Rota 62) no quilômetro 4 + 430. Referido estudo inclui a realização de levantamentos, descrição de testes de campo e testes de laboratório com suas respectivas análises, o que permitiu caracterizar os parâmetros de resistência ao cisalhamento de cada uma das camadas de solo que compõem as partes do talude como eles são coroa, corpo e pé; Junto com isso, a localização do lençol freático foi estabelecida. Com base nas informações coletadas, o modelo de declive foi feito no programa “Geo-Slope”. O objetivo da modelagem foi definir o fator de segurança (FS) que o declive possui atualmente e com base nesta investigação e fornecer uma medida de estabilização, se necessário.

Palavras Chave — Encosta, Fator de segurança, Chão, Estabilização, Modelo matemático

I. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de inestabilidad de taludes y laderas, corresponden a diversos procesos naturales que pueden llegar a ocasionar importantes afectaciones a nivel ambiental, económicos y de infraestructura. Su magnitud es tal que, en general, pueden llegar a superar en daños a los terremotos y tsunamis. Sin embargo, al desarrollar proyectos de infraestructura vial, y teniendo en cuenta las características y el comportamiento de los materiales, se pueden llegar a contar con unos resultados óptimos, mejorando de esta forma las condiciones de movilidad y transitabilidad en algún sector específico. Teniendo en cuenta esta situación, el conocimiento de las propiedades de los materiales, como también sus diferentes características se hacen primordiales, por lo cual resulta importante su estudio físico-mecánico para tener una correcta identificación de parámetros directos e indirectos que afecten su estabilidad como lo puede ser la información suministrada por parte del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, climatología histórica por parte de IDEAM y TuSIG. (Campos, Rubiano, & Ramirez , 2012)

A nivel general, uno de los primeros signos de inestabilidad de laderas son la aparición de grietas de tracción y deformación del material en la parte superior del talud y en los flancos del movimiento de ladera. Estas grietas pueden llegar a saturarse, facilitando la reducción de su resistencia al esfuerzo cortante; al mismo tiempo se incrementan los empujes hidrostáticos que desestabilizan la ladera. (Galalrdo Amaya, Guerrero Barbosa, & Macgregor Torrado, 2013)

En Boyacá a partir del año 2006 y hasta el año 2014 se presentaron 3.181 muertos y 12,3 millones de afectados a partir de desastres naturales en donde se presentan los deslizamientos de laderas en zonas urbanas y rurales donde habita población vulnerable. (Giraldo Vallejo & Rodriguez Isaza, 2019)

La siguiente investigación busca establecer el nivel de seguridad actual con la que la ladera cuenta, mediante un método de estabilidad que permita brindar protección y confort a las estructuras y poblaciones cercanas a la zona en estudio que comprende población urbana.

A nivel global, los procesos de inestabilidad en laderas han tenido gran ocurrencia a lo largo del tiempo generando catástrofes en donde se han dado pérdida de vidas humanas con susceptibilidad a que se repitan con el paso del tiempo. (Mergili, Marchant Santiago, & Moreiras, 2014)

En el año 2018 se realizó una caracterización geométrica de la ladera en estudio en donde se estudiaba toda su geometría, en lo que tiene que ver con ancho de masa desplazada, ancho de la superficie de falla, longitud de la masa desplazada, entre otros, sin embargo dicho estudio solamente llegó hasta la medición de parámetros geométricos, además de que no se registran estudios o caracterizaciones geotécnicas del sitio ni tampoco se evidenció una modelación y análisis de estabilidad por parte de los investigadores. (Rodríguez, 2018)

Así mismo se realizó una investigación un tanto similar en una ladera ubicada en el barrio el Asís en la ciudad de Tunja, dicha investigación comprendía el estudio de la geometría básica de esta y un estudio un tanto superficial acerca de la climatología de la zona, uso de suelo y geología del sector. (Ramírez, 2018)

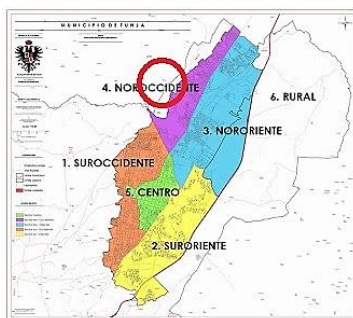
La presente investigación tiene como finalidad determinar y caracterizar los parámetros de resistencia al corte obtenidos a partir de ensayos de laboratorio y así realizar la correspondiente modelación matemática y calcular los factores de seguridad en estado de equilibrio estático por las teorías de análisis de Bishop, Fellenius y Janbu utilizando el software Geo-Slope. Esto con el propósito de generar el método de estabilidad adecuado para la ladera desde el punto de vista constructivo, técnico y económico e igualmente brindar tranquilidad a la comunidad cercana al área de influencia que tiene la inestabilidad de dicha ladera. (SANHUEZA PLAZA & RODRÍGUEZ CIFUENTES, 2013)

Ilustración 1: Localización municipio de Tunja



Fuente: Google 2019

Ilustración 2: Mapa sectores municipio de Tunja



Fuente: Alcaldía Mayor de Tunja

Ilustración 3: Localización Zona de Estudio



Fuente: Elaborado a partir de Google Earth

II. MATERIALES Y MÉTODOS

De forma inicial para la ejecución de la investigación preliminar se llevó a cabo la elaboración de un listado de actividades las cuales se describen a continuación:

- 1. Visita al sitio e identificación de rutas de acceso:** La ejecución de esta primera actividad es vital, ya que a partir de la visita previa al sitio de estudio se logró llevar a cabo la toma de datos geográficos del sitio y a su vez se identificaron las rutas de acceso para movilizar los equipos de sondeos necesarios.

Ilustración 4: Identificación de la zona en estudio



Fuente: Autor

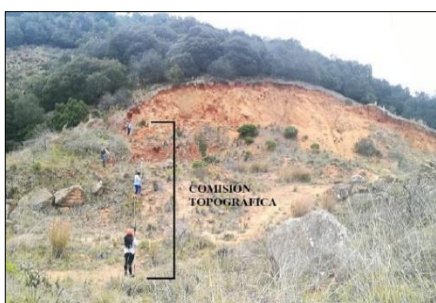
Ilustración 5: Panorámica Drone ladera en estudio



Fuente: Autor

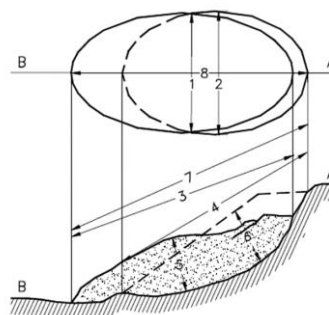
- 2. Levantamiento topográfico:** Dicha actividad se desarrolló con el fin de realizar la medición de cada uno de los componentes geométricos de la ladera como son ancho: el ancho, longitud y profundidad de la masa desplazada y de la superficie de falla y a su vez realizar un levantamiento completo del área de influencia de dicha inestabilidad, levantando vías cercanas y posibles estructuras que estuvieran comprometidas.

Ilustración 6: Levantamiento Topográfico



Fuente: Autor

Ilustración 7: Parámetros Geométricos



Fuente: Suarez Jaime, 2010

Esta información, posteriormente fue procesada para la generación de modelos digitales topográficos (render), con la finalidad de determinar los perfiles de análisis para la evaluación de las condiciones de estabilidad.

3. **Sondeos manuales:** Posteriormente al levantamiento topográfico y geométrico, se llevó a cabo la ejecución de la exploración geotécnica del subsuelo, puesto que es la base para la determinación de las características de los diferentes niveles, como también la determinación de las propiedades de estos. Sin lugar a dudas fue una de las actividades más complejas en esta investigación, dichos sondeos se realizaron a partir de equipos manuales en los cuales se realizaron en las 3 partes más importantes de la ladera (corona, cuerpo y pie) cada una con 2 sondeos cuya profundidad máxima fue aproximadamente de 2.70m.
-

Ilustración 8: Ubicación de Sondeos



Fuente: Autor

Ilustración 9: Sondeos Manuales



Fuente: Autor

4. **Extracción de muestras y elaboración de ensayos de laboratorio:** Parte fundamental en la investigación, ya que con esto se obtendrán datos de entrada para realizar la correspondiente modelación matemática y a su vez se obtendrán los parámetros de resistencia al corte con los cuales podemos comenzar a entender cómo se está comportando dicha ladera.
-

Ilustración 10: Embalaje de muestras



Fuente: Autor

Ilustración 11: Ensayo corte directo



Fuente: Autor

5. **Modelación matemática:** A partir de los datos obtenidos en laboratorio se realizó la caracterización geotécnica de los materiales para establecer el modelo geotécnico y estratigráfico, el cual se realizó en el software Geo-Slope, teniendo como métodos de

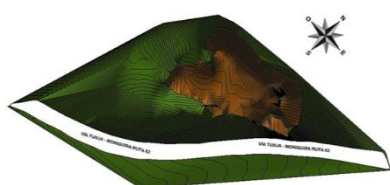
análisis las teorías de Bishop, Fellenius y Janbu, los cuales muestran unas condiciones de estabilidad basados en equilibrio de fuerzas y momentos, generando con esto un grado de precisión importante. Esta modelación geotécnica se llevó a cabo calculando 3 factores de seguridad diferentes de la zona en estudio.

- 6. Elaboración final del documento:** En esta etapa se condensa todo lo referente a la investigación de la zona en estudio y la posible medida de mitigación o recomendación a implementar en la ladera de estudio, dando por finalizado la investigación.

III. RESULTADOS

A partir de una modelación geométrica realizada en el software Revit con los datos topográficos tomados en campo se da una aproximación del terreno en estudio, y a su vez identificando cada una de las partes de la ladera.

Ilustración 12: Vista en planta ladera en estudio



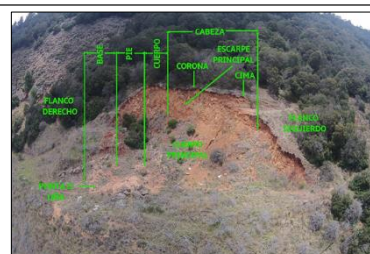
Fuente: Elaborado a partir de Revit

Ilustración 13: Perfil flanco derecho



Fuente: Elaborado a partir de Revit

Ilustración 14: Partes de la ladera



Fuente: Elaborado a partir de Corell Draw

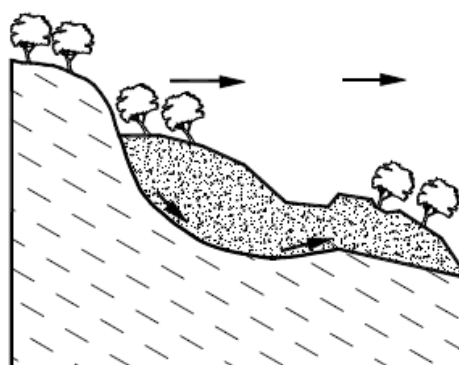
Así mismo se identificó el tipo de movimiento que la ladera tuvo al momento de presentarse el desplazamiento, se trata de un deslizamiento de tipo rotacional de condición retrogresiva, debido a que se logra observar una superficie de falla cóncava hacia arriba y su movimiento es rotacional con respecto al eje paralelo a la superficie transversal del deslizamiento, características muy definidas de los movimientos de tipo rotacional. (Suarez, 2015)

Ilustración 15: Movimiento de tipo rotacional



Fuente: Autor

Ilustración 16: Movimiento de tipo rotacional típico



Fuente: Libro Deslizamientos, Suarez Jaime

Posterior a la modelación geométrica de la ladera, se procede a realizar cada uno de los ensayos correspondientes a partir de las normas INVIAS para cada una de las pruebas, dichos procedimientos se realizaron en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja para lograr caracterizar mecánicamente las partes es donde se realizaron los sondeos manuales.

Expuesto lo anterior los resultados fueron los siguientes:

Tabla 1: Resultados Ensayos de Laboratorio

TIPO DE ENSAYO		PARTES DE LA LADERA		
		PIE	CUERPO	CORONA
Peso unitario seco [kN/m³]		13.58	15.68	18.06
Peso unitario húmedo [kN/m³]		17.18	17.87	20.24
Límites de Atterberg	Limite liquido	26.52	28.68	33.89
	Limite plástico	15.58	17.59	19.00
	Índice de plasticidad	10.94	11.09	14.89
Corte directo	Cohesión [kN/m²]	32.82	35.89	35.30
	Ángulo de fricción	28	29	29

Fuente: Autor

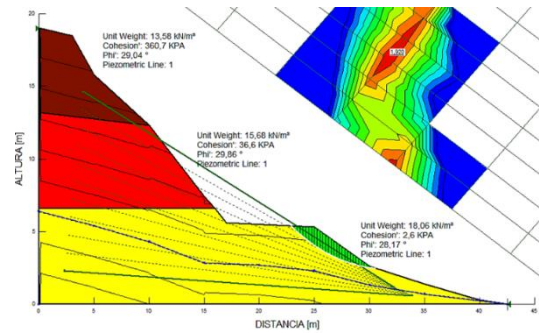
Finalizada la etapa de caracterización geomecánica de la ladera, se procede a realizar la modelación de la ladera con el fin de determinar los factores de seguridad contra deslizamiento FS, los cuales se realizaron mediante el uso del software Geo-Slope siendo utilizados los métodos Bishop, Fellenius y Janbu. Para el análisis de la ladera se utilizaron los tres métodos anteriormente nombrados ya que son los más implementados en consultorías para la estabilidad de taludes recomendados por el manual de estabilidad de taludes del INVIAS.

Los tres métodos nombrados se basan en el cálculo de las fuerzas y momentos actuantes y resistentes para condiciones estáticas, por lo que se hace necesario conocer los parámetros de resistencia al corte de la ladera. Para el presente caso se utilizaron los parámetros obtenidos mediante ensayos de laboratorio realizados a muestras provenientes de la corona, cuerpo y pie, obteniendo tres estratos con diferentes parámetros. A continuación, se presenta la modelación de cada uno de los métodos anteriormente nombrados.

Gráfica 1: Modelo método BISHOP

Al terminar la modelación por este método, nos arroja que el factor de seguridad contra deslizamiento obtenido es de 1.92, factor que se tendrá en cuenta al calcular el factor de seguridad global presente en la ladera de estudio.

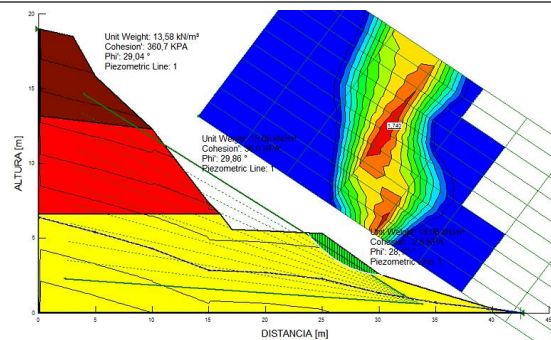
Fuente: Software Geo-Slope



Gráfica 2: Modelo método FELLENIUS

Al terminar la modelación por este método, nos arroja que el factor de seguridad contra deslizamiento obtenido es de 1.70, factor que se tendrá en cuenta al calcular el factor de seguridad global presente en la ladera de estudio.

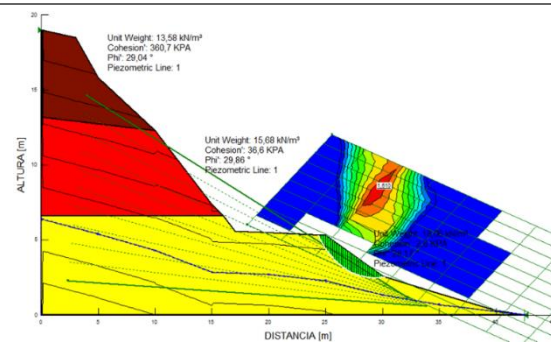
Fuente: Software Geo-Slope



Gráfica 3: Modelo método JANBU

Al terminar la modelación por este método, nos arroja que el factor de seguridad contra deslizamiento obtenido es de 1.61, factor que se tendrá en cuenta al calcular el factor de seguridad global presente en la ladera de estudio.

Fuente: Software Geo-Slope



Obtenidos estos 3 factores de seguridad por los métodos de Bishop, Fellenius y Janbu presentados en la Tabla 2, se procede a calcular el factor de seguridad contra deslizamiento global de la ladera aplicando un promedio ponderado y así obteniendo:

Tabla 2: Factores de seguridad

MÉTODO	FS
Bishop	1.92
Fellenius	1.74
Janbu	1.61

Fuente: Software Geo-Slope

Ecuación 1: FS global mediante promedio ponderado

$$FS = \frac{FS_1 + 4FS_2 + FS_3}{6}$$

$$FS = \frac{1.920 + 4(1.740) + 1.610}{6}$$

$$FS = 1.748$$

Fuente: Autor

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

Con base en el Factor de Seguridad contra deslizamiento, FS, obtenido para la ladera, se define el sostenimiento a realizar siguiendo el Título H en su Tabla H.2.4-1 “Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos” de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, la cual expone si se debe realizar o no el diseño y/o construcción de un sostenimiento en alguna ladera con inestabilidad, basándose en diferentes condiciones de referencia típicas en laderas. Para el presente caso, la condición de la ladera corresponde a “Taludes-Condición Estática y Agua Subterránea Normal”, en donde de acuerdo a las exigencias de la normativa, este factor debe ser mínimo de 1.50, y el FS resultante es de 1,748, mostrando con esto que dicha ladera requiere la implementación de una estructura de sostenimiento para garantizar una óptima condición de equilibrio.

Sin embargo, el objetivo de este artículo es brindar una estabilidad adecuada para que la ladera se comporte de manera satisfactoria y se logre mitigar y prevenir posibles catástrofes en un periodo de retorno no tan lejano.

V. CONCLUSIONES

- Como medida de prevención y recomendación por parte del autor contra el posible deslizamiento de la ladera ha de intervenir se propone realizar un control de la geometría de la ladera, es decir, realizar obras de terraceo con el fin de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación con alturas que varíen de 5 a 7 metros de altura, además de una inclinación de 0.6 H: 1.0 V, a su vez el autor recomienda realizar obras de drenaje como cunetas revestidas en cada grada, con el fin de controlar el agua superficial, de igual manera el sistema de cunetas debe conducir a un sistema de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía para así garantizar un buen drenaje del talud estabilizado.
- Se realizó una descripción de los suelos de la zona en estudio, en la ladera predominan suelos areno arcillosos y se logró identificar un nivel freático en el pie del deslizamiento.
- No se logró identificar población cercana a la zona aferente del deslizamiento, debido a esto se desconoce por completo el nivel de riesgo que este deslizamiento pueda tener.
- Se identificó el tipo de vegetación presente en la zona, la cual en su gran mayoría está compuesta por plantas con raíces someras es decir raíces superficiales las cuales no garantizan un buen anclaje entre el suelo y la raíz de la vegetación.
- Al realizar un análisis mediante software Geo-Slope se determinaron los sectores que presentan amenaza de desplazamiento encontrando una superficie de falla determinada.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja por proporcionar su infraestructura, fundamental en el desarrollo de esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad y a sus docentes que contribuyeron con el desarrollo e invaluable aporte en la finalización de esta temática.

VII. REFERENCIAS

- Campos, A., Rubiano, D., & Ramirez, F. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*. Bogotá: Equilatero.
- Galalrdo Amaya, R. J., Guerrero Barbosa, T. E., & Macgregor Torrado, A. A. (2013). Investigación Geotécnica para la estabilización de las laderas del Barrio San Fermín, municipio de Ocaña, departamento de Norte de Santander (Colombia). *INGE CUC*, 2-3.
- Giraldo Vallejo, P. A., & Rodriguez Isaza, J. C. (2019). Análisis del desarrollo de la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *Repositorio Universidad del Valle*, 4-5.
- Mergili, M., Marchant Santiago, C., & Moreiras, S. (2014). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *bdigital*, 3-6.
- Ramirez, A. (Marzo de 2018). *TALUD BARRIO ASÍS, TUNJA/ BOYACA*. Obtenido de <http://informetaludes.blogspot.com/2018/03/anexos.html>
- Rodriguez, B. (Marzo de 2018). *ESTABILIZACIÓN DE TALUD vía Tunja-Moniquirá (Dep. Boyacá)*. Obtenido de <http://tustaludes.blogspot.com/>
- SANHUEZA PLAZA, C., & RODRÍGUEZ CIFUENTES, L. (2013). Análisis Comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *SciELO*, 5-8.
- Suarez, J. (2015). *Deslizamientos*. Bucaramanga: Equilatero.