CONTRATO N° 14824 – 03

CONTRATAR EL SUMINISTRO DE MAQUINARIA PESADA PARA LA PREVENCIÓN, ATENCIÓN Y CONSOLIDACIÓN POR MEDIO DE LA DEMOLICIÓN Y LIMPIEZA DE SECTORES DEL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CDMB DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTABLECIDAS POR LA ENTIDAD RA-ALQUILERMAQUINARIA-01.



INFORME DE OBRA N° 2

PERIODO

DEL 05 DE AGOSTO AL 04 DE SEPTIEMBRE DE 2023

CONTRATISTA: CONSORCIO MAQUINAS CDMB

SECTORES: SURATÀ, PIEDECEUSTA, FLORIDABLANCA Y BUCARAMANGA.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 3
2. OBJETIVO GENERAL 3
3. OBJETIVOS ESPECIFICOS 3
4. SECTORES INTERVENIDOS 4
5. FICHA TÉCNICA DEL CONTRATO 6
6. PERSONAL CONTRATADO 7
7. RELACION DE POLIZAS 7
8. RELACIÓN DE ACTAS 8
9. INFORMACION SECUNDARIA 8
9.1. ANÁLISIS GEOLÓGICO 13
9.2. MITIGACIÓN DE SECTORES CRÍTICOS AFECTADOS. 26
10. ACTIVIDADES DESARROLLADAS 56
11. CONCLUSIONES 78

1. INTRODUCCIÓN

En el Departamento de Santander, por efectos propios de las temporadas invernales, se presentan eventos que alteran el normal desarrollo de las comunidades, debido a la saturación de taludes, los movimientos de masas, desbordamientos de causes e inundaciones, generando afectaciones en la infraestructura de transporte y la parte agrícola de algunas zonas.

En el presente informe se plasman las evidencias fotográficas de las actividades desarrolladas por parte de la maquinaria suministrada por el Consorcio en los diferentes sectores dispuestos por la CDMB, bajo el contrato de obra publica N° 14824 – 03 cuyo objeto consiste en "**CONTRATAR EL SUMINISTRO DE MAQUINARIA PESADA PARA LA PREVENCIÓN, ATENCIÓN Y CONSOLIDACIÓN POR MEDIO DE LA DEMOLICIÓN Y LIMPIEZA DE SECTORES DEL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CDMB DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTABLECIDAS POR LA ENTIDAD RA-ALQUILERMAQUINARIA-01."**

2. OBJETIVO GENERAL

Ejercer, disminuir y desarrollar las operaciones y labores necesarias para el control y estabilización de taludes, por medio de actividades de excavación y retiro de material en los puntos de intervención establecidos, con el fin de aplacar las fuerzas actuantes sobre el terreno por el cual el suelo y la roca efectúan movimiento sobre la superficie inclinada del talud generando desplazamientos traslacionales y circulación de remoción en masa, que alteran el equilibrio estático del terreno. De igual manera, atender e intervenir las zonas vulnerables a aluviones y desbordamientos de ríos, por medio de la elaboración de jarillones perimetrales y el retiro de material vegetal de gran tamaño en las diferentes zonas afectadas que presenten posibles riegos de inundaciones.

3. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Intervenir los taludes críticos localizados en diferentes municipios, en donde se presenta la superficie de falla con características correspondientes a los fenómenos de remoción en masa, generando afectaciones a la infraestructura vial como los son el desprendimiento y caída de diferentes tipos de materiales (Roca, material Vegetal) sobre los accesos a las zonas.

- Ejecutar el retiro del material proveniente de los deslizamientos en los diferentes corredores viales que crean bloqueos de tránsito en las vías utilizadas por las comunidades debido a la localización del material en el pie del talud.

- Realizar el retiro y limpieza de material de los corredores viales producto de los desplazamientos traslacionales y las prolongadas lluvias que se han presentado en las vías de acceso de los diferentes sectores protegidos por la CDMB.

- Efectuar el sostenimiento y cuidado en las zonas de acceso a los predios de protección de la Autoridad Ambiental correspondiente a su área de Jurisdicción municipal con el objetivo de que los vehículos tengan acceso y se pueda realizar el control ambiental sobre dichas áreas.

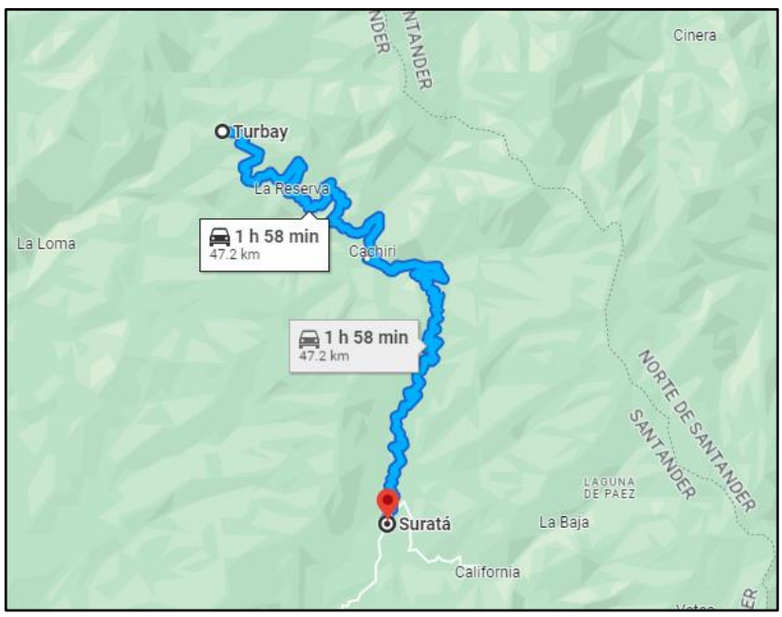
- Desarrollar la conformación de taludes en las zonas afectadas, disminuyendo las fuertes pendientes presentes en los terrenos donde se ubican los puntos críticos a intervenir con el fin de obtener buenas condiciones topográficas que permitan que la acción de gravedad no sea un factor desafortunado que apresure el fenómeno de remoción en masa.

4. SECTORES INTERVENIDOS

La CDMB en cumplimiento de sus funciones de autoridad ambiental, y con el fin de garantizar la calidad de vida de la población, planeo la atención de las solicitudes de los ciudadanos afectados que se encuentran en los sectores denominados como puntos críticos, en los cuales, de acuerdo a las visitas técnicas y las correspondientes valoraciones realizadas por parte de la CDMB, se dan las pautas de ejecución para realizar una intervención que evite o mitigue la problemática presentada en las diferentes locaciones.

A. SURATA

Municipio ubicado en el departamento de Santander, Colombia, a 1.740 metros de altura sobre el nivel del mar en su centro urbano. Se encuentra ubicado a 45 kilómetros de la capital del departamento, Bucaramanga, y sus coordenadas son 7°22’01” N 72°59’14” O.



B. CENTRO ABASTOS

La empresa Central De Abastos De Bucaramanga S A se encuentra situada en el departamento de SANTANDER, en la localidad BUCARAMANGA y su dirección postal es VIA PALENQUE CAFE MADRID 44 96, BUCARAMANGA, SANTANDER.



C. CAV FLORA Y FAUNA, FLORIDABLANCA CDMB

Es necesario ejecutar en el municipio de Floridablanca, en las vías de acceso al CAV actividades correspondientes al retiro del material producto de los deslizamientos traslacionales, con el objetivo de garantizar el acceso a las instalaciones de protección que la autoridad Ambiental tiene en la Jurisdicción municipal.



D. QUEBRADA MENZULI

Quebrada Mensuli es un arroyo intermitente en Colombia y tiene una altitud de 922 metros. Quebrada Mensuli está situada circa de la localidad Polvorería Mariposa y El Porvenir.



5. FICHA TÉCNICA DEL CONTRATO

INFORMACIÓN GENERAL DEL CONTRATO DE OBRA	
CONTRATO DE OBRA	CONTRATO No 14824-03 de 2023
OBJETO DEL CONTRATO	"**CONTRATAR EL SUMINISTRO DE MAQUINARIA PESADA PARA LA PREVENCIÓN, ATENCIÓN Y CONSOLIDACIÓN POR MEDIO DE LA DEMOLICIÓN Y LIMPIEZA DE SECTORES DEL ÁREA DE JURISDICCIÓN DE LA CDMB DE ACUERDO CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESTABLECIDAS POR LA ENTIDAD RA-ALQUILERMAQUINARIA-01.**".
VALOR INICIAL	$ 3.000.000.000,00
VALOR ADICIONAL	N/A
VALOR TOTAL	$ 3.000.000.000,00
PLAZO INICIAL	7 MESES HASTA EL 31 DE DICIEMBRE DE 2023
CONTRATISTA	CONSORCIO MAQUINAS CDMB
REPRESENTANTE LEGAL	ING. EDGAR LEONARDO GOMEZ RONCANCIO
FECHA DE INICIO	30 DE NOVIEMBRE DE 2021
ENTIDAD CONTRATANTE	CDMB – CORPORACION AUTONOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA

6. PERSONAL CONTRATADO

PERSONAL ACTIVO EN PROYETO		
PERIODO: DEL 5 DE JULIO DE 2023 AL 4 DE AGOSTO DEL 2023		
CONTRATISTA: CONSORCIO MAQUINAS CDMB		
NOMBRE COMPLETO	**NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN**	**CARGO**
Michael Guiseppe Restrepo Garcia	1098701278	Coordinador de Operaciones
Carmen Judith Alvarino Polo	1098701790	Coordinadora HSEQ
Jesus Alberto Medrano Lanz	1037479814	Operador Retroexcavadora
Jorge Alexander Leal Villamizar	1095919689	Operador cargador
Alexander Vargas Hernandez	1095937897	Operador retroexcavadora
Nelson Enrique Santos Hernandez	91352168	Operador retrocargador
Sergio Andrés Porras Villamizar	1095808270	Conductor cama baja
TOTAL, PERSONAL EN OBRA		**7**

7. RELACION DE POLIZAS

NOMBRE DE LA ASEGURADORA: Seguros del Estado S.A.

- **ACTUALIZACIÓN DE PÓLIZAS:** Legalización del Contrato

Nº DE LA POLIZA	CONCEPTO DEL AMPARO	VIGENCIA	
		Desde (DDMMAAAA)	Hasta (DDMMAAAA)
96-44-101181966	CUMPLIMIENTO	06/06/2023	30/04/2024
96-44-101181966	PAGO DE SALARIOS, PRESTACIONES SOCIALES E INDEMNIZACIONES LABORALES	06/06/2023	31/12/2026
96-44-101181966	ESTABILIDAD Y CALIDAD DE LA OBRA	06/06/2023	30/04/2024
96-40-101064265	RESPONSABILIDAD CIVIL EXTRACONTRACTUAL	06/06/2023	31/12/2023

- **ACTUALIZACIÓN DE PÓLIZAS:** Acta de Inicio

Nº DE LA POLIZA	CONCEPTO DEL AMPARO	VIGENCIA	
		Desde (DDMMAAAA)	Hasta (DDMMAAAA)
96-44-101181966	CUMPLIMIENTO	05/07/2023	29/05/2024
96-44-101181966	PAGO DE SALARIOS, PRESTACIONES SOCIALES E INDEMNIZACIONES LABORALES	05/07/2023	29/01/2027
96-44-101181966	ESTABILIDAD Y CALIDAD DE LA OBRA	05/07/2023	29/05/2024
96-40-101064265	RESPONSABILIDAD CIVIL EXTRACONTRACTUAL	05/07/2023	29/01/2024

8. RELACIÓN DE ACTAS

RELACION DE ACTAS			
ACTA No.	**FECHA**	**DESCRIPCION**	**VALOR**
1	05/07/2023	ACTA DE INCIO	N/A

9. INFORMACION SECUNDARIA

Para el desarrollo del presente proyecto se tomó información base o secundaria de algunos estudios y normas que se resume en los siguientes términos:

1- Identificación y relación de fuentes de información:

Para el desarrollo general de cada uno del proyecto se basará en las siguientes fuentes de información:

- MINAVDT - AIS. 2010. "Código Colombiano de Construcción Sismo resistente NSR-10". Norma base para el correcto diseño de las obras y alternativas de mitigación, se utilizarán los capitulo A, C y H.

- INGEOMINAS. 1999. "Geología del departamento de Santander". Este es el mapa presentado para el departamento de Santander en 1999 por el INGEOMINAS, actualmente Servicio Geológico Colombiano, se usa como contexto regional debido a su escala para la categorización geológica a levanta en campo.

- INGEOMINAS, 2001. "Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga". Estudio desarrollado para el área metropolitana, con identificación de unidades lito estratigráficas, unidades geomorfológicas, exploración geofísica del subsuelo, caracterización geotécnica del subsuelo y zonificación geotécnica de toda el área metropolitana de Bucaramanga, que sirve como base para realizar el análisis geológico local y para el análisis sísmico de la zona de estudio.

- INGEOMINAS, 2009. "Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta". En este se muestran

cartografías geológicas, geomorfológicas, cobertura vegetal y uso del suelo a escala 1:5000, como también análisis de subsuelo y ensayos de laboratorio. También se desarrolla el inventario de movimientos en masa y se zonifica la amenaza a movimientos en masa mediante métodos semi-cuantitativos, es la base para la realización de la clasificación y definición geomorfológica de cada lugar de estudio.

- IDEAM - CDMB "Información Meteorológica del área metropolitana de Bucaramanga": Esta información tiene que ver con los datos de precipitación obtenidos en los diferentes sectores donde se esté realizando un monitoreo en el régimen de lluvias, entre las estaciones más importantes están, la estación del aeropuerto Palonegro, la estación de la UIS, la estación de la Flora, la floresta, entre otras.

- CDMB "NORMAS TECNICAS PARA EL CONTROL DE EROSION, PARA LA REALIZACION DE ESTUDIOS GEOLOGICOS, GEOTECNICOS E HIDROLOGICOS Y PARA LA EJECUCION DE PROYECTOS DE DESARROLLO": Esta norma es la base para el análisis a fenómenos de remoción en masa, para ello se toma los factores de seguridad para la evaluación determinística en condiciones pseudo-estáticas del modelo geológico geotécnico.

- Google© "GOOGLE EARTH". Este medio informático que utiliza la superposición de imágenes satelitales, organizadas en modelos SIG, se utiliza como base cartográfica de localización generan de los lugares en estudio, además de visualizarse la imagen satelital, da una idea inicial de ubicación.

- Ward y Goldsmith. "Geología de los cuadrángulos H-12: Bucaramanga y H-13: Pamplona, Departamento de Santander. Memoria explicativa.": Este proyecto abarca el análisis de los cuadrángulos H12 y H13. Se da una recopilación breve y un detalle general sobre el material asociado a la Formación Bucaramanga, nombrando los estudios anteriormente descritos (De Porta, 1959 y Julivert 1959), como también otros dados por estos mismos autores.

- Julivert M, 1958. "La morfoestructura de la zona de mesas al SW de Bucaramanga": En este estudio se detalla en la región las diferentes morfologías presentes en el área, como su origen estructural y su énfasis según la estratigrafía en el área (Detalle de columnas geológicas levantadas y creación de mapa geológico del área).

- J. de Porta, 1959. "La terraza de Bucaramanga": descripción detallada de la estratigrafía comprendida entre el área de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Lebrija". Se especifican y hace

referencia a las denominaciones dadas por Hubach, 1952, para cada una de las unidades nombradas por él. Se define a su vez la relación hidrográfica con la geología.

- Bueno y Solarte, 1994. "Geología, geotecnia y comportamiento erosivo de las áreas de reserva forestal de Bucaramanga": Este estudio hace una recopilación bibliográfica general y se enfatiza en el análisis geológico, geomorfológico, hidrogeológico y geotécnico con la finalidad de obtener del porqué de los diferentes comportamientos de los materiales geológicos y determinar así zonas propensas a erosión.

- Royero y Clavijo, 2001. "Mapa geológico generalizado, Departamento de Santander: Memoria explicativa. Escala 1:400.000". En este se especifica de manera general todo el contexto evolutivo geológico del área del Departamento de Santander, como también las unidades geológicas y las diferentes estructuras a nivel regional.

- CDMB - Consorcio Rio Frio 2010, 2010. "Estudio de Zonificación Amenaza por Inundación en la Cuenca Baja y Media Del Río Frío (Municipio de Floridablanca y Girón)". En este estudio se realizó el análisis de la cuenca media y baja de Rio Frio, el cual arrojo las cotas máximas de inundación en todo el recorrido con diferentes periodos de retorno.

2- Aporte de la información al proyecto:

Entre los aportes más relevante para la realización del proyecto se mencionan los siguientes:

· Contextualización Geológica Regional y Local, todos los estudios realizados por el INGEOMINAS, hoy servicio geológico colombiano y algunos en convenio con las alcaldías del área metropolitana de Bucaramanga

Lo descrito en estos documentos son las bases teóricas en la cuales se basa el Geólogo evaluador para predecir de una manera preliminar, lo que se espera encontrar en campo, cuando este realice su visita a cada zona en estudio, en estos documentos se hace una descripción textura pormenorizada de cada formación identificada, así mismo esta información preliminar, será la guía para la identificación de las unidades geológicas superficiales.

· Identificación de la Geología estructural, con base a los documentos anteriormente nombrados, se identifican las fallas geológicas que predominan, afecta o influyen en la zona en

estudio, ya que su identificación se realiza de manera regional y en la mayoría de las veces no se dimensionan localmente.

· Análisis símico, para ello se emplean como base la NSR-10, Titulo A: REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE, Titulo H: Estudio Geotécnico y el estudio de Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga, así se identifican los coeficiente de amplificación sísmica Aa y Amax para un periodo T igual a cero, con el fin de aportar a la formulación del modelo geológico geotécnico, ya que no se presentan análisis sísmicos locales contemplados dentro del alcance de los estudios.

· Análisis y levantamiento geomorfológico: se basa en el estudio de Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, se toma como base para identificar las geo formas presentes siguiendo la misma nomenclatura y descripción, es decir que se realizada una identificación en campo de mofo dinámica tomando como únicos parámetros los presentados en estos estudios.

· Análisis hidrológico: para este estudio, se basa en Información Meteorológica del área metropolitana de Bucaramanga, de los datos de precipitación se predicen caudales útiles para el diseño de obras y alternativas de mitigación de acuerdo a periodos de recurrencia de 10 a 500 años. Particularmente se toma como base el estudio de inundación para evaluar su efecto sobre sobre el área de estudio.

· Análisis de estabilidad: para este estudio, es primordial categorizar el análisis de remoción en masa con el fin de darle calidad de estable o inestable, por ello y recurriendo al análisis determinístico por factores de seguridad y basándose en los imites por factores de seguridad de la norma geotécnica de la CDMB, se generan dichas categorías, de manera tal que a partir de lo que indica la norma para los diferentes escenarios, se diseñan las obras de estabilización si se requieren.

3- <u>Análisis de la información secundaria:</u>

La información secundaria recolectada se divide en varios temas:

a. Análisis geológico: Dentro de los documentos, se observa una serie de descripciones que se desarrollan de acuerdo a una cronología geológica, en la mayor parte de la zona de estudio, de acuerdo a todos los documentos de base geológica, se concuerda que los depósitos geológicos pertenecen al periodo reciente conocido como cuaternario.

b. Análisis Geológico estructural: Este análisis hará referencia a las fallas y formas que presenta el relieve en forma de anticlinales o sinclinales, de acuerdo a los documentos de análisis, Bucaramanga es una zona de confluencia de fallas, entre las más importantes están el sistema de falla Bucaramanga ‐ Santa Marta y la falla del rio Suarez, este tipo de fallas no se presenta directamente en toda la zona de estudio, pero si hace parte del contexto regional e influye indirectamente sobre la zona en estudio, esto de una manera contribuye a la tectónica que existe en la zona y al denominado nido sísmico de Bucaramanga dentro del documento se describe las características más importantes de la falla.

c. Análisis Geomorfológico: Para este análisis, la descripción se basa en geo formas principales, donde se utiliza la misma metodología y nomenclatura para la realización del estudio en particular, se analiza la zona de estudio en cuanto al origen del suelo y relieve, el cual puede ser Fluvial (F), denudacional (D) y antrópico (A), se detallara más aun ya que dentro del origen del relieve aparecerán categorías propias y fácilmente identificables, de acuerdo al estudio de Zonificación de amenaza por movimientos en masa de algunas laderas de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, así no existirá metodología ni nomenclatura diferente a la mostrada en este estudio para el análisis de cada sector.

d. Análisis sísmico: Este estudio parte de la definición del tipo de suelos, elemento importante ya que este es el medio de propagación de la onda, es así que para su determinación, es necesario acudir al número de golpes promedio, así mismo dentro del apéndice A4 del título A de la NSR-10, se verifica algunas características propias del municipio de Girón, apareciendo los índices de amplificación Aa, Av, Ad y Ae, además de la categoría de la amenaza sísmica (alta), así mismo él estudió de zonificación sísmica da a conocer el Amax que ocurre cuando el periodo de la onda sísmica es cero, todo lo anterior es la base del el sismo de diseño nombrado por la NSR-10 en su título H como Kst, y es este valor el que se ingresa a un modelo geológico geotécnico para determinar la estabilidad de cada zona en estudio cuando se analiza de manera pseudo ‐ estática.

e. Análisis de uso del suelo: Dentro de cada estudio se realiza un análisis tomando como base la metodología y nomenclatura dada por el INGEOMINAS, allí se determinará una serie de unidades que pueden ser consolidaciones (Unidades conformadas por una o más clases, donde la clase dominante ocupa el 70% o más del área considerada) y asociaciones (Unidades con 2 o más clases, donde ninguna ocupa o alcanza el 70% del área delimitada), de esta forma se determinara la composición de uso del suelo, cabe aclara que en ningún momento este análisis no categorizara al suelo por uso comercial, es decir que el termino difiere al presentado dentro de los esquemas o planes de ordenamiento territorial.

f. Análisis Hidrológico: Este se fundamentará principalmente en los datos de precipitación recopilados de las estaciones meteorológicas del IDEAM y CDMB, en las cuales por medio de análisis estadísticos y mediante el uso de métodos convencionales conocidos y técnicamente aprobados, se estiman Caudales o régimen de caudales útiles para determinar medidas de protección relacionadas con este tema en particular. Se tomó los resultados del análisis del estudio de rio frio en cuanto a parámetros como niveles de inundación, caudales esperados, niveles de socavación entre otros.

g. Determinación de factores de seguridad: Esto es aplicable utilizando la categorización dada por la CDMB en las normas geotécnicas, en las cuales los limites estáticos estarán cuando el FS sea igual a 1.50 y para Pseudo- estáticos 1.20, categorizándose como deslizamiento critico o alto aquellas condiciones en las cuales el FS sea inferior a 1.00, así con esta evaluación se determinan medidas de mitigación, ya que de acuerdo a estos análisis, las propuesta de alternativas de mitigación puede ser fácilmente aplicables a sencillas obras superficiales hasta obras complejas de ingeniería.

Para el análisis de la información secundaria y su utilización, todo se expresa dentro de cada informe de manera particular y de forma detallada, allí cada resultado obtenido indicara el uso de la información base (Secundaria), sobre todo en el ámbito geológico, sísmico, geomorfológico, de uso del suelo e hidrológico, para los otros casos en particular la información base, está determinada por los procesos de análisis directos, que se obtienen a partir ensayos insitu o de laboratorio, además de levantamientos particulares de la zona de estudio.

9.1. ANÁLISIS GEOLÓGICO

A continuación, se describen las características geológicas y las unidades geológicas superficiales a nivel regional y dentro del área de estudio.

Para realizar el análisis geológico se tienen en cuenta estudios previos de entidades oficiales y particulares, dentro de las que se encuentran la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), la oficina de planeación del municipio de Bucaramanga y Servicio Geológico Colombiano (SGC), los cuales permiten conocer la información geológica desarrollada en el área a escalas generales.

De igual manera se usaron mapas topográficos, fotografías aéreas e imágenes satelitales los cuales permiten estudiar los rasgos morfoestructurales y los procesos morfodinámicos presentes en la

zona de estudio. A partir de la información obtenida se genera el mapa de unidades geológicas superficiales en el área de trabajo.

Geológicamente la zona más importante del área metropolitana (Bucaramanga) se encuentra ubicada dentro de depósitos de terraza y de cono aluvial (Ward et al., 1973) en la denominada Terraza de Bucaramanga, de edad Pleistoceno-Holoceno. De acuerdo a De porta (1959) y Julivert (1963), la parte inferior de la Terraza de Bucaramanga está compuesta de grava, arena, limo y capas menores arcillosas fluviales; mientras la parte superior está compuesta de cantos no calibrados que se interpretan como depósitos coluviales, los cuales adelgazan lejos del frente montañoso, presentan un gradiente superficial más grande que el de los depósitos fluviales subyacentes y están restringidos a una zona paralela a lo largo de los valles.

1.1. GEOLOGÍA REGIONAL

Regionalmente la zona de estudio está relacionada a los bloques tectónicos delimitados por la Falla de Suárez al occidente y la Falla Bucaramanga al Oriente (INGEOMINAS, 2007). A continuación, se describen algunas unidades presentes en esta región, tomando como base el estudio de zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga (2001):

- **Neis de Bucaramanga (p€b):** Definido por Goldsmith (1971), esta unidad está constituida por una secuencia de roca metasedimentaria de alto grado de metamorfismo conformado principalmente por paraneis pelítico, semipelítico y arenáceo, esquistos y neis calcáreo, mármol, neis horbléndico y anfibolita. El gneis incluye dos tipos de zonas de migmatita, una donde el paraneis está mezclado con roca granítica gnéisica y otra donde ambos están cortados por masas pequeñas de granito no foliado (Ward et al., 1973). Aflora al oriente del área metropolitana de Bucaramanga y se localiza al este de la Falla Bucaramanga. Entre los municipios de Floridablanca y Piedecuesta esta unidad presenta variación en la orientación de la foliación, lo cual indica perturbaciones tectónicas severas. Se encuentra en contacto con intrusivos jurásicos graníticos y se considera de edad precámbrica (Ward et al., 1973).

- Formación Silgará (pDs): Nombre propuesto por Ward et al., (1973) para referirse a una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada, compuestas por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea, cuya sección tipo se localiza en la Quebrada Silgará. Las relaciones estratigráficas sugieren que esta unidad suprayace al Neis de Bucaramanga e infrayace rocas del Devónico.

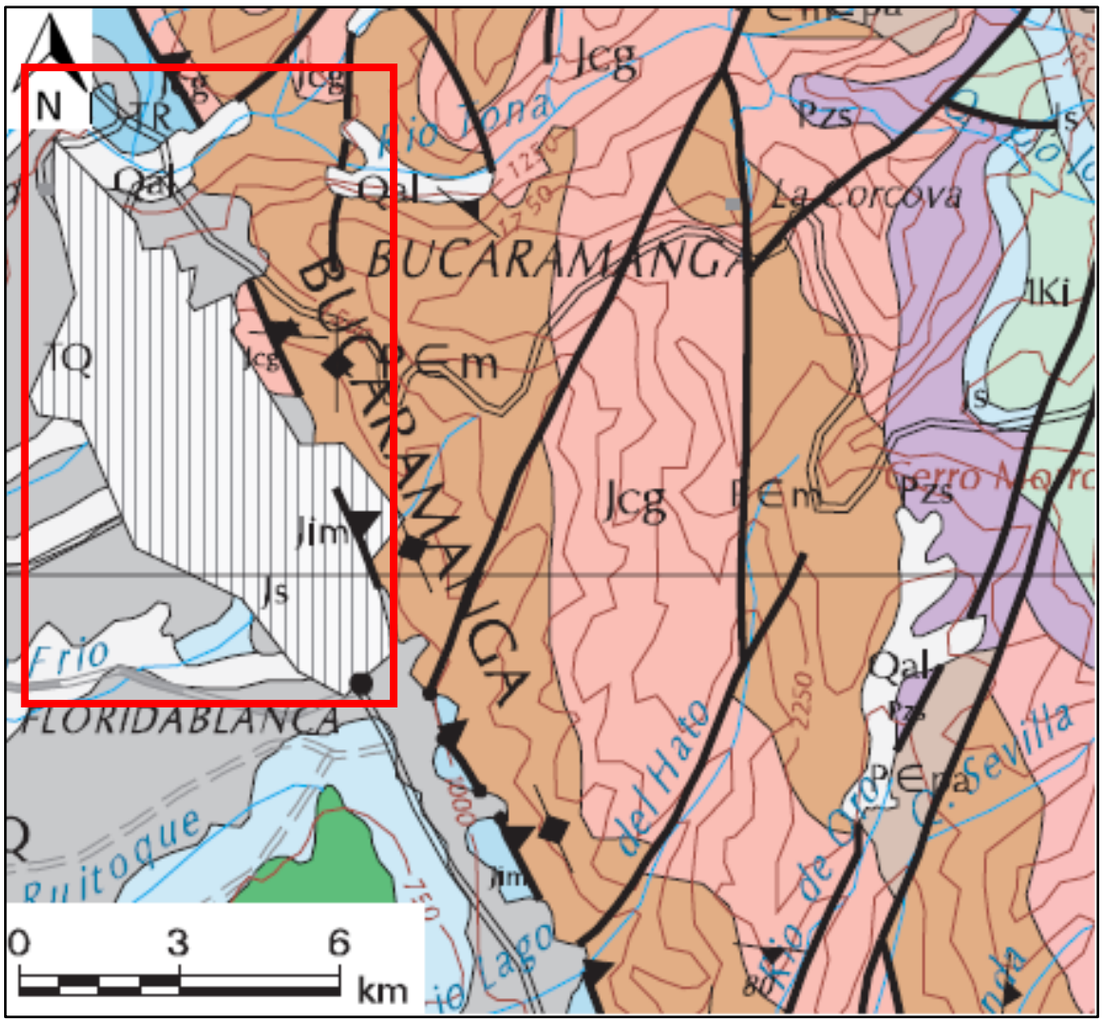


Figura 1. Unidad Neis de Bucaramanga ubicada al este del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

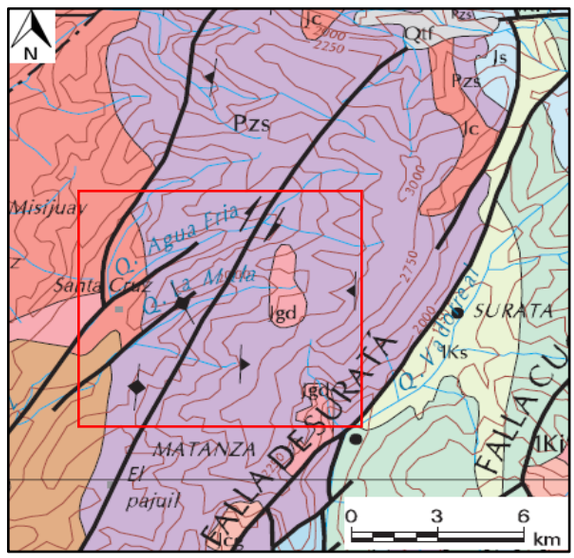


Figura 2. Formación Silgará en los alrededores de Matanza y Suratá. Ubicada al Noreste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 1999).

- Formación Bucaramanga: La Formación Bucaramanga hace parte de los depósitos cuaternarios descritos por Ward et al., (1973). Esta unidad inicialmente fue propuesta por Hubach (1951), quien

la subdivide en: Miembro Órganos (Qbo) y Miembro Finos (Qbf). Posteriormente De Porta (1959) divide la formación Bucaramanga en tres paquetes: uno inferior conformado por niveles discontinuos de gravas clasto soportados y con lentes arenosos intercalados con un espesor de 150m; un segundo paquete con un espesor de 18m ubicado en la parte superior, compuesto de sedimentos arcillosos y un tercer paquete de 8 a 15 metros de espesor, constituido por una mezcla de fragmentos angulares gruesos y finos arenosos. Sin embargo, después de trabajos de campo detallados el INGEOMINAS subdivide esta unidad en cuatro miembros: Órganos (Qbo), Finos (Qbf), Gravoso (Qbg) y Limos Rojos (Qblr); de acuerdo con las dataciones publicadas en el proyecto hidroeléctrico Fonce-Suárez, la edad de la Formación Bucaramanga es menor que 730.000 años (Pleistoceno) (INGEOMINAS, 1997).

Morfológicamente esta unidad corresponde a un abanico aluvial erosionado posiblemente asociado en gran parte al Río Suratá, acumulado sobre una depresión de origen tectónico, sobre la cual se ubica el casco urbano de la ciudad de Bucaramanga. Este abanico limita al nororiente y oriente con el Macizo de Santander, al noroccidente y occidente con el Cerro de Palonegro y el Río de Oro, y al sur con la Mesa de Ruitoque. Presenta una superficie suavemente ondulada, con pendiente ligeramente inclinada al occidente, entre 2º y 7º, y una extensión aproximada de 60 a 80 km². El valor real del espesor de la Formación Bucaramanga es aún desconocido, sin embargo, a partir de cortes geológicos se ha estimado un valor promedio de 250 m en las zonas con mayor espesor.

El ambiente de depositación de esta unidad ha sido considerado como un ambiente fluvial, con alternancia de materiales de origen aluvial tipo cono de deyección, flujos de escombro, canal y lagunar, en base a la granulometría que presentan dichos materiales, los rasgos geomorfológicos que presenta esta formación, así como los posibles agentes de transporte y la fuente de los materiales (Julivert, 1958).

A continuación, se describen las características geológicas de cada uno de estos miembros, de acuerdo con la información geológica que se presenta en los estudios del INGEOMINAS (2001).

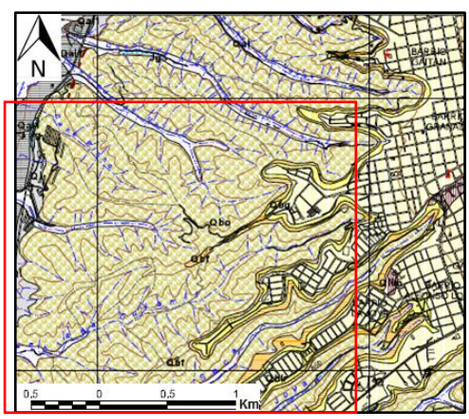


Figura 3. Formación Bucaramanga Miembro Órganos (Qbo), al oeste del Municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Miembro Órganos (Qbo): Esta unidad fue definida por Hubach (1951) y presenta un espesor mayor a 180m, siendo este el más potente de la Formación Bucaramanga. Presenta una serie de niveles polimícticos de fragmentos gruesos de aspecto conglomerático, con alternancia de capas y lentes limo arenosos, con variaciones laterales y verticales en composición y textura, según Bueno y Solarte (1994). Los niveles lenticulares descritos por Hubach (1951), algunos son niveles limo-arenosos de hasta 5 m; otros son niveles de aspecto conglomerático que forman los depósitos de gravas y bloques poco consolidados dispuestos en forma de capas gruesas a muy gruesas, con espesores hasta de 15 m. El tamaño de los cantos varía entre 10 y 30 cm, alcanzando bloques mayores de 1 m de diámetro con una composición predominante de areniscas silíceas de grano medio, bien cementadas y en menor proporción fragmentos de rocas ígneas ácidas de textura fanerítica, neises micáceos de color amarillo hasta rosado, areniscas lodosas rojizas de grano fino y alto contenido de micas, cuarzo lechoso, liditas y cherts. Los niveles gravosos presentan matriz arcillosa pardo amarillenta y los niveles finos presentan material arcillo arenosos y areno arcilloso de consistencia compacta, con trazas de materia orgánica (Figura 3).

- Miembro Finos (Qbf): Este nivel fue reconocido y definido por Hubach (1951). Se ubica estratigráficamente entre el nivel inferior de la Formación Bucaramanga (Miembro Órganos) y el nivel superior (Miembro Gravoso) en contactos netos plano paralelos. Es una capa lenticular horizontal con alternancia de niveles arcillosos, limo-arenosos y areno-limosos, de colores gris verdosos con un espesor promedio de 15m. Estos niveles presentan una geometría tabular de estratificación paralela, cruzada y ondulosa, con espesores que oscilan entre 5 y 40 cm. Hacia la base el Miembro Finos presenta material arcillo-limoso, masivo, de colores grises a verdes, con estratificación plana paralela, con gran variación de espesor. Hacia el techo presenta alternancia entre niveles arenolimosos con niveles limo arenosos arcósicos de colores amarillento a pardo amarillento.

Geomorfológicamente se caracteriza por presentar escarpes con un grado de alteración moderada de consistencia plástica para el material arcilloso (Figura 4). El ambiente de depositación para este miembro de la Formación Bucaramanga, es un ambiente aluvial de intercanales, poco profundo, de baja energía y de escasas interdigitaciones de flujo de escombros de facies arenosas (INGEOMINAS, 2001).

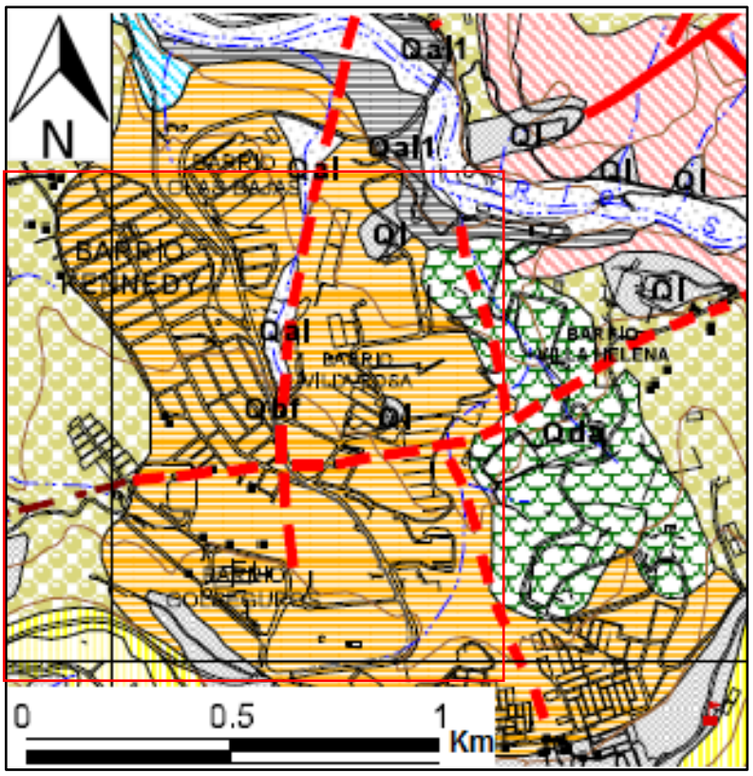


Figura 4. Formación Bucaramanga Miembro Finos, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Miembro Gravoso (Qbg): Definido por Niño y Vargas (1992), se encuentra ubicado sobre la escarpa occidental y norte de Bucaramanga (Figura 5). Conforma los escarpes superiores de la parte alta del barrio La Gran Ladera y el nacimiento de la quebrada La Iglesia, en los alrededores de los barrios Lagos del Cacique, Diamante II y San Luis. Presenta un espesor que varía entre 8 y 30 m. presentando niveles gravosos, gravo arenosos y gravo lodosos. Los cantos están compuestos por rocas metamórficas e ígneas y sedimentarias tales como areniscas cuarzosas, areniscas limosas y limolitas moradas. El tamaño grava presenta un diámetro promedio de 15 cm, y predomina sobre bloques de rocas de hasta 80 cm de diámetro. A modo general el Miembro Gravoso es matriz soportado, presentando en sitios puntuales, material clasto soportado. Se encuentra suprayaciendo el Miembro Finos presentando contacto neto, continuo y suavemente onduloso. Infrayace el Miembro Limos Rojos en contacto gradacional (Niño y Vargas, 1992).

Geomorfológicamente es similar al Miembro Órganos en los sectores de los valles de las quebradas. En la parte sur de la Quebrada la Iglesia, su morfología se caracteriza por presentar colinas suaves onduladas y laderas alargadas con un drenaje dendrítico. Estos depósitos presentan un grado de meteorización medio a alto, siendo la parte superficial de este miembro poco compacta y altamente permeable. Su ambiente de depositación es de flujo de escombros (INGEOMINAS, 2001).

Miembro Limos Rojos (Qblr): Nivel definido por Julivert (1963). Se encuentra localizado de forma no uniforme en el sector urbano de Bucaramanga y continúa hacia el sur, hasta el sector norte del municipio de Floridablanca.

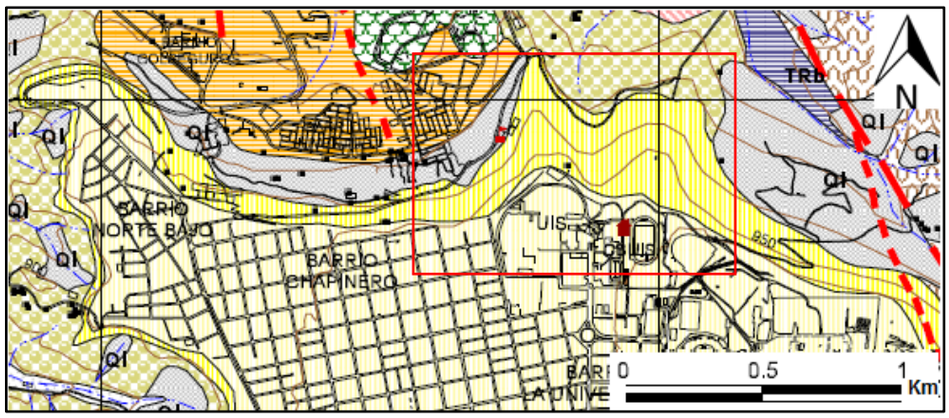


Figura 5. Formación Bucaramanga Miembro Gravoso, al norte del municipio de Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

Presenta arenas arcillosas gravosas y limos de colores rojizos, amarillentos y naranjas. En algunos sectores se aprecian bloques angulares de arenisca meteorizados, embebidos dentro de limos rojos y se asocian superficialmente a este miembro. Este depósito se encuentra suprayaciendo el Miembro Gravoso en contacto gradacional. La parte más superficial de este miembro presenta un alto grado de meteorización formando niveles de oxidación (INGEOMINAS, 2001). Geomorfológicamente se caracteriza por constituir la parte superficial de la llamada inicialmente “Meseta de Bucaramanga”, presentando una topografía plana con pendientes menores al 7%, de drenaje escaso, paralelo y superficial (Niño y Vargas, 1992).

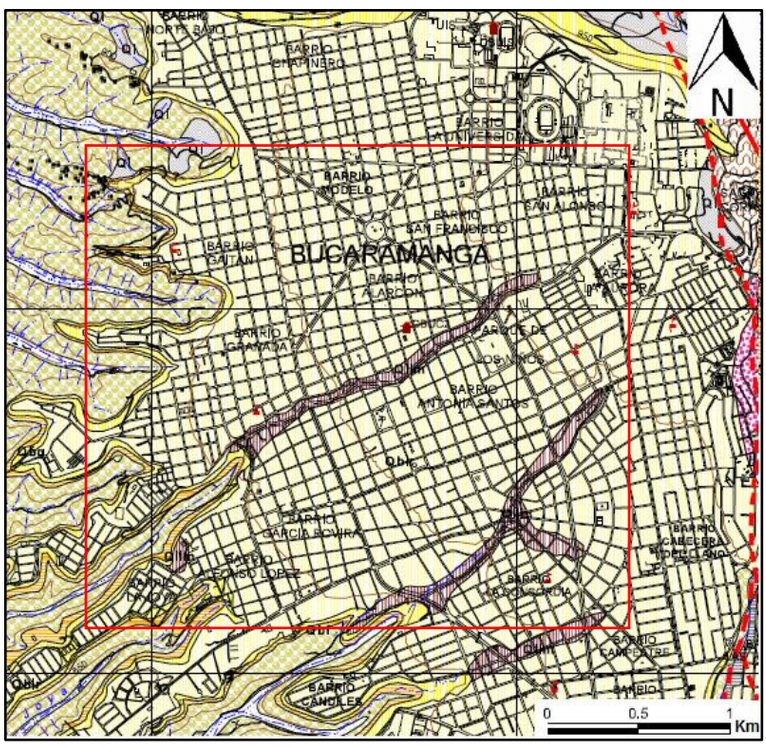


Figura 6. Formación Bucaramanga Miembro Limos Rojos (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

En la Figura 7 se muestra de manera esquemática el perfil del subsuelo correspondiente a la Formación Bucaramanga.

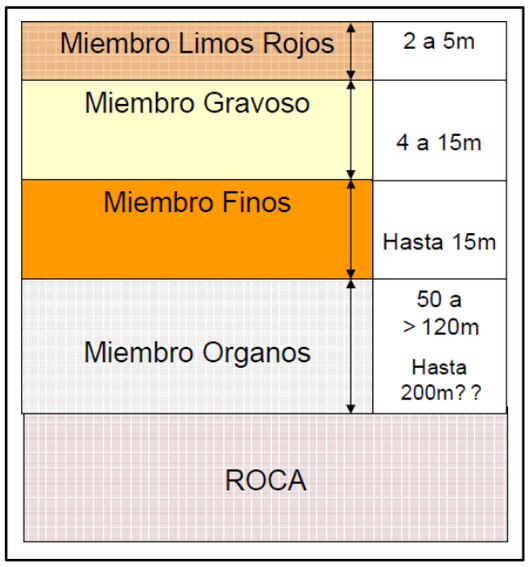


Figura 7. Perfil típico y espesores promedio de la Formación Bucaramanga (Tomado de INGEOMINAS, 2001).

1.2. UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (UGS)

Generalidades

En el presente estudio se caracterizaron y se cartografiaron las unidades geológicas superficiales a escala detallada (1:200), de acuerdo a las características físico-mecánicas de los diferentes suelos y materiales rocosos presentes en el área de estudio.

Las Unidades Geológicas Superficiales corresponden a un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros (Hermelin, 1987). Estas formaciones superficiales incluyen rocas con diferente grado de meteorización, suelos y depósitos inconsolidados según su origen (Tabla 1), y que son correlacionables con procesos morfodinámicos debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre. La caracterización geológica de estas unidades permite evaluar el comportamiento mecánico de un terreno, siendo esta evaluación el insumo principal para el desarrollo de obras civiles. A partir de esta información se elabora el mapa de Unidades Geológicas Superficiales, el cual proporciona de manera visual las condiciones físicas de estas unidades en superficie.

El presente estudio constituye un factor importante para el planteamiento del uso del suelo para el desarrollo urbano, así como la construcción y el mantenimiento de obras de ingeniería que permitan mitigar, controlar y prevenir posibles riesgos geológicos en el área del estudio.

Tabla 1. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) según su origen (Hermelin, 1985 y Salazar, 1995 en INGEOMINAS, 2007).

a	TIPO DE UGS
Derivadas de roca In situ	- Roca inalterada - Saprolito - Suelos Residual
Depósitos aluviales	- Aluviones recientes o de lecho de río - Llanuras aluviales - Abanicos, terrazas aluviales, depósitos torrenciales y fluviotorrenciales.
Depósitos lacustres y paludales	- Depósitos lacustres
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	- Coluviones - Flujos (de lodo, tierra y de escombros) - Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	- Deltas, Barras, Playas, etc.
Depósitos volcánicos	- Tefras, flujos piroclásticos, ignimbritas y flujos de lodos volcánicos - Lahares, cenizas y coladas de Lava
Depósitos eólicos	- Dunas - Loess - Cenizas volcánicas
Depósitos de glaciares	- Morrenas y Tillitas - Fluvioglaciares
Depósitos antrópicos	- Rellenos sanitarios o de basuras - Rellenos de excavaciones - Escombreras o botaderos

Unidades de Suelo

Para la clasificación de las Unidades de Suelo, se tuvo en cuenta la nomenclatura utilizada por INGEOMINAS (2007), la cual subdivide los suelos en transportados, antrópicos y residuales, de acuerdo al origen de los materiales. En el área se reconocieron 4 unidades geológicas superficiales principalmente, los suelos de la Unidad A, las terrazas aluviales (medias y bajas), Suelos de cauce del río activo y finalmente suelos de relleno antrópico, las cuales serán descritas a continuación.

- Suelos Aluviales de Cauce Activo (Sal): Son sedimentos recientes que han sido transportados y depositados por los ríos y quebradas, conformando cauces activos, abandonados y llanuras de inundación (INGEOMINAS, 2007). En este caso se observa un suelo areno con cantos subredondeados a subangulares con esfericidad baja en los más grandes (de hasta 5 m de diámetro) y media-alta en los cantos más pequeños (hasta 50 cm de diámetro), principalmente de composición granítica (95% QTZ, PLG, MSC, FKS y 5% Máficos) y gnéisica con bandeamiento muy marcados, gneises cuarzo feldespáticos y cuarzo-anfibóliticos. También se observan algunos depósitos de playas del río, que son principalmente arenas de grano medio-fino, sin consolidación.

- Unidad A (Qindef): Se caracteriza por un suelo matriz soportado con una matriz areno-limosa de color amarillento-Naranja, compuesto de granos de tamaño arena media y limos (80% y 20 % respectivamente), de consolidación intermedia y con presencia de clastos de rocas igneometamórficas como neises cuarzo-feldespáticos y cuarzo-anfibiólicos, con diámetros de hasta 1 m, subredondeados a redondeados y esporádicamente subangulares y esporádicamente algunos provenientes de rocas sedimentarias. Estos clastos se distribuyen en gravas (80%) y bloques (20%), La relación Matriz-Clastos es 70%-30% respectivamente.

Según INGEOMINAS en su trabajo del 2001, “Zonificación sismo geotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga” plantean en esta zona depósitos de Flujos de Escombros, los cuales según dicho trabajo se caracterizan por estar constituidos esencialmente por fragmentos de rocas ígneas y metamórficas del macizo, tamaño grava y bloque, principalmente neises y granodiorita esporádicamente anfibolitas y esquistos, en matriz areno-limosa, de arena media a gruesa en alrededor de un 80% (aproximadamente un 20% de finos limo-arcillosos), principalmente cuarzo, feldespatos y partículas de rocas moderadamente meteorizados, muscovita en laminillas y algunos máficos (INGEOMINAS, 2001), Pero lo observado en campo durante el presente trabajo hace pensar en la posibilidad de que sean depósitos de los suelos del Miembro Gravoso de la Formación Bucaramanga o una variación de lo planteado por INGEOMINAS, esto sumado a la falta de delimitación del borde Sur de la de la Formación Bucaramanga, falta de datos geocronológicos, columnas estratigráficas, Sísmica de superficie y perforaciones profundas, deja dudas respecto a la interpretación de estos depósitos encontrados es por esto que en este proyecto se marca como una unidad denominada como “Unidad A” la cual se encuentra caracterizada litológicamente pero no se asocia a ninguna unidad conocida.

- Suelos de Terrazas Bajas, Medias (Sat1, Sat2) Corresponden a depósitos aluviales, acumulados en forma de escalones en las márgenes de los ríos y arroyos, con tamaño de grano arena, grava, cantos y bloques, redondeados a subredondeados, con alta esfericidad, cuya composición varía según la litología de las zonas atravesadas por las corrientes (INGEOMINAS, 2007). En este caso se observa un suelo areno-limoso y cantos subredondeados a subangulares cono esfericidad baja, de hasta 1 m de diámetro, principalmente de composición granítica (95% QTZ, PLG, MSC, FKS y 5% Máficos) y gnéisica con bandeamiento muy marcados, gneises cuarzo feldespáticos y cuarzo-anfibóliticos.

- Suelo de llenos antrópicos (Sla): Corresponden a materiales heterogéneos dispuestos por el hombre, distribuidos aleatoriamente y sin ningún tratamiento o adecuación, con el objeto de cumplir los requerimientos de los diseños de obras de ingeniería o con la intención de aprovechar áreas de cauce de drenajes (INGEOMINAS, 2007). Están conformados principalmente por materiales tamaño arena, arcilla y grava, producto de residuos de construcción, excavaciones de minería o adecuación de terrenos. Estos se evidencian a partir de las perforaciones y de la geomorfología cambiante en esta zona a partir de la morfometría.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Marco geológico y tectónico de Colombia

El segmento septentrional de Suramérica en donde se encuentran la cadena montañosa de los Andes de Ecuador, Colombia y Venezuela ha sido reconocida como el Bloque Nor-andino el cual corresponde a un segmento geológicamente diferente de la Cordillera de Los Andes (Cediel et al., 2003) ya que es un territorio geológicamente complejo y tectónicamente dinámico (Royero y Clavijo, 2001), en donde ocurre la interacción de tres placas litosféricas principales: la Placa de Nazca ubicada en el Pacífico, la Placa Caribe y la Placa Suramericana en donde se incluye el Bloque Norandino (Cediel et al., 2003; Royero y Clavijo, 2001).

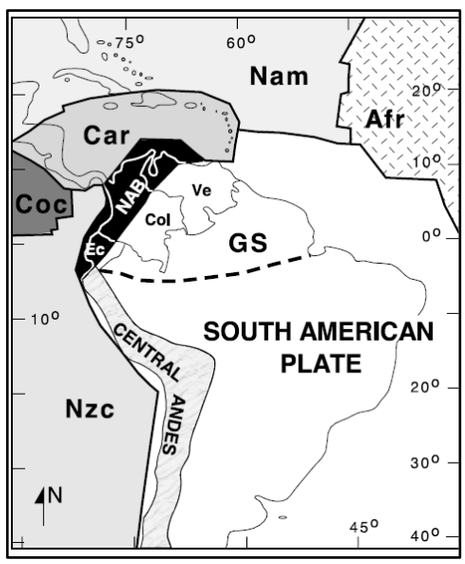


Figura 8. Bloque Norandino en la esquina septentrional de Suramérica y su compleja interacción con las Placas Nazca, Caribe y Suramérica. Tomado de Cediel et al., 2003.

La Placa de Nazca se encuentra subduciendo al oriente bajo la Placa Suramericana a una tasa de subducción de 65-70 mm/año (Rhea, et al., 2010). La Placa de Nazca se forma en el último episodio de fragmentación de la Placa Farallón a principios del Mioceno cuando la Placa de Cocos se separa completamente reduciendo considerablemente el tamaño de la misma y este fragmento de la Placa Farallón es renombrado como Placa de Nazca (Lonsdale, 2005).

La evolución de la Placa Caribe, la cual se encuentra al norte del territorio colombiano ha sido controversial en las últimas décadas, se han planteado básicamente dos grupos de modelos diferentes: Los modelos “del Pacífico” que proponen un origen de la corteza oceánica caribe en el Mesozoico Tardío en la región del Pacífico y una deriva a su posición actual en medio de las dos américas (Pindell et al.,1988;); y otro modelo alternativo el cual propone la formación de la corteza caribe al oeste de su posición actual pero en medio de las dos américas (Meschede y Frisch, 1998). La tasa de desplazamiento de la placa Caribe con respecto a la placa Suramericana es de aproximadamente 20mm/año (Pérez et al., 2001).

Marco geológico y tectónico del Departamento de Santander

El Departamento de Santander se encuentra conformado por los Terrenos de Santander, Floresta y el Supraterreno Cretácico en el sentido de Etayo et al. (1983). Sin embargo, el uso de estos términos ha dado lugar una serie de confusiones en la aplicación e interpretación de los mismos, por tal razón Royero y Clavijo han optado por subdividir el Departamento de Santander en tres provincias: el Macizo de Santander, la Cordillera Oriental y el Valle Medio del Magdalena (Figura 9).

La Provincia del Macizo de Santander se encuentra al oriente de la Falla de Bucaramanga y esta subdividida en los bloques Floresta, Cucutilla, Pamplona y Ocaña. En términos generales, estos bloques incluyen fallas inversas y sistemas de fallamiento en pequeños bloques y la presencia de anticlinales y sinclinales con direcciones que van desde el SE-NW hasta SW-NE. Esta provincia está constituida principalmente por rocas metamórficas precámbricas y paleozoicas; rocas ígneas paleozoicas y mesozoicas y, rocas sedimentarias paleozoicas, mesozoicas y cenozoicas (Royero y Clavijo, 2001).

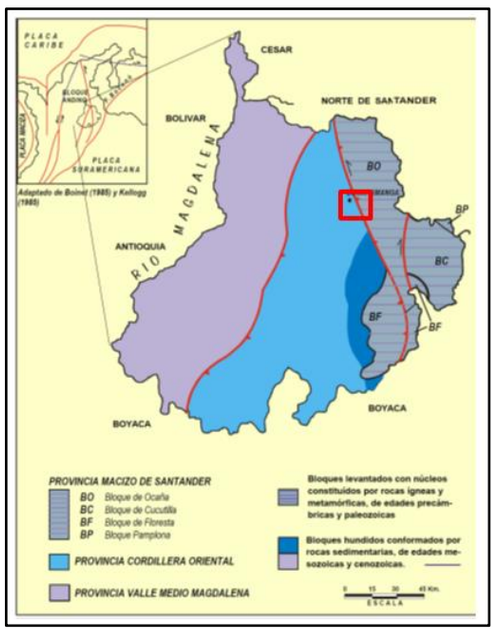


Figura 9. Esquema tectónico del Departamento de Santander. En el cuadro rojo se encuentra el área de estudio. Modificado de Royero y Clavijo, 2001.

La Provincia de la Cordillera Oriental se encuentra entre la Falla de Bucaramanga y la Falla La Salina. Se caracteriza por pliegues anticlinales y sinclinales amplios limitados por fallas inversas de

direcciones NE a NW. Esta provincia se caracteriza por la presencia de rocas sedimentarias jurásicas y cretácicas (Royero y Clavijo, 2001). La Provincia del Valle Medio del Magdalena se encuentra al occidente del departamento y está caracterizada tectónicamente por un estilo estructural de plegamiento con anticlinales y sinclinales amplios y suaves. Las rocas presentes en esta provincia son sedimentarias mesozoicas y cenozoicas (Royero y Clavijo, 2001).

En la Figura 10 se encuentran las principales estructuras que se encuentran en el Departamento de Santander, y posteriormente se encuentra una breve descripción de las estructuras que tienen mayor interés en el presente estudio.

Falla de Bucaramanga: Corresponde al segmento meridional de la estructura considerada anteriormente como la Falla Bucaramanga-Santa Marta en el sentido de París et al. (2000). Esta falla corresponde a una falla de rumbo con movimiento sinestral y dirección NNW. La cual muestra un desarrollo geomorfológico bastante evidente que incluye lomos de presión, lomos de obturación, silletas de falla, cauces desviados, lagos de falla entre otros (Royero y Clavijo 2001, Ward y Goldsmith, 1971). Una característica destacable de esta falla es el desplazamiento sinestral del Río Suratá de 2.5 km el cual se ha considerado como el afluente que aporto los sedimentos al Abanico Aluvial de Bucaramanga (Diederix et al., 2008) (Figura 11), según Jiménez et al. (2014) en base a investigaciones de paleomagnetismo del abanico (la Falla de Bucaramanga tiene una tasa de desplazamiento de 3mm/año como máximo).

Sistema de Fallas del Suarez: Dentro de este sistema de fallas se incluyen las Fallas del Suarez, del Rio de Oro y la Falla de Chimitá-Café Madrid (INGEMINAS, 2009). Se extiende por una longitud de 120 km desde Barbosa hasta la Falla de Bucaramanga al norte; su trazo tiene una dirección N20°E y una inclinación hacia el occidente (Royero y Clavijo, 2001).

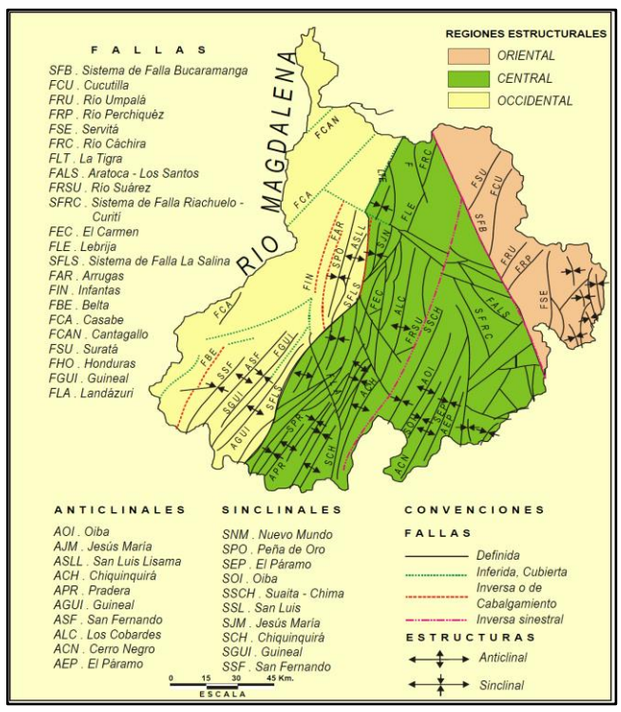


Figura 10. Esquema estructural del Departamento de Santander. Tomado de Royero y Clavijo, 2001.

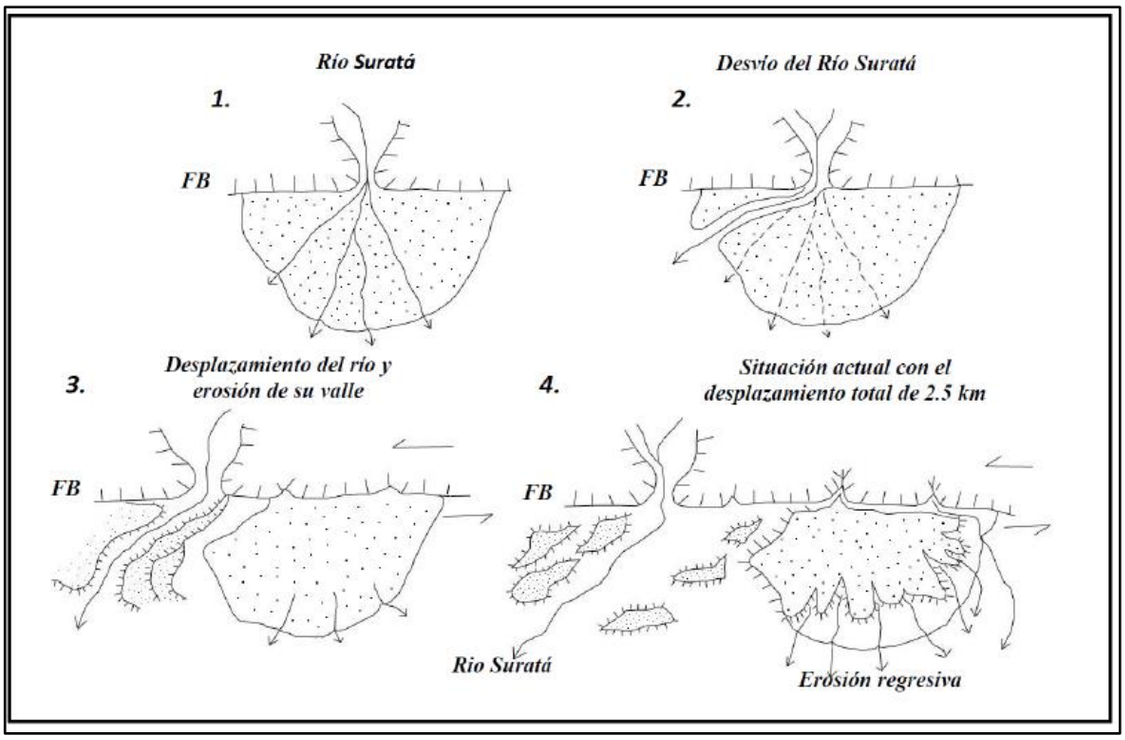


Figura 11. Desvío del Río Suratá debido a la acción de la Falla de Bucaramanga. Tomado de Diederix et al., 2008.

Nido sísmico de Bucaramanga: Corresponde a una zona sísmica de intermedia profundidad, aproximadamente 160 kilómetros de profundidad, ubicada en el Departamento de Santander a 6.8° N y 73.1°W. Este sector tiene una alta tasa de actividad sísmica con relación a su volumen y a la relativa tranquilidad sísmica del área circundante. Esta generación de sismos en el Departamento de Santander se ha tratado de explicar con diversas teorías sin embargo ninguna ha sido capaz de explicar totalmente la naturaleza de dicho nido, por lo que en términos generales se ha explicado por la compleja interacción de las placas de Nazca, Caribe y Suramérica (Cortes et al., 2005; Taboada et al., 2000; Zafiri et al., 2007).

9.2. MITIGACIÓN DE SECTORES CRÍTICOS AFECTADOS.

MARCO TEÓRICO

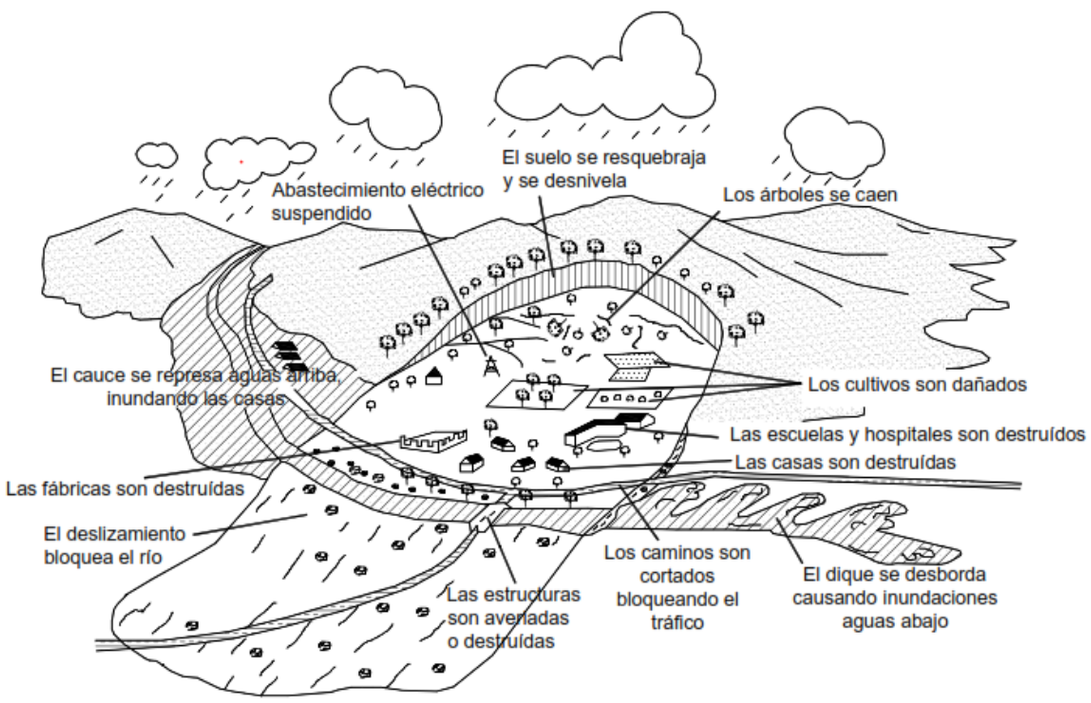
Nomenclatura de los movimientos: Los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb y Hrrod, 1989) Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, afectaciones ambientales diversas, daños en obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos etc.

El volumen de daños totales es superior al de los terremotos y las inundaciones. Sin embargo, un gran porcentaje de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se implementan medidas de prevención o control.

Los taludes y sus procesos son estudiados por una gran variedad de disciplinas del conocimiento tales como: La geología, la geomorfología, la geotecnia, las ciencias del suelo, la hidrología, las ciencias forestales, etc. Además, muchas otras disciplinas tienen relación con los taludes y sus efectos o implicaciones: la arquitectura, la planeación urbana, la ingeniería en todas sus especialidades, la agricultura, el turismo, etc.

La nomenclatura más comúnmente utilizada en las ciencias geotécnicas, se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema de nomenclatura y clasificación más utilizado en el mundo.

Figura 12. Deslizamiento sobre zona poblada

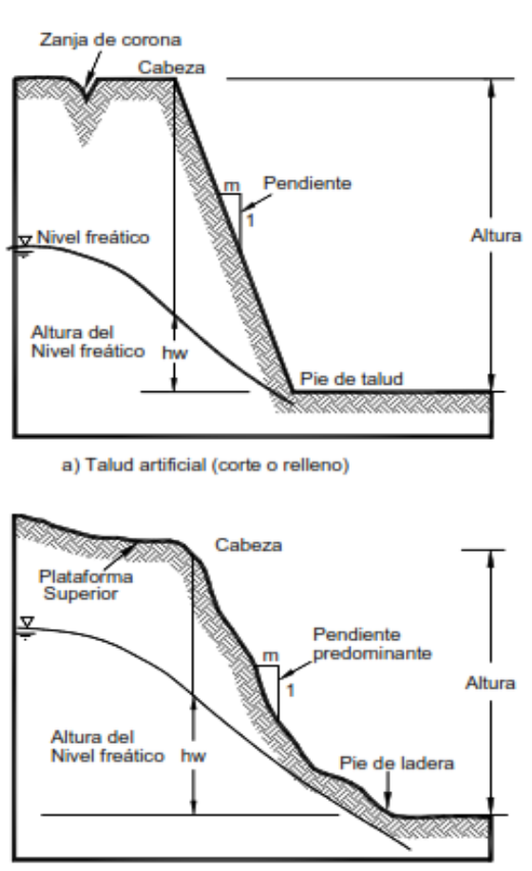


Fuente: *Suárez 2009*

Talud y Ladera

Un “talud” es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

Figura 13. Talud y ladera



Fuente: *Suárez 2009*

Deslizamiento

Los deslizamientos (“Landslides”) consisten en el “movimiento de masas de roca, residuos o tierra hacia abajo de un talud” (Cruden 1991). En el término deslizamiento se incluyen tanto los

procesos de erosión como los procesos denudacionales. La naturaleza precisa del proceso no está incluida en la definición e incluye procesos producto de la acción de fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc.

Partes de un deslizamiento:

Cabeza: Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

Cima: El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal se le denomina “cima”.

Corona: El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta, arriba del escarpe principal, por encima de la cabeza.

Escarpe principal: Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de falla.

Escarpe secundario: Superficie muy inclinada producida por desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

Superficie de falla: Área por debajo del movimiento, la cual delimita el volumen de material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de falla no se mueve, mientras el que encuentra por encima de esta se desplaza. En algunos tipos de movimientos no hay superficie de falla.

Pie de la superficie de falla: La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

Base: El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

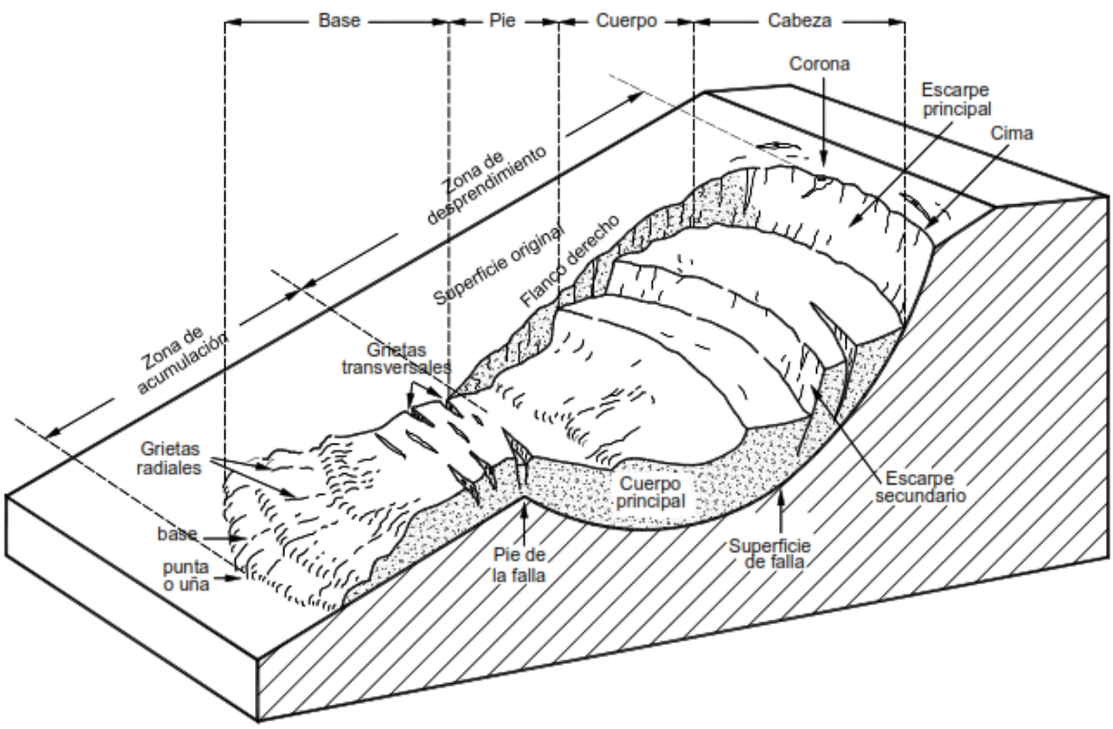
Punta o uña: El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

Cuerpo principal del deslizamiento: El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Pueden presentarse varios cuerpos en movimiento.

Superficie original del terreno: La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

Costado o flanco: Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

Figura 14. Partes de un deslizamiento



Fuente: *Suárez 2009.*

Dimensiones de los movimientos

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG:

Ancho de la masa desplazada Wd: Ancho máximo de la masa desplazada perpendicular a la longitud Ld.

Ancho de la superficie de falla Wr: Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud Lr.

Longitud de la masa deslizada Ld: Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

Longitud de la superficie de falla Lr: Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

Profundidad de la masa desplazada Dd: Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por Wd y Ld.

Profundidad de la superficie de falla Dr: Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por Wr y Lr.

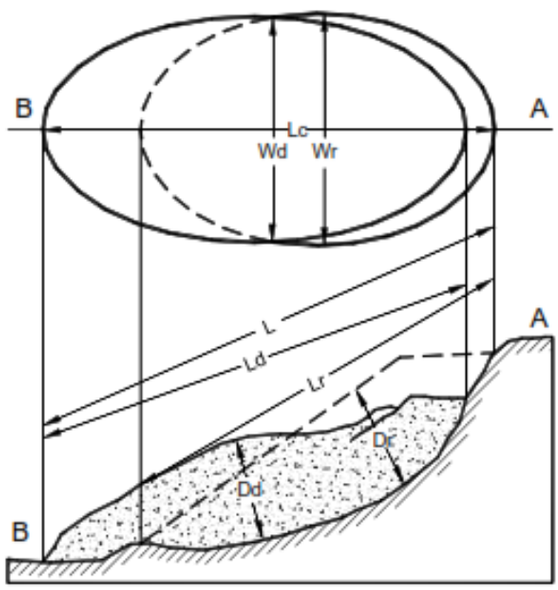
Longitud total L: Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

Longitud de la línea central Lc: Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

Igualmente, deben medirse la altura del nivel freático, alturas de escarpes, radios de rotación del movimiento, pendientes de la superficie antes y después de la falla.

En deslizamientos la escala horizontal debe ser igual a la vertical. Se recomienda que las dimensiones sean identificadas en planos en planta y perfil del deslizamiento.

Figura 15. Dimensiones de los movimientos en masa IAEG Commission on Landslides (1990).



Fuente: *Suárez 2009*

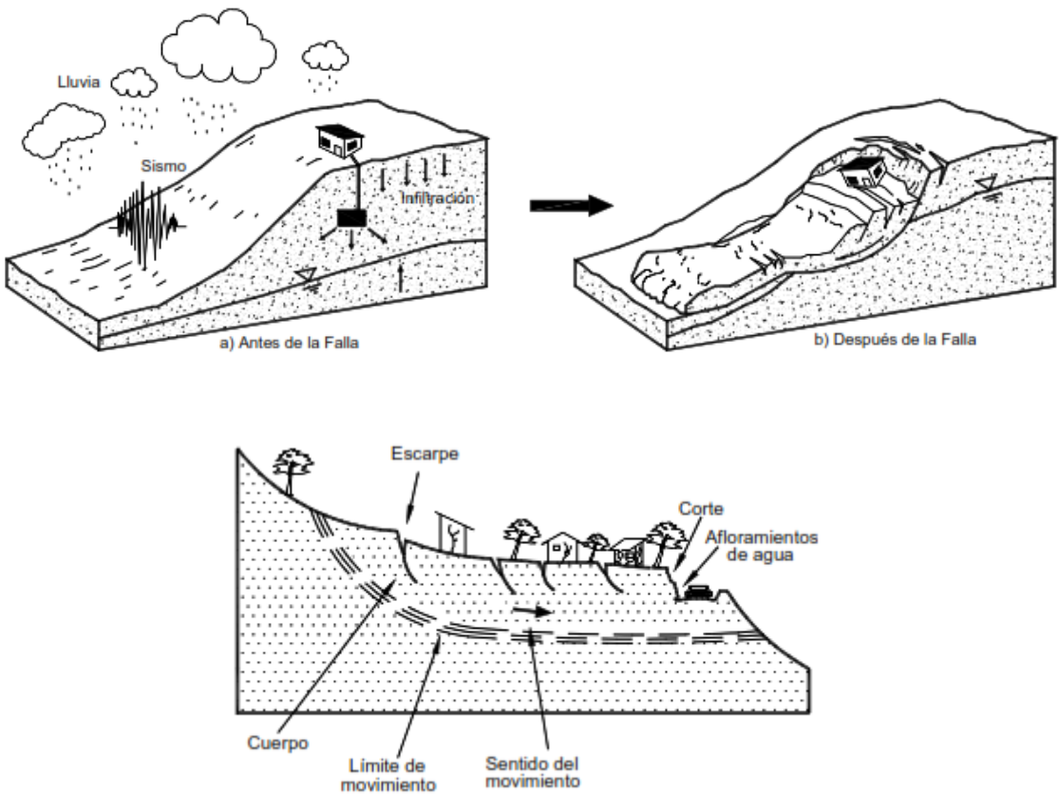
Deslizamiento Rotacional

En un desplazamiento rotacional la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto a un eje paralelo a la superficie y transversal al deslizamiento. El centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento. Visto en planta,

el deslizamiento de rotación posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento.

El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento, generándose comúnmente flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. La cabeza del movimiento bascula hacia atrás y los árboles se inclinan de forma diferente en la cabeza y en el pie del deslizamiento (Suárez, 2009).

Figura 16. Deslizamiento en suelos blandos



Fuente: *Suárez 2009.*

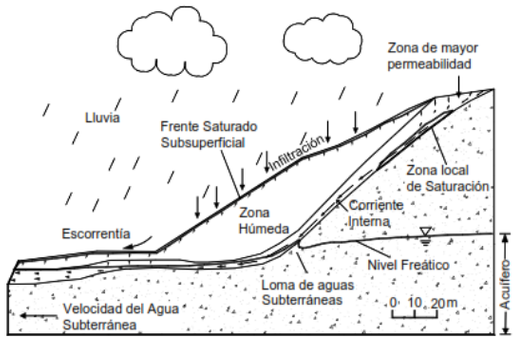
Factores que afectan el comportamiento de una ladera

Los procesos que ocurren en un talud son generalmente complejos y dependen de gran cantidad de factores, los cuales interactúan entre ellos para definir un comportamiento. A continuación, se presenta una descripción de algunos de los factores fundamentales, que afectan la estabilidad de los taludes.

La Hidrogeología

Es muy importante para analizar la estabilidad de un talud, la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual. Este modelo debe tener en cuenta las zonas de infiltración arriba de los taludes, incluyendo la infiltración a muchos kilómetros de distancia, siempre y cuando esta agua pueda afectar los niveles freáticos y corrientes de agua. Otros factores a considerar son la conductividad hidráulica mejor conocida como permeabilidad y la porosidad de los materiales del talud. La conductividad facilita la llegada de corrientes de agua y la porosidad afecta la capacidad de almacenamiento de agua en el talud. Se deben identificar además las fuentes, localización y características de los niveles freáticos, corrientes subterráneas y sus fluctuaciones.

Figura 17. Esquema de precipitación e infiltración.



Fuente: *Suárez 2009*

La Sismicidad

La sismicidad de las zonas montañosas es comúnmente alta. La mayoría de las cadenas de montañas son el producto de procesos tectónicos o volcánicos. Los movimientos sísmicos a su vez pueden activar deslizamientos de tierra. En el caso de un sismo existe el triple efecto de aumento de esfuerzo cortante, disminución de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociados con la onda sísmica, pudiéndose llegar a la falla al cortante y la licuación, en el caso de suelos granulares saturados.

La cobertura vegetal

La vegetación cumple efectos protectores importantes en la mayoría de los taludes en cuanto protege contra la erosión y afecta los procesos de evapotranspiración y de infiltración de agua. Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación. La vegetación

también cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo por acción de las raíces, y por la producción de materia orgánica, la cual puede evitar la infiltración del flujo al suelo sub superficial.

El Efecto Antrópico

El hombre induce cambios en el medio ambiente de un talud y las actividades humanas tienen una gran influencia sobre su comportamiento y especialmente sobre la activación de deslizamientos. Las actividades antrópicas como el uso de la tierra, las prácticas de agricultura, la construcción de carreteras y la irrigación entre otras son factores determinantes en la ocurrencia de deslizamientos.

Erosión superficial

Húmedo La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos. Puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud. Los procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, aquellos compuestos por limos y arenas finas principalmente, cuando la cobertura vegetal ha sido removida

Erosión Laminar

El proceso de erosión laminar se inicia por el impacto de las gotas de agua lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de la escorrentía produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos. Al caer las gotas de lluvia levantan las partículas de suelo y las reparten sobre la superficie del terreno. La velocidad de las gotas de lluvia puede alcanzar valores hasta de 10 metros por segundo y su efecto es muy grande sobre las superficies de talud expuestos y sin cobertura vegetal. El proceso es particularmente grave cuando la pendiente del talud es grande, como es el caso de los taludes de cortes en obras viales. La erosión laminar en taludes de alta pendiente puede generar procesos diferenciales de erosión, los cuales a su vez pueden activar caídos.

Erosión en surcos

Los surcos de erosión se forman por la concentración del flujo del agua en caminos preferenciales, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad generalmente, paralelos. El agua de escorrentía fluye sobre la superficie de un talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos (rills).

Los surcos forman una compleja microred de drenaje donde un surco al profundizarse va capturando los vecinos, formando surcos de mayor tamaño, los cuales a su vez se profundizan o amplían formando cárcavas en forma de V que pueden transformarse a forma de U. Inicialmente la cárcava se profundiza hasta alcanzar una superficie de equilibrio, la cual depende de las características geológicas e hidráulicas, para luego iniciar un proceso de avance lateral mediante deslizamientos de los taludes semiverticales producto de la erosión.

Erosión en Cárcavas

Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.

Las cárcavas inicialmente tienen una sección en V, pero al encontrar un material más resistente o interceptar el nivel freático se extienden lateralmente, tomando forma en U. Otro caso de cárcavas que puede generar deslizamientos se presenta en las entregas de alcantarillas.

Erosión por ríos y corrientes de agua

Los ríos tienen una tendencia a profundizarse y ampliarse, especialmente en el momento de las grandes inundaciones o avenidas. Los ríos erosionan las riberas, cortan el pie de los taludes y pueden activar deslizamientos. Este problema puede ser grave en zonas urbanas donde la acción antrópica maneja el río, disminuye su sección, aumenta su velocidad y direcciona la corriente. La erosión es particularmente fuerte en las curvas de la corriente.

Erosión por afloramiento de agua

Se puede presentar erosión en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas y/o taludes negativos, los cuales a su vez pueden producir desprendimientos de masas de suelo. Los afloramientos pueden estar relacionados con infiltraciones cercanas o por presencia de niveles freáticos.

Existen otros factores como: la litología o formación geológica, la microestructura, la estructura geológica, los planos de estratificación, la tectónica y fracturación, la geomorfología, el estado de meteorización, cobertura vegetal, el clima y la hidrología, los cuales también contribuyen a la afectación de la estabilidad de una ladera y pueden dar lugar a la ocurrencia de movimientos en masa.

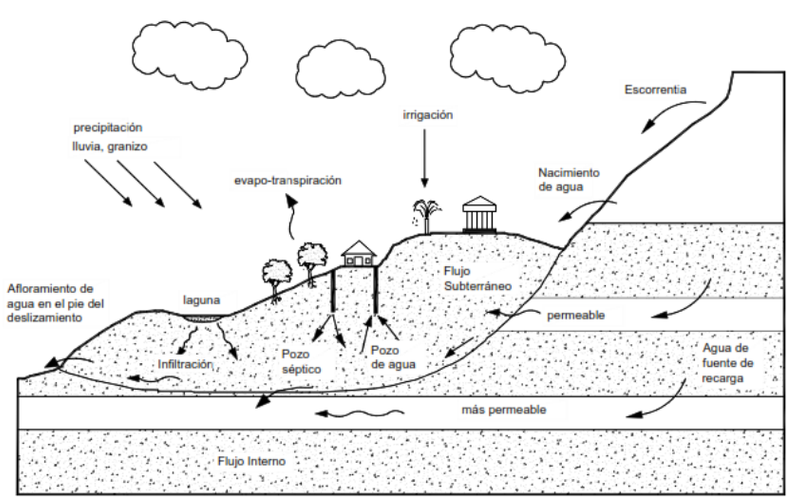
Efecto del agua en la estabilidad de laderas

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes, o durante períodos lluviosos, y de igual forma el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos.

La interpretación más frecuente del efecto del agua es que las lluvias por infiltración saturan el talud y la presión de poros induce una disminución de la resistencia al cortante, la cual a su vez puede activar un deslizamiento, Sin embargo, el proceso no es siempre tan simple y la activación de un deslizamiento por acción del agua es un fenómeno complejo con una gran cantidad de variables.

El análisis hidrológico es uno de los trabajos previos más importantes en el análisis de estabilidad de taludes. La hidrología no es una ciencia exacta y es posible que se obtengan resultados muy diferentes de acuerdo al método que se utilice para el cálculo y la metodología de manejo de la información; por lo tanto, se debe tener un criterio muy claro de los fenómenos para interpretar la información hidrológica.

Figura 18. Infiltración del agua en laderas



Fuente: *Suárez 2009*

Efectos del agua sobre el suelo

La relación del efecto del agua sobre la ocurrencia de deslizamientos ha sido estudiada por una gran cantidad de investigadores. Existen evidencias muy claras de la relación directa entre las lluvias y la ocurrencia de deslizamientos de tierra.

Adicional a las infiltraciones de agua lluvia pueden existir otras fuentes de agua como son los cuerpos de agua (canales, cañadas o lagunas) arriba del talud, en los cuales puede ocurrir infiltración localizada.

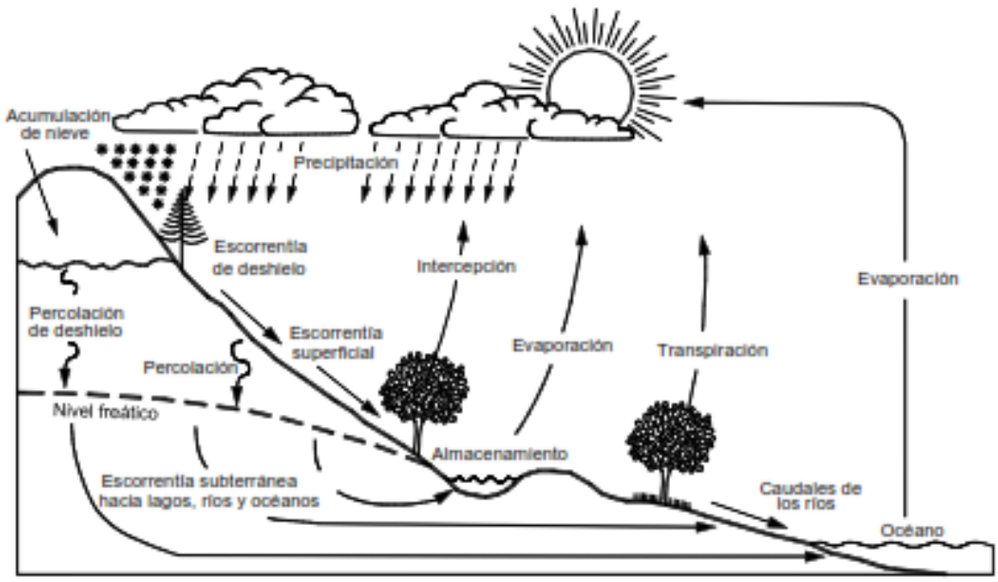
Los cambios en el sistema hidrológico del talud pueden afectar el comportamiento del mismo. Si el régimen de agua del suelo es alterado drásticamente por irrigación, remoción de la vegetación o inundación parcial, se puede producir inestabilidad de los taludes (Richards, 1985). Entre los factores que afectan el comportamiento de los taludes relacionados con la presencia del agua se encuentran los siguientes:

- Lubricación
- Ablandamiento
- Presiones de poros
- Tensiones capilares
- Fatiga por fluctuaciones del nivel
- Freático
- Lavado de cementantes
- Aumento de densidad
- Fuerzas hidráulicas interna
- Erosión
- Erosión laminar, en surcos y en cárcavas

El ciclo hidrológico

El agua se encuentra en la naturaleza de diferentes formas, generalmente en continuo movimiento, de acuerdo a un ciclo que incluye las nubes o vapor de agua, la precipitación en forma de lluvia granizo o nieve, la infiltración, la evapotranspiración, la escorrentía, las corrientes subterráneas, los acuíferos, los ríos y quebradas, los mares y los lagos. El agua continuamente está cambiando de forma de acuerdo a un ciclo natural denominado ciclo hidrológico

Figura 19. Ciclo hidrológico



Fuente: *Suárez 2009*

Parte de la lluvia se infiltra y parcialmente corre por la superficie como escorrentía.

Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Flujo subterráneo + cambio de humedad en el suelo + Acumulación de agua subterránea en los acuíferos.

La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, y a su vez afecta la estabilidad de taludes o laderas.

La precipitación promedio es muy superior en las zonas tropicales que en el resto del mundo. Estas lluvias son asociadas principalmente con agrupaciones o “clusters” de nubes que se localizan en la zona de convergencia de vientos. Generalmente, estas agrupaciones de nubes arrastradas por los vientos cubren áreas de varios miles de kilómetros cuadrados.

El flujo subterráneo

La respuesta del régimen de aguas subterráneas a las lluvias es diferente de acuerdo al talud, la formación geológica y las características ambientales. Existe una respuesta inmediata a la lluvia por infiltración en las zonas cercanas al talud y una respuesta regional por las lluvias infiltradas en toda el área de aferencia alrededor del talud.

La infiltración

El agua de la lluvia al caer sobre el suelo trata de infiltrarse, desplazando el agua existente hacia abajo por los macro poros, formando una especie de onda de presión de agua dentro del suelo, la cual produce un frente húmedo de infiltración.

El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea.

Al inicio de la lluvia la totalidad de la precipitación se infiltra humedeciendo el suelo. La humedad en el suelo antes de la lluvia es determinante en la cantidad de infiltración porque al llover, el agua trata de penetrar al suelo humedeciéndolo y creando una capa delgada de saturación; y hasta que esta capa no haya llegado a un punto de equilibrio no se forman una escorrentía y una corriente de infiltración.

El equilibrio se logra cuando todo el perfil está transmitiendo agua a la máxima rata permitida por la parte menos permeable de los horizontes. Esto puede ocurrir entre diez minutos o varias horas después de iniciada la lluvia.

Ecuación de Green y Ampt (1911)

En esta ecuación se describe la infiltración por lluvia permanente en un suelo no-saturado. El modelo de dos capas asume que un frente húmedo percola hacia abajo formando un nivel saturado colgado. Por encima del frente húmedo el suelo se encuentra totalmente saturado, mientras el suelo por debajo se asume a la humedad inicial.

Figura 20. Ecuación de Green y Ampt 1911

Aplicando la Ley de Darcy se obtiene:

$$i = K_s\left(\frac{z + H + \psi}{z}\right)$$

Donde:
i = Capacidad de infiltración.
Ks = Coeficiente de permeabilidad saturada.
Z = Profundidad del frente saturado.
H = Profundidad de agua encharcada.
ψ = Cabeza de succión en el frente saturado.

Fuente: *Suárez 2009*

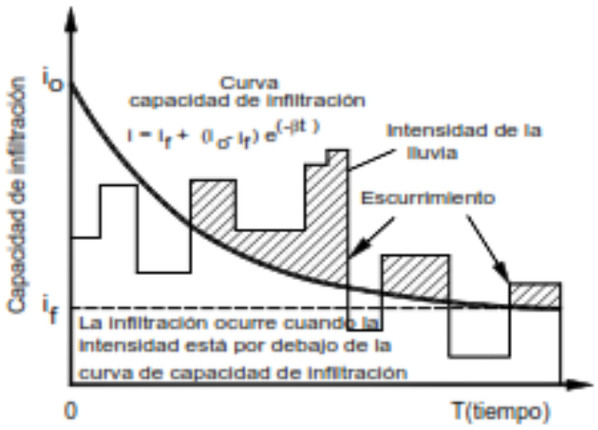
Modelo de Horton (Jury y Horton 2004).

Jury y Horton (2004) presentaron una expresión empírica para describir la disminución de la capacidad de infiltración con el tiempo.

Figura 21. Infiltración y escorrentía de acuerdo a la curva de Horton

$$i = i_f + (i_o - i_f)e^{-\beta t}$$

Donde:
i = Capacidad de infiltración en el tiempo (t).
i_o = Capacidad de infiltración inicial.
i_f = Capacidad de infiltración en flujo permanente final.



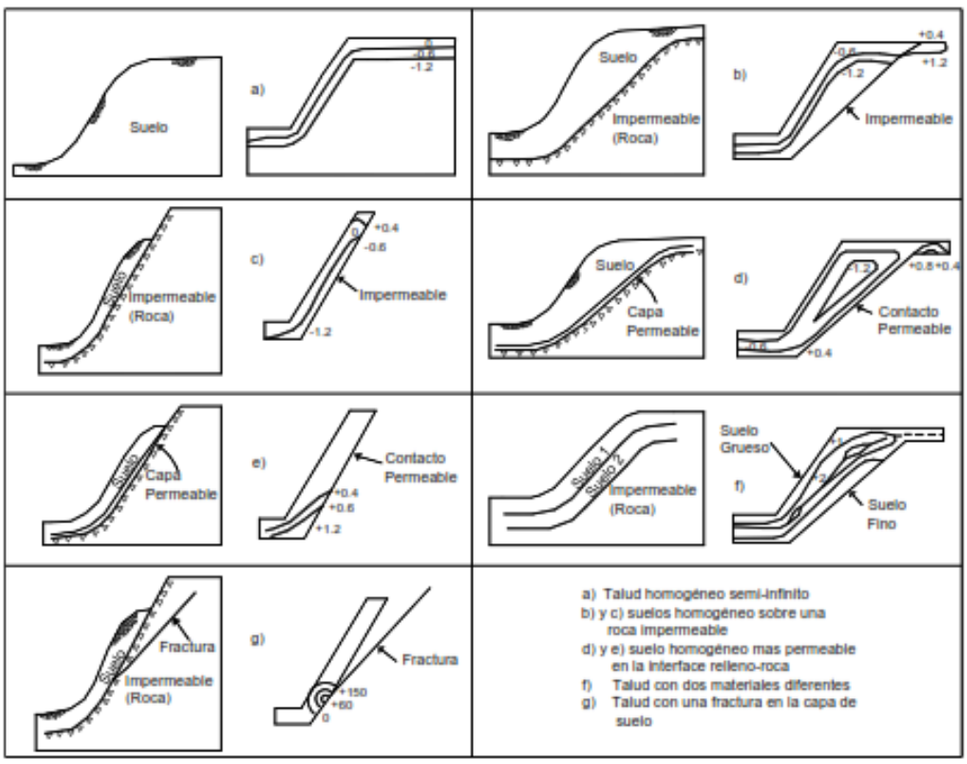
Fuente: *Suárez 2009*

Flujo de agua subterránea

El agua infiltrada por las lluvias penetra en el suelo en forma semi-vertical hasta encontrar un manto de alta conductividad hidráulica (permeabilidad) que facilita la formación de una corriente, o uno semi-impermeable, que impide su paso y obliga a la formación de una corriente de agua paralela a la superficie de baja conductividad hidráulica (permeabilidad). Estas corrientes subterráneas pueden ser temporales o permanentes.

La determinación de las características del flujo del agua subterránea puede realizarse utilizando la teoría de flujo basado en la ley de Darcy. Existe una gran cantidad de soluciones gráficas, numéricas y software para la solución de los problemas de flujo de aguas subterráneas (Abramson y otros, 2002).

Figura 22. Distribución de presiones en función de la permeabilidad de los materiales (Vargas y otros 1990)



Cambios hidrogeológicos urbanos

La intervención humana del medio físico produce cambios importantes en la hidrología de las áreas urbanas en las siguientes formas:

Eliminación de áreas cubiertas por bosques o vegetación y su remplazo por áreas duras y edificaciones.

Cambios topográficos para adaptar los terrenos al proceso de urbanización.

Canalización de aguas por medio de pavimentos, sumideros y alcantarillados, disminución de la rugosidad, inhibición de la infiltración y de la evapotranspiración, aumento de los caudales y reducción del tiempo de concentración.

Aumento de caudales con las aguas de acueducto tomadas de otras cuencas.

Transporte de aguas de una microcuenca a otra a través del sistema de alcantarillado.

Manejo inadecuado de aguas lluvias y residuales

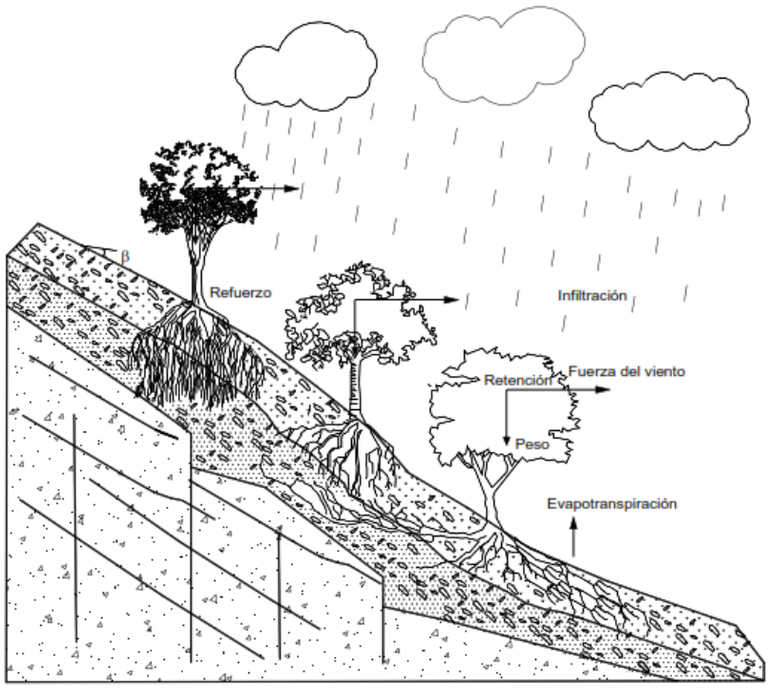
Ruth y Moulton (1996) indican que la concentración de agua superficial o sub-superficial en un sitio con situación geológica desfavorable es una causa primaria de inestabilidad de taludes. Las entregas puntuales sobre los taludes producen cárcavas que pueden representar una amenaza directa para las viviendas que producen el vertimiento.

La falta de sistemas de alcantarillado es el caso más grave para la formación de cárcavas de erosión, teniendo en cuenta que las calles actúan como colectores de agua y se pueden producir familias de cárcavas de gran tamaño.

Las entregas de los sistemas de aguas de alcantarillado en sitios potencialmente susceptibles geotécnicamente, pueden formar grandes cárcavas, las cuales pueden terminar en deslizamientos de tierra. La falta de sumideros para aguas lluvias o poca capacidad de estos; en este caso el sistema de alcantarillado no es eficiente en la recolección de las aguas lluvias y las calles actúan como sistemas alternativos con la consiguiente formación de cárcavas.

La vegetación y los deslizamientos

Figura 23. Refuerzo de taludes con vegetación



El efecto de la vegetación sobre la estabilidad de los taludes ha sido muy debatido en los últimos años; el estado del arte actual deja muchas dudas e inquietudes y la cuantificación de los efectos de estabilización de las plantas sobre el suelo no ha tenido una explicación universalmente aceptada. Sin embargo, la experiencia ha demostrado el efecto positivo de la vegetación, para evitar problemas de erosión, reptación y fallas sub-superficiales.

Los árboles y arbustos de raíz profunda les aportan una resistencia cohesiva significativa a los mantos de suelo más superficiales y al mismo tiempo facilitan el drenaje subterráneo, reduciendo en esta forma la probabilidad de deslizamientos poco profundos; pero su efecto no es el mismo en deslizamientos profundos

Efectos de la vegetación sobre el talud

Para analizar los fenómenos del efecto de la vegetación sobre el suelo, se requiere investigar las características específicas de la vegetación en el ambiente natural que se esté estudiando. Entre los factores importantes se sugiere analizar los siguientes: volumen y densidad de follaje, tamaño,

ángulo de inclinación y aspereza de las hojas, altura total de la cobertura vegetal, presencia de varias capas diferentes de cobertura vegetal, tipo, forma, profundidad, diámetro, densidad, cubrimiento y resistencia del sistema de raíces.

El tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales:

En primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además, da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.

Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

Factores más importantes

- Intercepta la lluvia.
- Aumenta la capacidad de infiltración.
- Extrae la humedad del suelo.
- Grietas por desecación.
- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante.
- Anclan el suelo superficial a mantos más profundos.
- Aumentan el peso sobre el talud.
- Transmiten al suelo fuerza del viento.
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.

La deforestación puede afectar la estabilidad de un talud de varias formas:

- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial.
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces.
- Se facilita la infiltración masiva de agua.

La quema de la vegetación aumenta la inestabilidad de los taludes, especialmente si esto ocurre en áreas de coluviones en los cuales la vegetación ejerce un papel preponderante en la estabilidad, especialmente por la eliminación del refuerzo de las raíces y por la exposición a la erosión acelerada.

Efectos hidrológicos de la vegetación

La vegetación afecta las condiciones hidrológicas de un talud de varias formas:

Interceptación de la lluvia: De acuerdo con Styczen y Morgan-1996, la lluvia se divide en dos partes, la lluvia que cae directamente sobre el suelo y la lluvia que es interceptada por el follaje de la vegetación.

Según Gregory y Walling (1973), dependiendo de la intensidad de la lluvia y del cubrimiento y tipo de vegetación en un bosque tropical, puede interceptarse hasta un 60% del total de la lluvia anual. Parte de la lluvia interceptada es retenida y evaporada, y parte alcanza finalmente la tierra por goteo o por flujo sobre las hojas y troncos. Es importante determinar el tiempo entre la lluvia y el goteo para analizar el efecto hidrológico de cada tipo de vegetación.

Retención de agua: La retención de agua en el follaje demora o modifica el ciclo hidrológico en el momento de una lluvia. Este fenómeno disminuye la rata de agua de escorrentía disminuyendo su poder erosivo, pero puede aumentar la rata de infiltración.

La retención de agua en el follaje depende del tipo de vegetación, sus características y la intensidad de la lluvia. Los árboles de mayor volumen o densidad de follaje demoran más el ciclo hidrológico, en razón a que retienen por mayor tiempo las gotas de lluvia. En el caso de lluvias muy intensas la retención de agua es mínima, pero en el caso de lluvias moderadas a ligeras, la retención puede ser hasta de un 30%, dependiendo de las características de la vegetación.

Rice y Krames (1970) sugirieron que el clima determina el efecto relativo de la vegetación para prevenir deslizamientos. En los climas para los cuales la precipitación es muy grande, el efecto de la cobertura vegetal sobre la estabilidad es mínimo y en áreas de clima árido la cobertura vegetal puede afectar en forma significativa la ocurrencia de deslizamientos.

Evapotranspiración: La evapotranspiración es un efecto combinado de evaporación y transpiración. Su efecto es una disminución de la humedad en el suelo. Cada tipo de vegetación en un determinado tipo de suelo, tiene un determinado potencial de evapotranspiración y se obtiene generalmente una humedad de equilibrio, dependiendo de la disponibilidad de agua lluvia y nivel freático.

Funciones Específicas de las plantas: Las diferentes partes de una planta cumplen funciones específicas desde el punto de vista de manejo geotécnico. Las raíces cumplen una función muy importante de absorción. Grandes cantidades de agua son absorbidas por las plantas junto con minerales y productos que la planta requiere para su alimentación. Igualmente, las raíces interactúan con el suelo y lo refuerzan. El tronco soporta los órganos fotosintéticos y reproductivos, especialmente las hojas.

Control de la erosión: El efecto más importante de la vegetación universalmente aceptado, es la protección contra la erosión en todos los casos y con todo tipo de vegetación. Barker y otros (1994) reportan ratas de erosión de 12 toneladas de suelo por hectárea en Malasia en el primer año, después de cortado un bosque tropical. Las ratas de erosión aumentan con el tiempo a medida que las raíces se descomponen. La vegetación con mayor densidad de follaje amortigua más eficientemente el golpe de la lluvia y disminuye la erosión.

En hierbas y pastos la densidad y volumen del follaje actúan como un colchón protector contra los efectos erosivos del agua de escorrentía. En lo referente a control de erosión se ha encontrado que donde hay árboles altos la erosión es menor que en el caso de arbustos. Además, se ha encontrado que las hierbas o maleza protegen generalmente mejor contra la erosión que los pastos.

Características de las raíces

Los principales factores que determinan el desarrollo de las raíces son:

- Disponibilidad de nutrientes en el suelo.
- Disponibilidad de oxígeno.
- Contenido de humedad.
- Succión o presión osmótica.
- Temperatura del suelo.
- Niveles de toxinas y elementos patogénicos.
- Sistema de poros.

Profundidad de las raíces: La profundidad de las raíces generalmente no supera los cinco metros en árboles grandes, dos metros en los arbustos y 30 centímetros en los pastos; aunque se han reportado casos de raíces de árboles de más de 30 metros de profundidad (Macgregor y Macmanus, 1992).

La extensión lateral del sistema radicular generalmente es mayor que su profundidad y en algunos casos superan los 50 metros de longitud. La longitud de las raíces y su profundidad deben evaluarse para determinar su efecto sobre la estabilidad de un talud.

Se ha encontrado que la longitud de las raíces es mayor cuando el árbol se encuentra en un suelo bien drenado granular, que cuando se encuentra en un suelo arcilloso. Aparentemente, este efecto se debe a la necesidad que el árbol tiene de buscar agua en el caso de que el drenaje sea bueno.

Acción de refuerzo de las raíces: Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades.

Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

- Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.
- Formar una red densa entretejida en los primeros 30 a 50 cms de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.
- Unir los grupos de partículas impidiendo la ocurrencia de pequeños deslizamientos.
- Ensayos realizados por Campos (1991), demuestran que las raíces aumentan la cohesión de muestras de suelo en gran proporción. Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.
- El sistema radicular de un árbol, en forma conjunta con otros árboles puede formar efectos de arco, similares a los de las pilas o pilotes.

Diseño de revegetalización

La revegetalización de un talud ayuda a controlar la erosión y a aumentar el factor de seguridad. Por esta razón cada día se utiliza más la vegetación en la estabilización de taludes. El efecto de la vegetación es una interacción compleja entre factores hidrológicos y mecánicos de difícil cuantificación.

El establecimiento de vegetación no es fácil y deben tenerse consideraciones especiales para su diseño; sin embargo, todo diseñador debe considerar la vegetación como un sistema básico de estabilización para los taludes en suelo o roca meteorizada (Grados IV, V y VI).

Como regla general, nunca debe plantarse una sola especie, sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original. Se debe considerar además el manejo apropiado de las técnicas de vegetación para ayudar en el proceso natural de sucesión.

Método de análisis "equilibrio límite y factor de seguridad"

Existen diferentes metodologías para el análisis de estabilidad de laderas, a continuación, se presentan algunas metodologías utilizadas: Límite de equilibrio, Esfuerzo – Deformación, discontinuos esfuerzo - deformación de elementos discretos, cinemáticos estereográficos para taludes en roca, Dinámica de caídos de roca, dinámica de flujo. De acuerdo al comportamiento de la ladera identificada, se adopta la metodología de Equilibrio límite.

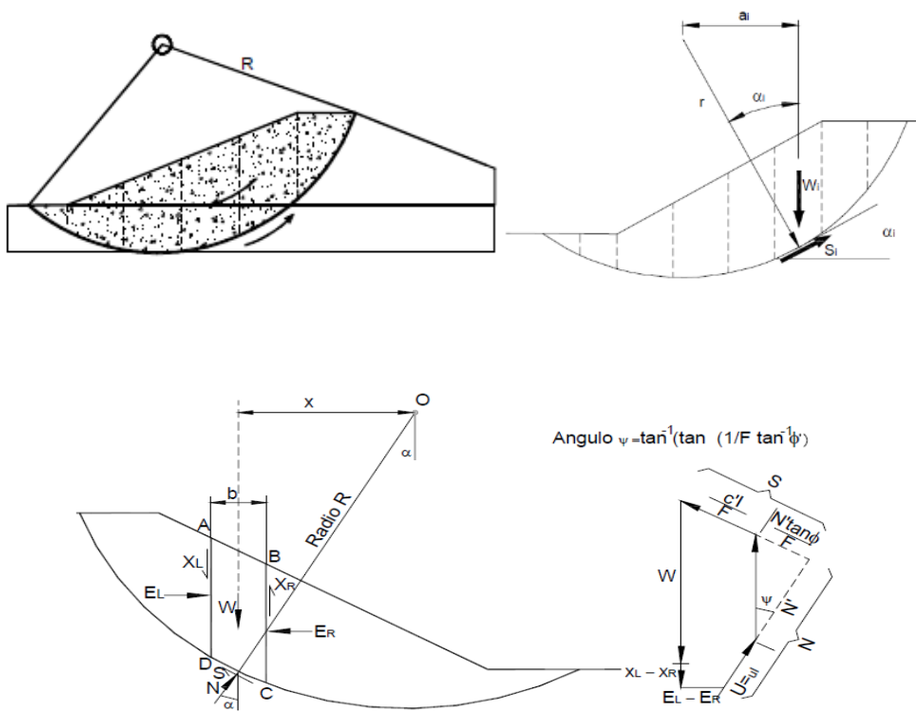
Un análisis de equilibrio límite permite obtener un factor de seguridad o a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla. Una vez se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad ante deslizamiento del talud. Este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento. La teoría de equilibrio límite supone que en el caso de generarse un movimiento en masa, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de toda la superficie de falla, y equivalentes a un factor de seguridad 1.0. 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. Generalmente, los métodos son iterativos y cada uno ofrece diferentes grados de precisión.

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1922) 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:

Figura 24. Método de equilibrio límite

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

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



Fuente: *Suárez, 2009*

Parámetros utilizados: Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas.

Ventajas: Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.

Desventaja: Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.

Para los análisis de estabilidad, se utilizó el método de equilibrio límite, asumiendo superficies de falla circular, esta superficie de falla es característica de los movimientos analizados sobre las

unidades geológicas identificados en las zonas críticas, en los modelos de análisis de estabilidad de taludes se aplicaron metodologías conocidas.

Dentro de los métodos de equilibrio límite, se pueden identificar diferentes autores que crearon metodologías para la determinación de factores de seguridad, para la determinación de la estabilidad de las laderas, a continuación, se presenta una tabla donde se presenta diferentes autores1:

Figura 25. Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación.
Arco circular, (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Fuente: *Suárez, 1998*

Figura 26. Continuación

[1] SUÁREZ DÍAZ JAIME. DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES, INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN, 1998

Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analitico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	c_u c, ϕ	0-90° 0-90°	$\phi = 0$ Circulo de fricción	Análisis no drenado. Taludes secos solamente.
Bishop y Morgenstern (1960)	c, ϕ, r_u	11-26.5°	Bishop	Primero en incluir efectos del agua.
Gibsson y Morgenstern (1960)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	c, ϕ, r_u	0-34°	Spencer	Círculos de pie solamente.
Janbú (1968)	c_u c, ϕ, r_u	0-90°	$\phi = 0$ Janbú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Giger (1971)	c, ϕ	20-90°	Análisis límite	
O´Connor y Mitchell (1977)	c, ϕ, r_u	11-26°	Bishop	Bishop y Morgenstern (1960) extendido para incluir $N_c = 0.1$
Hoek y Bray (1977)	c, ϕ c, ϕ	0-90° 0-90°	Círculo de fricción Cuña	Incluye agua subterránea y grietas de tensión. Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	c, ϕ	0-45°	Círculo de fricción	Extensión del método de Taylor (1948).
Charles y Soares (1984)	ϕ	26-63°	Bishop	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	c, ϕ, r_u	11-63°	Bishop	Extensión de Bishop y Morgenstern (1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Fuente: *Suárez, 1998*

Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Bishop asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión simplificada de su método, de acuerdo con la expresión:

$$F.S. = \frac{\sum \left[\frac{c'\Delta l \cos\alpha + (W'u\Delta l \cos\alpha)\tan\phi'}{\cos\alpha + (sen\alpha \tan\phi')/FS} \right]}{\sum W sen\alpha}$$

Bishop Simplificado

$$F_s = \frac{\sum \left[\frac{(c'b_n + W_n(1 - r_{un})\tan\phi')\sec\alpha_n}{1 + \frac{\tan\phi'\tan\alpha_n}{F_s}} \right]}{\sum W_n \sin\alpha_n}$$

Donde:

Δl = longitud de arco de la base de la dovela

W = Peso de cada dovela

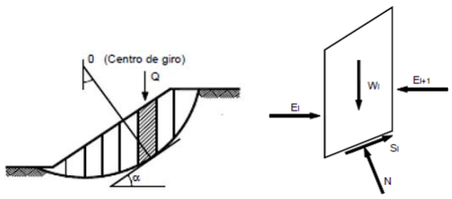
C', φ= Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = γ w x h w

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de factores de seguridad de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos. A continuación, se presenta la metodología grafica para la determinación del factor de seguridad en una ladera por medio de la utilización de tajadas

Figura 27 Tajadas en una ladera y Diagramas de fuerzas analizadas pro Bishop



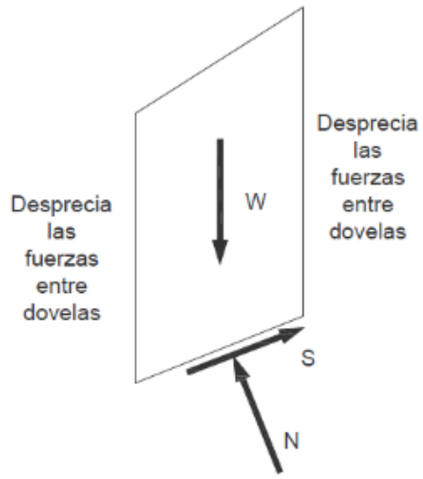
Fuente: *Suárez, 1998*

Método Fellenius

Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo producido por estas fuerzas se obtiene el Factor de Seguridad.

El método ordinario o de Fellenius solamente satisface equilibrios de momentos y no satisface equilibrio de fuerzas. Para el caso de φ = 0 el método ordinario da el mismo valor de factor de seguridad que el método del arco circular.

Figura 28. Método de Fellenius



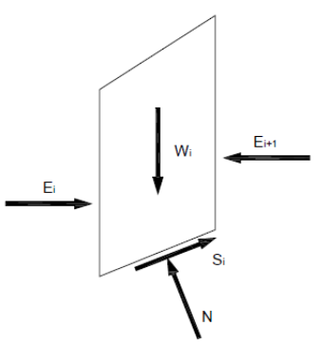
$$F_s = \frac{R\sum\{c'L_n + (W_n\cos\alpha_n - u_n)\tan\phi' + [(X_{n+1} - X_n)\cos\alpha_n - (E_{n+1} - E_n)\sin\alpha_n]\tan\phi'\}}{\sum W_n x_n}$$

Fuente: *Suárez, 1998*

Método Jambu

El método simplificado de Jambú se basa en la suposición que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tiene en cuenta las fuerzas de cortante. Jambú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección f0. El factor f_o depende de la curvatura de la superficie de falla. El método de Jambú solamente satisface equilibrio de fuerzas y no satisface equilibrio de momentos.

Figura 29. Método Jambu



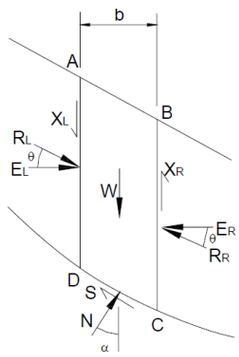
$$\frac{f_o \sum\left\{\left[c'b + (W - ub)Tan\phi\right]\frac{1}{\cos\alpha ma}\right\}}{\sum(W tan\alpha)}$$

Fuente: *Suárez, 1998*

Método Spencer

El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras o sea que tienen el mismo ángulo de inclinación.

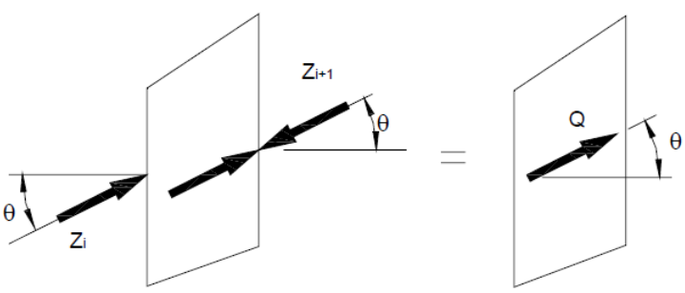
Figura 30. Método Spencer



Método morgenstern and Price:

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas. Esta función puede considerarse constante como en el caso del método de Spencer o puede considerarse otro tipo de función. Esta posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas lo hace un método más riguroso que el de Spencer.

Figura 31. Método Morgenstern and Price



De acuerdo al tipo de superficie de falla de la ladera analizada en el presente proyecto de grado, se adopta la metodología de Bishop.

Limitaciones de los métodos de equilibrio límite:

Se basan solamente en la estática. Como los métodos de equilibrio límite se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.

• Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos. Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura.

• Utilizan modelos de falla muy sencillos. El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de equilibrio límite, es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud.

• Generalmente se asume el material como isotrópico. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares.

Categorización de la amenaza

Como criterios para definir los niveles de amenaza se utilizan los especificados en el titulo H de la Norma Sismo Resistente NSR-10. En este título se encuentra la tabla H.2.4-1 que muestra los factores de seguridad mínimos directos.

Tabla 2. Factores de seguridad básicos mínimos directos

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

Fuente: *NSR-10*

10. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

A. Surata

- ✓ Se realizó el retiro del volumen del suelo residual proveniente de la superficie de falla que se encontraba localizado en la vía de acceso a lo largo de sector afectado y su área adyacente con incidencia a eventos posteriores.

- ✓ Se ejecutó el retiro del volumen de capas de material no consolidado, el cual se encontraba fragmentados sobre la cara expuesta del talud.

- ✓ Se evidenciaron taludes saturados con incidencias directas en el arrastre de materiales finos generando cárcavas al largo del talud, de igual forma se vieron afectados los horizontes del suelo y se observó material inestable por el paso de escorrentía superficial.

- ✓ Se ejecutaron actividades con maquinaria pesada y vehículos de carga para excavación, retiro y disposición final de materiales provenientes de la remoción en masa insitu.

- ✓ Se realizaron actividades de demolición de estructuras que se encontraban en zonas críticas y en muy mal estado, previniendo las futuras catástrofes que puedan presentarse en la zona.

- ✓ Se realizan actividades de conformación del terreno afectado, mejoramiento en la pendiente y geometría del talud debido a las condiciones actuales de la localidad y que generan superficies de falla. Adicionalmente se realizan labores de perfilado en los taludes proporcionando mayor estabilidad al terreno, aumento de tensiones y resistencia en la parte baja del talud que con su peso propio y aumento en el coeficiente de fricción mitigan los efectos de la gravedad y daños generados por agentes externos.

Registro fotográfico









Limpieza de material proveniente de los deslizamientos









Limpieza de cause, y conformación de batea para el paso vehicular









Perfilado de taludes con presencia de movimiento de masa









Perfilado y movimiento de tierra en talud saturados









Limpieza de vía y conformación de banca principal de surata a mohan









Conformación y compactación de calzada en zonas intervenidas









Se realizan actividades de remoción de material provenientes de los deslizamientos presentados en la zona, Se realiza la conformación de la Vía en las zonas intervenidas









Se realiza la conformación de la Vía antes y después de la cañada intervenida



Compactación de rasante

B. CENTRO ABASTOS

- ✓ Se identifico el punto crítico y zona a intervenir en el cauce del Rio de Oro el cual con el pasar del tiempo fue erosionando y socavando un muro de gaviones existentes, por lo cual se realizará la intervención con maquinaria pesada para la recuperación de la margen derecha aguas abajo.

- ✓ Se realizo el corte de material granular del sector.

- ✓ Se ejecutó el movimiento de material para la acumulación en la margen derecha y crear un aislamiento de protección contra las crecientes del rio.

- ✓ Se realizan actividades de conformación del Jarillón ejecutado.

Registro fotográfico











Canalización del cause del rio de oro en el sector de centro abastos









Conformación de material para la protección del muro lateral existente









Excavación y dragado del cauce del rio









Conformación de barrera de protección para muro de gavión existente







Transporte de material y conformación de barrera de protección

C. CAV - FLORIDABLANCA

- ✓ Se ejecutaron actividades con maquinaria pesada y vehículos de carga para excavación, retiro y disposición final de materiales provenientes de la remoción en masa insitu.

- ✓ Se realizo la remoción de material proveniente de los deslizamientos, de igual forma las actividades de reconformación y limpieza en la vía de acceso y retiro de material sobrante.

- ✓ Se realizo el mejoramiento de la calzada en las zonas afectadas por los deslizamientos de los taludes laterales de la vía.

- ✓ Se realizo el corte del material no consolidado de las calzadas afectadas por la erosión.

REGISTRO FOTOGRAFICO





Transporte











Retiro de material sobrante proveniente de los derrumbes y deslizamientos









Conformación de calzada y compactación de la rasante.

C. QUEBRADA MENZUNLY - PIEDECUESTA

- ✓ Se ejecutaron actividades de reconformación y limpieza de cauces. Se realiza el retiro de piedras de gran tamaño y material que se ha resumido aguas debajo
- ✓ Se procede a reconformar la barrera lateral utilizando estos materiales
- ✓ Realizar la ampliación del cauce, y evitar acumulación de rocas de gran tamaño
- ✓ Aumentar la capacidad hidráulica de la Quebrada Mensuli en la zona intervenida







Transporte de maquinaria a zona de intervención









Trabajos en el cauce de rio para recuperación de área y aumento de capacidad hidráulica









Limpieza y remoción de material rocoso de gran dimensión





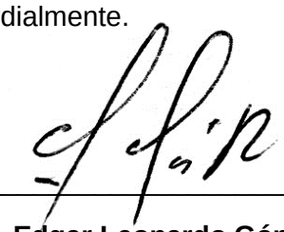


Retro de material sobrante de la limpieza

11. CONCLUSIONES

- Se realizo la intervención en el municipio de Surata, Floridablanca, Bucaramanga y Piedecuesta
- Se realizo la remoción de material sobrante productos de los deslizamientos en los diferentes corregimientos del municipio de Surata.
- Se realizo la conformación y compactación de la calzada en diferentes sectores donde se identificaron afectaciones por deslizamientos o perdida parcial de la banca.
- Se a realizado un trabajo mancomunado con la comunidad y la alcaldía municipal del Surata.
- Se realizo el retiro de material proveniente de los deslizamientos encontrados en la via de acceso a el CAV Flora y Fauna CDMB
- Se conformo la banca en los puntos que presentaban erosión y acumulación de material suelto.
- Se realizo la protección en material granular de la zona, en borde del rio de oro en el sector ded Centro Abastos protegiendo el talud afectado por la socavación del rio.

Cordialmente.



Ing. Edgar Leonardo Gómez Roncancio
Representante Legal