

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS PROFESIONAL

**ANÁLISIS GEOLÓGICO - GEOTÉCNICO EN LOS TALUDES DE LA
CARRETERA CHOROPAMPA - MAGDALENA**

Para optar El Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Presentado Por:

BACH. NORA MELISSA ARTEAGA FERNÁNDEZ

Asesor:

ING. ROBERTO SEVERINO GONZALES YANA

Cajamarca - Perú

2017

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida, por guiar mi camino día a día y por darme fuerzas para seguir luchando por mis metas y sueños.

A mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, a la Facultad de Ingeniería y en especial a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica, y a todos mis docentes, por brindarme todas las enseñanzas necesarias para mi desarrollo profesional.

A mi asesor de tesis, el Ing. Roberto Gonzales Yana, quien, con sus conocimientos, su tiempo, su orientación y recomendaciones, hizo posible la culminación de esta tesis.

A mis padres, por sus inagotables esfuerzos para ayudarme a alcanzar mis metas, a mi tía Catalina por sus consejos y apoyo incondicional, a mi tía Vilma, mi tía Esperanza, Alicia y Melanie, quienes siempre me alentaron a seguir adelante; gracias por ser una inspiración para mí.

A mis amigas y amigos, quienes siempre persiguen incansablemente sus metas y sueños, que de una u otra manera influyeron en el desarrollo de esta tesis, y que con sus palabras y acciones me apoyan en este arduo camino.

DEDICATORIA

A mis padres, Ana María y José Cruz, quienes me brindan su tiempo y apoyo sin importar las circunstancias, y enfrentan día a día las adversidades de la vida para seguir prosperando; gracias por ser mi motivación y ejemplo a seguir.

CONTENIDO	Pág.
CONTENIDO	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	x
RESUMEN	xii
ABSTRAC	xiii
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO	3
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.2 BASES TEÓRICAS	4
2.2.1 ESTABILIDAD DE TALUDES	4
2.2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD	6
2.2.3 MECANISMOS DE FALLA	8
2.2.4 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	13
2.2.5 EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK-BROWN	14
2.2.6 CRITERIO DE MOHR-COULOMB	18
2.2.7 DESLIZAMIENTOS	19
2.2.8 SISMICIDAD	21
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	23
CAPÍTULO III	25
MATERIALES Y MÉTODOS	25
3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
3.1.1 GEOGRÁFICA	25
3.1.2 POLÍTICA	25
3.1.3 ACCESIBILIDAD	25
3.1.4 CLIMA	26

	Pág.
3.1.5	HIDROLOGÍA..... 26
3.2	PROCEDIMIENTOS 28
3.2.1	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 28
3.2.2	DEFINICIÓN DE VARIABLES 29
3.2.3	TÉCNICAS 29
3.2.4	INSTRUMENTOS Y EQUIPOS 30
3.3	ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..... 30
3.4	ESTRATIGRAFÍA 30
3.4.1	GRUPO CRISNEJAS 30
3.4.2	GRUPO PULLUICANA..... 32
3.4.3	SILL DIORÍTICO (Nm-di)..... 32
3.4.4	DEPÓSITOS CUATERNARIOS 33
3.5	PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS ... 35
3.5.1	GEOMECÁNICA DE LAS UNIDADES CRETÁNICAS 35
3.5.2	GEOMECÁNICA DE LOS DEPÓSITOS CUATERNARIOS 36
3.6	GEOTECNIA 38
3.6.1	TALUD 01 38
3.6.2	TALUD 02 39
3.6.3	TALUD 03 41
3.6.4	TALUD 04 42
3.6.5	TALUD 05 43
3.6.6	TALUD 06 44
3.6.7	TALUD 07 45
3.6.8	TALUD 08 46
3.6.9	TALUD 09 47
3.6.10	TALUD 10 48
3.6.11	TALUD 11 49
3.6.12	TALUD 12 50
3.6.13	TALUD 13 51
3.6.14	TALUD 14 52
3.6.15	TALUD 15 54

	Pág.
CAPÍTULO IV	55
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
4.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	55
4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
4.2.1 INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS EN LA INESTABILIDAD	57
4.2.2 ZONIFICACIÓN DE ESTABILIDAD SEGÚN EL FACTOR DE SEGURIDAD	60
4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS	61
 CAPÍTULO V.....	 62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
5.1 CONCLUSIONES	62
5.2 RECOMENDACIONES	62
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 64
 ANEXOS	 66
A. RESULTADO DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5.0	66
B. RESULTADO DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7.0	66
C. PLANOS.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Tabla de Clasificación SUCS (Braja, M. 2001)	14
Tabla 2: Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en el entramamiento y las condiciones de las juntas. (Hoek, E. 2006)	16
Tabla 3: Estimación del GSI para macizos heterogéneos como Flysch. (Hoek, E. 2006)..	17
Tabla 4: Variables de sismicidad para obtener las componentes sísmicas horizontales y verticales. (LoadCap, 2014).....	22
Tabla 5: Coordenadas UTM: DATUM WGS84 de los límites de la carretera.....	25
Tabla 6: Vía de acceso al tramo de estudio.....	26
Tabla 7: Definición de variables.....	29
Tabla 8: Propiedades geomecánicas de la Formación Chúlec.....	35
Tabla 9: Propiedades geomecánicas de la Formación Pariatambo.....	36
Tabla 10: Propiedades geomecánicas del Grupo Pullucana.....	36
Tabla 11: Propiedades geomecánicas de los depósitos aluviales.....	37
Tabla 12: Propiedades geomecánicas de los depósitos deluviales.....	37
Tabla 13: Propiedades geomecánicas de los depósitos coluvio-aluviales (Suelos GC>MH)	37
Tabla 14: Propiedades geomecánicas de los depósitos coluvio-aluviales (Suelos GC>CL)...	37
Tabla 15: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 01.....	38
Tabla 16: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 02.....	39
Tabla 17: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 03.....	41
Tabla 18: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 04.....	42
Tabla 19: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 05.....	43
Tabla 20: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 06.....	44
Tabla 21: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 07.....	45
Tabla 22: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 08.....	46
Tabla 23: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 09.....	47
Tabla 24: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 10.....	48
Tabla 25: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 11.....	49
Tabla 26: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 12.....	50

	Pág.
Tabla 27: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 13.	51
Tabla 28: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 14.	52
Tabla 29: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 15.	54
Tabla 30: Resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados (Talud 1-11).56	56
Tabla 31: Resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados (Talud 12-15)..	57
Tabla 32: Zonificación del área de estudio según los factores de seguridad.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico que muestra los diferentes métodos de cálculo. (Herrera, F. 2003)	6
Figura 2: Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos. (González de Vallejo L. et. al., 2004).....	7
Figura 3: Equilibrio o desequilibrio de fuerzas en un talud. (Suarez, J. 2009)	9
Figura 4: El efecto de deterioro. (Suarez, J. 2009).....	9
Figura 5: Evolución de un deslizamiento en la roca fracturada al profundizarse en un cauce por erosión permanente. (Suarez, J. 2009)	11
Figura 6: Inicio de una falla progresiva. (Suarez, J. 2009)	12
Figura 7: Esquema de la generación de una falla progresiva en suelos que pierden resistencia al deformarse (Suarez, J. 2009)	13
Figura 8: Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Melentijevic, S. 2005)	19
Figura 9: Caídos de bloques en caída libre de roca fracturada. (Suarez, J. 2009)	20
Figura 10: Desplazamiento de rotación en una ladera. (Suarez, J. 2009)	20
Figura 11: Flujo de bloques de roca y residuos en la excavación de un “talud” para la construcción de una vía. (Suarez, J. 2009)	21
Figura 12: Zonas sísmicas en el Perú y Cajamarca. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)	22
Figura 13: Cauce del río Magdalena, en donde se observa depósitos fluviales constituidos por clastos polimícticos redondeados, su tamaño varía desde arcilla hasta gravas.	26
Figura 14: Quebrada Tallal, ubicada en las coordenadas N: 9195004 y E: 769650	27

	Pág.
Figura 15: Vista de la quebrada de Lucma, que atraviesa la carretera en el Km 126+250 Coordenadas N: 9194269 y E: 767089	27
Figura 16: Quebrada El Mirme, se observa derrumbes en los márgenes, ubicada en las coordenadas N: 9195720 y E: 761792.....	28
Figura 17: Estratos de calizas de la Formación Chúlec, en contacto con un cuerpo intrusivo.	31
Figura 18: Estratos de calizas bituminosas intercaladas con lutitas de la Formación Pariatambo.	31
Figura 19: Estratos de calizas mudstone del Grupo Pulluicana.	32
Figura 20: Sill de composición diorítica, intruyendo lateralmente dos capas de rocas sedimentarias.	32
Figura 21: Depósitos aluviales, conformados por suelos gravo-arcillosos y arcillas de alta plasticidad, cercanos a la Quebrada de Lucma.	33
Figura 22: Depósitos coluvio-aluviales compuestos por arcillas y limos de alta plasticidad, y gravas arcillosas. Ubicado en el Km 123+950.	33
Figura 23: Depósitos deluviales en las laderas de los cerros, conformado por materiales erosionados que no han sido transportados.	34
Figura 24: Depósitos fluviales de la quebrada de Lucma, compuesto por gravas, limos y arcillas.....	34
Figura 25: Talud 01, constituido por depósitos cuaternarios.	38
Figura 26: Talud 02, constituidos por calizas de la Formación Pariatambo, se observan bloques rocosos muy inestables.....	39
Figura 27: Análisis en el software Dips v6.0 del talud 02.	40
Figura 28: Talud 03, compuesto por depósitos coluvio-aluviales que presentan bloques sub- angulosos y limos arcillosos.	41
Figura 29: Talud 04, constituido por depósitos aluviales, se puede observar una buena clasificación de los clastos.....	42
Figura 30: Talud 05, constituido por depósitos coluvio-aluviales.	43
Figura 31: Talud 06, constituido por depósitos aluviales, que tienen alto contenido de finos.	44
Figura 32: Talud 07, constituido por depósitos aluviales.....	45
Figura 33: Talud 08, compuesto por depósitos coluvio-aluviales.....	46
Figura 34: Talud 09, constituido por depósitos aluviales.....	47

	Pág.
Figura 35: Talud 10, compuesto por depósitos coluvio-aluviales principalmente.....	48
Figura 36: Talud 11, constituidos por depósitos coluvio-aluviales.....	49
Figura 37: Talud 12, constituido por calizas de la Formación Pariatambo, altamente meteorizadas.	50
Figura 38: Talud 13, constituido por depósitos aluviales.....	51
Figura 39: Talud 14, constituido por calizas del Grupo Pulluicana.	52
Figura 40: Análisis en el software Dips v6.0 del talud 14.	53
Figura 41: Talud 15, formado por depósitos aluviales inestables.....	54
Figura 42: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones normales.	58
Figura 43: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones de saturación...	59
Figura 44: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones de sismicidad. .	60

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

a	: Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
al	: Aluvial
c	: Cohesión
chu	: Chúlec (Formación)
CL	: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media
co	: Coluvial
co/al	: Coluvio-Aluvial
D	: Factor de disturbación del macizo rocoso
Dn	: Discontinuidad n
de	: Deluvial
E	: Este
E	: Módulo de Young o Módulo de Elasticidad
Ei	: Módulo de Young de la roca intacta
Erm	: Modulo de deformación del macizo rocoso
fl	: Fluvial
FS	: Factor de Seguridad
GC	: Gravas Arcillosas
GSI	: Índice de Resistencia Geológica
Kh	: Amplificación Estratigráfica (Sismicidad)
Ki	: Cretáceo Inferior
Km	: Kilometro
Ks	: Cretáceo Superior
Kv	: Parametros de Zona (Sismicidad)
m³	: Metro cúbico
m_b	: Valor reducido de la constante del material m _i
m_i	: Parámetro de la roca intacta obtenido de ensayos triaxiales
MH	: Limos inorgánicos de alta plasticidad.
ML	: Limos inorgánicos de plasticidad baja.
MN	: Meganewton
MPa	: Megapascales
N	: Newton
N	: Norte

NE : Noreste
Nm : Neógeno-Mioceno
p : Pulluicana (Grupo)
pa : Pariatambo (Formación)
Qh : Cuaternario-holoceno
s : Constante que depende de las propiedades del macizo rocoso
S : Sur
sigc : Resistencia a la compresión uniaxial del macizo rocoso
sigcm : Resistencia global del macizo rocoso
sigt : Fuerza de tensión del macizo rocoso
SP : Arenas mal graduadas, arenas con grava
SUCS : Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
SW : Suroeste
 σ'_1 : Tensión efectiva principal mayor en el momento de la rotura
 σ'_3 : Tensión efectiva principal menor en el momento de la rotura
 σ_{ci} : Resistencia a la compresión uniaxial de los bloques de roca
 ϕ : Ángulo de fricción
 τ : Tensión tangencial
UTM : Universal Transversal de Mercator
W : Oeste
WGS84: World Geodetic System 1984
 γ : Peso específico

RESUMEN

Los taludes de la carretera Choropamapa - Magdalena, están constituidos por depósitos cuaternarios aluviales, deluviales y coluvio-aluviales, las Formaciones Chúlec, Pariatambo, Grupo Pulluicana e intrusivos dioríticos que, junto a procesos de meteorización y condiciones climáticas, la inestabilidad de los taludes incrementa; siendo mayor el riesgo en periodos de lluvias intensas. Esta investigación analiza el comportamiento geológico - geotécnico en los taludes de la carretera, y cómo influye en su inestabilidad; para ello, se identificaron características litológicas, físicas, geomecánicas de los materiales que conforman los taludes, y factores condicionantes, localizando con ello las zonas críticas de inestabilidad que son susceptibles a deslizamientos. Se estudiaron 15 taludes, que fueron analizados con el Software Slide v7.0 (Método de Equilibrio Límite), utilizando los factores geológicos de cada talud, para la determinación de los parámetros geomecánicos de las unidades geológicas, mediante el análisis en el Software RocData v5.0. El Criterio de Mohr-Coulomb fue utilizado para los taludes de suelos y el Criterio Generalizado de Hoek-Brown para los taludes de roca. Con todos estos datos se obtuvieron los factores de seguridad en los taludes, en condiciones normales, de saturación de los materiales y sismicidad; como resultado se obtuvo la zonificación de la carretera en tramos con inestabilidad absoluta, inestabilidad relativa, estabilidad relativa, estabilidad temporal y estabilidad permanente. El tramo más inestable de la carretera está en el Km 116+500 al Km 118+000, donde los taludes tienen el más bajo factor de seguridad.

Palabras claves: Depósitos Cuaternarios, Análisis de Estabilidad, Factor de Seguridad, Método de Equilibrio Limite.

ABSTRAC

The slopes of the Choropamapa - Magdalena road, are constituted by alluvial, deluvial and coluvial-alluvial Quaternary deposits, the Chúlec Formation, Pariatambo Formation, Pulluicana Group and dioritic intrusive that, together with weathering processes and climatic conditions, the instability of the slopes increases; being greater the risk in periods of intense rains. This research analyzes the geological - geotechnical behavior in the slopes of the road, and how it influences its instability; for this purpose, lithological, physical and geomechanical characteristics of the materials that make up the slopes and conditioning factors were identified, locating with it critical areas of instability that are susceptible to landslides. Fifteen slopes were analyzed, with Software Slide v7.0 (Limit Equilibrium Method), using the geological factors of each slope, for the determination of the geomechanical parameters of the geological units, through the analysis in the software RocData v5 .0. The Mohr-Coulomb Criterion was used for ground slopes and the Hoek-Brown Generalized Criterion for rock slopes. With all these data, the safety factors were obtained in the slopes, under normal conditions, of saturation of the materials and seismicity; as result, the road zoning was obtained in sections with absolute instability, relative instability, relative stability, temporal stability and permanent stability. The most unstable stretch of road is at Km 116 + 500 to Km 118 + 000, where the slopes have the lowest safety factor.

Keywords: Quaternary Deposits, Stability Analysis, Safety Factor, Limit Equilibrium Method.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de taludes en carretas es un problema que ocurre frecuentemente en el Perú, provocando deslizamientos que afecta principalmente a la vida humana, y que causa pérdidas económicas cuantiosas. Por ello evaluar sus condiciones actuales es importante para identificar futuros problemas e implementar medidas de prevención.

El tramo Choropamapa a Magdalena forma parte de la carretera principal Cajamarca-Ciudad de Dios, donde los taludes están constituidos por rocas sedimentarias calcáreas, con discontinuidades que afectan la estabilidad de los taludes de roca, y los depósitos cuaternarios inestabilidad de suelos. Los procesos de meteorización, condiciones climáticas, sísmicas y vibraciones por desplazamientos de vehículos, afectan la estabilidad de los taludes, los cuales son propensos al deslizamiento; siendo mayor el riesgo en periodos de lluvias intensas.

Es por ello que realizar un análisis geológico y geotécnico, es importante para identificar las zonas críticas en las que podrían ocurrir deslizamientos de rocas y suelos, y proponer medidas de prevención que eviten accidentes futuros.

En esta investigación se formula la siguiente pregunta: ¿Cómo intervienen los factores geológicos y geotécnicos en la inestabilidad de taludes de la carretera Choropampa - Magdalena? Se plantea como hipótesis que los factores geológicos, geotécnicos y el factor de seguridad influyen en la inestabilidad de taludes en la carretera Choropampa - Magdalena en el tramo desde el Km 115 al Km 127.

Durante el desarrollo de la investigación se va a estudiar y analizar la estabilidad de taludes, identificando las características físicas y mecánicas de los materiales que conforman los taludes de la carretera de Choropampa-Magdalena y los factores condicionantes, localizando con ello las zonas críticas en donde podría ocurrir algún deslizamiento que perjudique a la población y evitar accidentes, y daños a la infraestructura, proporcionando información para

la implementación de medidas de prevención o control, que reduzca el riesgo de futuros deslizamientos. Y con ello dando a conocer la importancia del análisis de estabilidad de taludes en las carreteras que comunican a la ciudad de Cajamarca con otras poblaciones. También proveerá información para investigaciones futuras de la zona estudiada.

El objetivo general de la investigación es analizar el comportamiento de los factores geológicos - geotécnicos que intervienen en la inestabilidad de los taludes de la carretera Choropampa - Magdalena; y como objetivos específicos: realizar el cartografiado geológico en el tramo de la carretera, describir las características físicas y mecánicas de los taludes, zonificar los taludes inestables que son susceptibles a deslizamientos en la carretera y calcular el factor de seguridad con el software Slide v6.

El contenido de los capítulos se describe a continuación:

Capítulo I: En este capítulo se desarrolla la introducción del tema de investigación, con el planteamiento y la formulación del problema. Se establecen los objetivos, se indica la justificación y la hipótesis; y se determinan los alcances y limitaciones de la investigación.

Capítulo II: En este capítulo se desarrolla el marco teórico de la investigación, mencionando antecedentes y bases teóricas de diferentes autores, relacionados con el tema geotécnico que sustenta la investigación.

Capítulo III: Se especifica la ubicación del área de estudio, la accesibilidad, el clima, y otros aspectos generales. Se describe la geología, geomorfología e hidrología, a partir de los datos recolectados en campo, son ordenados en estaciones para su análisis mediante los softwares RocData, Dips, Slide. También se explica la metodología y procedimientos utilizados en la investigación.

Capítulo IV: Se presentan y explican los resultados obtenidos del análisis de los datos de campo, de acuerdo a los objetivos establecidos y se realiza la contratación de la hipótesis.

Capítulo V: Se presentan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones correspondientes.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

Las investigaciones Geológica y Geotécnica, realizadas son las siguientes:

Sáenz E. (2015). Realizó un estudio en el tramo de la Carretera El Gavilán - Chigden, donde analizó la relación que tenían las características litológicas, morfológicas y estructurales y como intervenían en la inestabilidad de taludes de dicha carretera.

Torres W. (2015). Realizó una Evaluación Geotécnica de los Deslizamientos en Taludes de la Carretera Peña Blanca - Choropampa, donde analizó el comportamiento geotécnico - geomecánico de los deslizamientos a lo largo de la carretera teniendo en cuenta las características litomorfoestructurales de los taludes.

Montoya F. (2014). Realizó una Evaluación Geotécnica de los Taludes de la Carretera Cruz Blanca - El Gavilán, donde analizó la inestabilidad de los taludes tomando en cuenta el contexto geológico local, regional y la estrecha relación que existe con los agentes geodinámicos.

Vilchez & Guerrero (2006). Realizaron un informe preliminar del inventario y cartografiado sistemático de Peligros Geológicos en la cuenca Jequetepeque, identificando las ocurrencias de movimientos en masa, evaluación de centros poblados y obras de infraestructura vulnerables a los peligros geológicos y la identificación de zonas críticas.

Zavala & Rosado (2011). Realizaron un estudio de riegos en la región de Cajamarca, donde se analizaron las características climáticas, geológicas y sísmicas que conllevan a la ocurrencia de procesos geodinámicos y determinaron 117 zonas de peligrosidad y susceptibilidad en la región Cajamarca.

Reyes (1980). Realizó un estudio que corresponde a los Cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos, Cajabamba. Analiza regionalmente el área de estudio, realizando un cartografiado a escala 1:100,000 en base a un estudio litológico, estratigráfico, estructural, geomorfológico en forma general.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 ESTABILIDAD DE TALUDES

Los análisis de estabilidad se aplican al diseño de taludes o cuando éstos presentan problemas de inestabilidad. Se debe elegir un coeficiente de seguridad adecuado, dependiendo de la excavación y del carácter temporal y definitivo del talud, combinando los aspectos de seguridad, costes de ejecución, consecuencias o riesgos que podría causar su rotura, etc. Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0, dependiendo de la seguridad exigida y de la confianza que se tenga en los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para los taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1,3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores.

Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas externas que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos.

Los análisis a posteriori de taludes se realizan una vez que la rotura se ha producido, y, por tanto, se conoce el mecanismo, modelo y geometría de la inestabilidad. Es un análisis muy útil para la caracterización geomecánica de los materiales involucrados, para el estudio de los factores influyentes en la rotura y para conocer el comportamiento mecánico de los materiales del talud; los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otros taludes de similares características. Estos análisis consisten en determinar, a partir de los datos de campo necesarios (geometría, tipos de materiales, modelos de rotura, presiones hidrostáticas, etc.), los parámetros resistentes del terreno, generalmente pares de valores c y ϕ , que cumplen la condición de equilibrio estricto del talud (es decir, $F=1,0$), a lo largo de la superficie de rotura, para las condiciones reales en que esta tuvo lugar. (González de Vallejo L., Ferrer M., Ortuño L., Oteo C. 2004)

Métodos de Equilibrio Límite

Se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno. Suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte. (Herrera, F. 2003)

Se pueden clasificar a su vez en dos grupos: métodos exactos y métodos no exactos.

Métodos exactos: La aplicación de las leyes de la estática proporcionan una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

Métodos no exactos: En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales.

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop Riguroso.

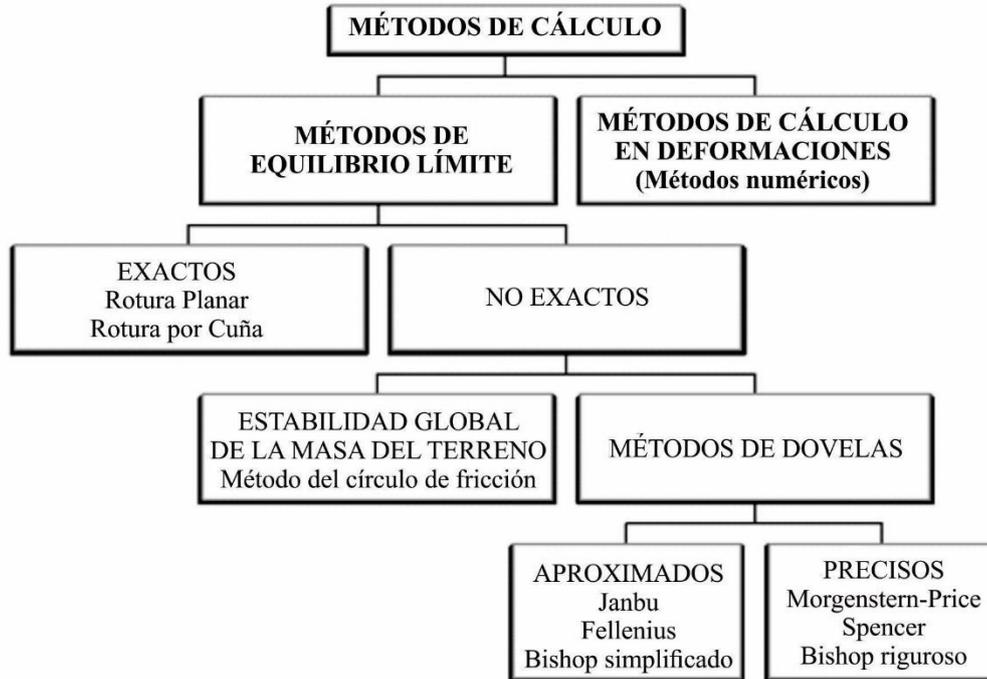


Figura 1: Gráfico que muestra los diferentes métodos de cálculo. (Herrera, F. 2003)

2.2.2 FACTORES INFLUYENTES EN LA ESTABILIDAD

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos o relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). La condición de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca. La posibilidad de rotura y los mecanismos y modelos de inestabilidad de los taludes están controlados principalmente por factores geológicos y geométricos.

Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales. En los suelos la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. En el caso de macizos rocosos competentes el principal factor condicionante es la estructura geológica: la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturación; en materiales blandos, la litología y el grado de fracturación juegan también un papel preponderante.

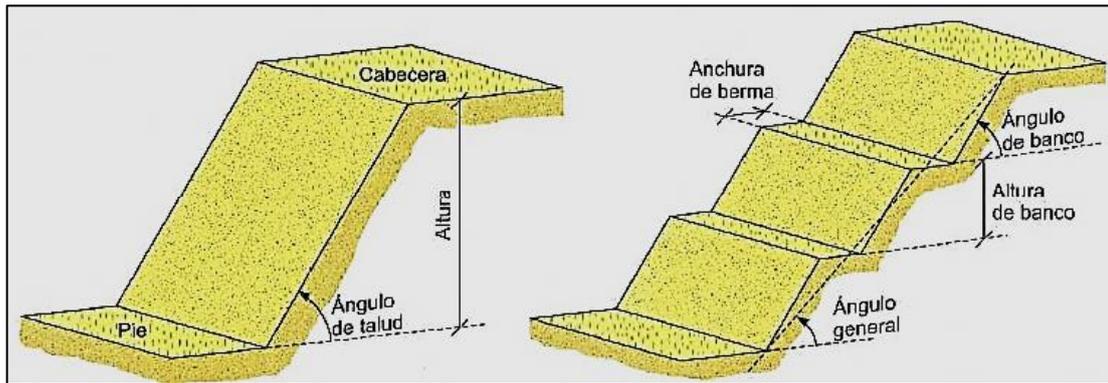


Figura 2: Talud con ángulo uniforme y talud excavado de forma escalonada con bermas y bancos.
(González de Vallejo L. et. al., 2004)

Junto a los factores condicionantes de la estabilidad de los taludes (también denominados pasivos), los factores desencadenantes o activos provocan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones. Estos últimos son factores externos que actúan sobre los suelos o macizos rocosos, modificando sus características y propiedades y las condiciones de equilibrio del talud. El conocimiento de todos ellos permitirá un correcto análisis del talud, la evaluación del estado de estabilidad del mismo y, en su caso, el diseño de las medidas que deberán ser adoptadas para evitar o estabilizar los movimientos. (González de Vallejo L. et. al., 2004).

Otros Factores

Las sobrecargas estáticas y las cargas dinámicas que se ejercen sobre los taludes modifican la distribución de las fuerzas y pueden generar condiciones de inestabilidad. Entre las primeras están el peso de estructuras o edificios, u otro tipo de cargas como rellenos, escombreras, paso de vehículos pesados, etc. que, cuando se ejercen sobre la cabecera de los taludes, aportan una carga adicional que puede contribuir al aumento de las fuerzas desestabilizadoras.

Las cargas dinámicas se deben, principalmente, a los movimientos sísmicos, naturales o inducidos, y a las vibraciones producidas por voladuras cercanas al talud. El principal efecto en los macizos rocosos fracturados es la apertura de las discontinuidades preexistentes, con la consiguiente reducción de su resistencia al corte, y la individualización y caída de bloques rocosos.

Las precipitaciones y el régimen climático influyen en la estabilidad de los taludes al modificar el contenido de agua en el terreno. La alternancia de periodos de sequía y lluvia produce cambios en la estructura de los suelos que dan lugar a pérdidas de resistencia.

En determinados tipos de suelo o macizos rocosos blandos, los procesos de meteorización juegan un papel importante en la reducción de sus propiedades resistentes, dando lugar a una alteración y degradación intensas al ser expuestos los materiales a las condiciones ambientales como consecuencia de una excavación. Esta pérdida de resistencia puede dar lugar a la caída del material superficial y, si afecta a zonas críticas del talud, como su pie, puede generar roturas generales, sobre todo en condiciones de presencia de agua. (González de Vallejo L. et. al., 2004).

2.2.3 MECANISMOS DE FALLA

La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores, en el espacio y en el tiempo.

Condiciones Originales del Talud (Susceptibilidad)

Todo talud tiene unas propiedades o características físicas como son el relieve, geología, propiedades mecánicas de los materiales y perfiles, condiciones ambientales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento. (Suarez, J. 2009)

Equilibrio o Desequilibrio de Fuerzas (Factor de seguridad)

En un talud estable hay un equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. En la figura 3, se muestran las masas que tratan de producir el movimiento y las masas que tratan de contrarrestarla.

Si se colocan cargas adicionales en la parte superior del talud o se remueven en el pie, se puede producir la inestabilidad de éste. Igualmente, la inestabilidad puede ocurrir por el aumento de la pendiente del talud. (Suarez, J. 2009)

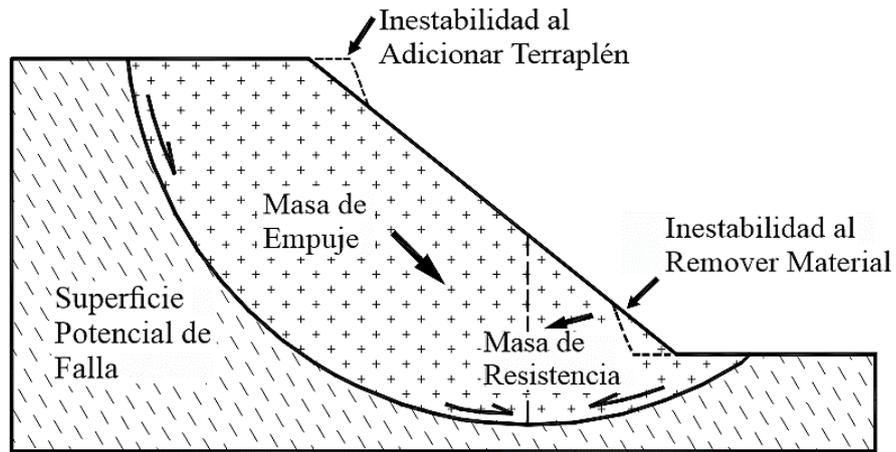


Figura 3: Equilibrio o desequilibrio de fuerzas en un talud. (Suarez, J. 2009)

El Deterioro (Modificación de las condiciones originales)

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Esto incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. Los efectos del deterioro pueden ser lentos o rápidos y se acumulan hasta producir la falla en forma progresiva.

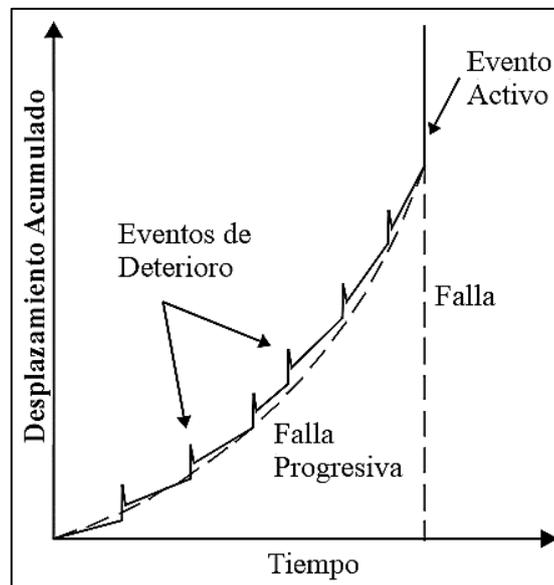


Figura 4: El efecto de deterioro. (Suarez, J. 2009)

Cuando se corta un talud, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado. La iniciación y

propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud.

El resultado del deterioro es una disminución en la resistencia al cortante del material, falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc. Igualmente se puede producir descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, erosión interna o sifonamiento. El deterioro, con el tiempo, da lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. (Suarez, J. 2009)

Factores Detonantes (Activación del movimiento)

En el fenómeno de detonación o activación de un deslizamiento, actúa una serie compleja de procesos, los cuales, ocasionalmente, se traslapan con los factores de deterioro. Los deslizamientos pueden activarse en forma instantánea o en forma progresiva. El resultado generalmente es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento. (Suarez, J. 2009)

Los elementos externos más comunes que pueden generar la activación de un deslizamiento son los siguientes:

- Corte del soporte en el pie del talud por acción de la erosión o de actividades humanas, como la construcción de carreteras.
- Lluvias intensas o prolongadas y/o fluctuaciones fuertes del nivel de aguas subterráneas.
- Sismos o vibraciones fuertes.
- Colocación de cargas sobre el talud.
- Combinación de algunos de los elementos anteriores.

Fallamiento

El proceso de fallamiento después de que interviene el factor detonante, por lo general es un fenómeno físico, en el cual las condiciones de esfuerzo y deformación juegan un papel preponderante.

Para el análisis de un deslizamiento o para la determinación de niveles de amenaza y riesgo, es esencial que se tenga claridad sobre los procesos de evolución que generan un deslizamiento, la susceptibilidad, los procesos de deterioro y los factores detonantes, así como el proceso de fallamiento propiamente dicho. (Suarez, J. 2009)

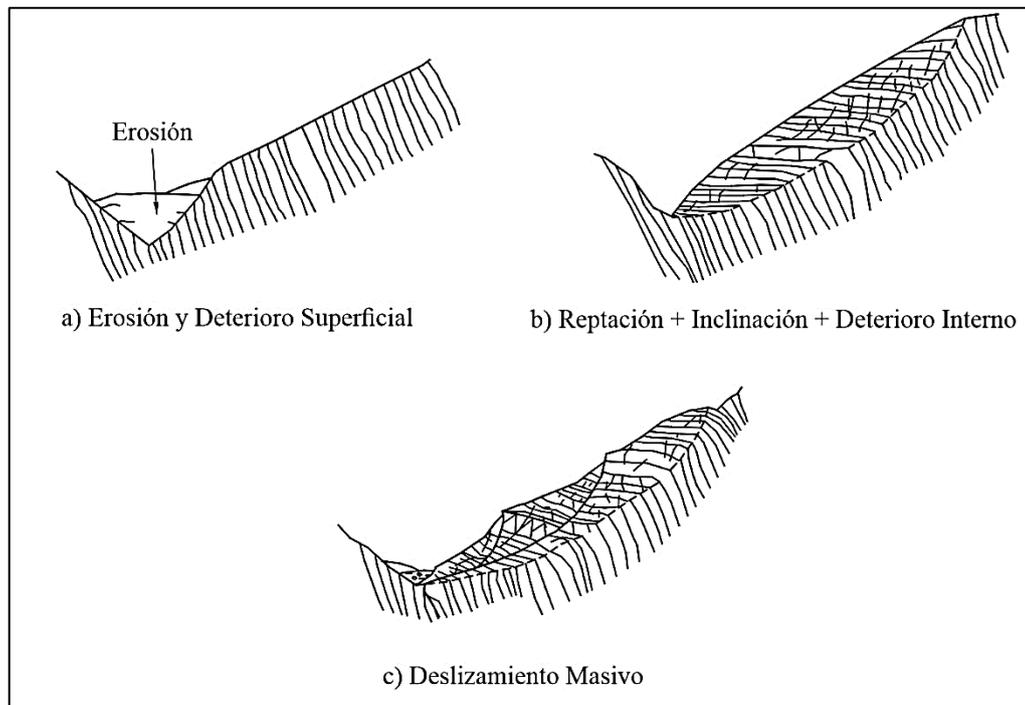


Figura 5: Evolución de un deslizamiento en la roca fracturada al profundizarse en un cauce por erosión permanente. (Suarez, J. 2009)

La Falla Progresiva

Las fallas en la mayoría de los casos no ocurren en forma repentina, sino que se toman un tiempo, el cual puede durar de minutos a años. El proceso se inicia con deformaciones o agrietamientos aislados, relacionados con la concentración de esfuerzos. Estas deformaciones que se producen por la actuación de los esfuerzos, generan a su vez disminuciones en la resistencia.

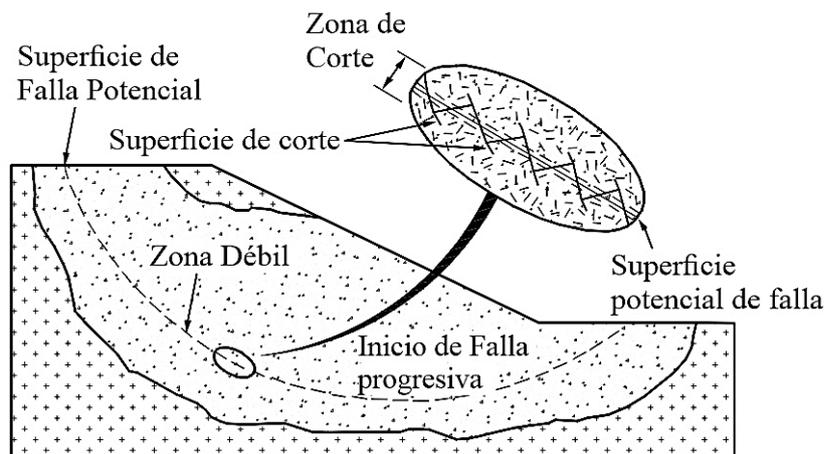


Figura 6: Inicio de una falla progresiva. (Suarez, J. 2009)

Al inicio del movimiento, es muy posible que estas deformaciones progresivas afecten volúmenes aislados del talud, pero a medida que avanza el proceso de fallamiento, las principales deformaciones se concentran en una superficie o banda de falla, a lo largo de la cual se produce la rotura o falla del material (Superficie de falla). Esta superficie de falla con el tiempo va progresando en longitud.

Si la resistencia se moviliza totalmente en cualquier punto de la superficie de falla, el suelo falla localmente. Al fallar el esfuerzo en el punto de falla, se reduce y los esfuerzos se transfieren a los puntos adyacentes, los cuales a su vez tratan de fallar.

En la falla progresiva cuando la resistencia pico es superada en el punto A, la resistencia al corte disponible disminuye de la resistencia pico a la resistencia residual. Los esfuerzos relacionados con la diferencia entre la resistencia pico y la residual del punto A, es transferida a los puntos B. Esto puede ocasionar que los esfuerzos superen la resistencia pico en los puntos B y así sucesivamente, a los puntos C y en la totalidad de la superficie de falla. (Suarez, J. 2009)

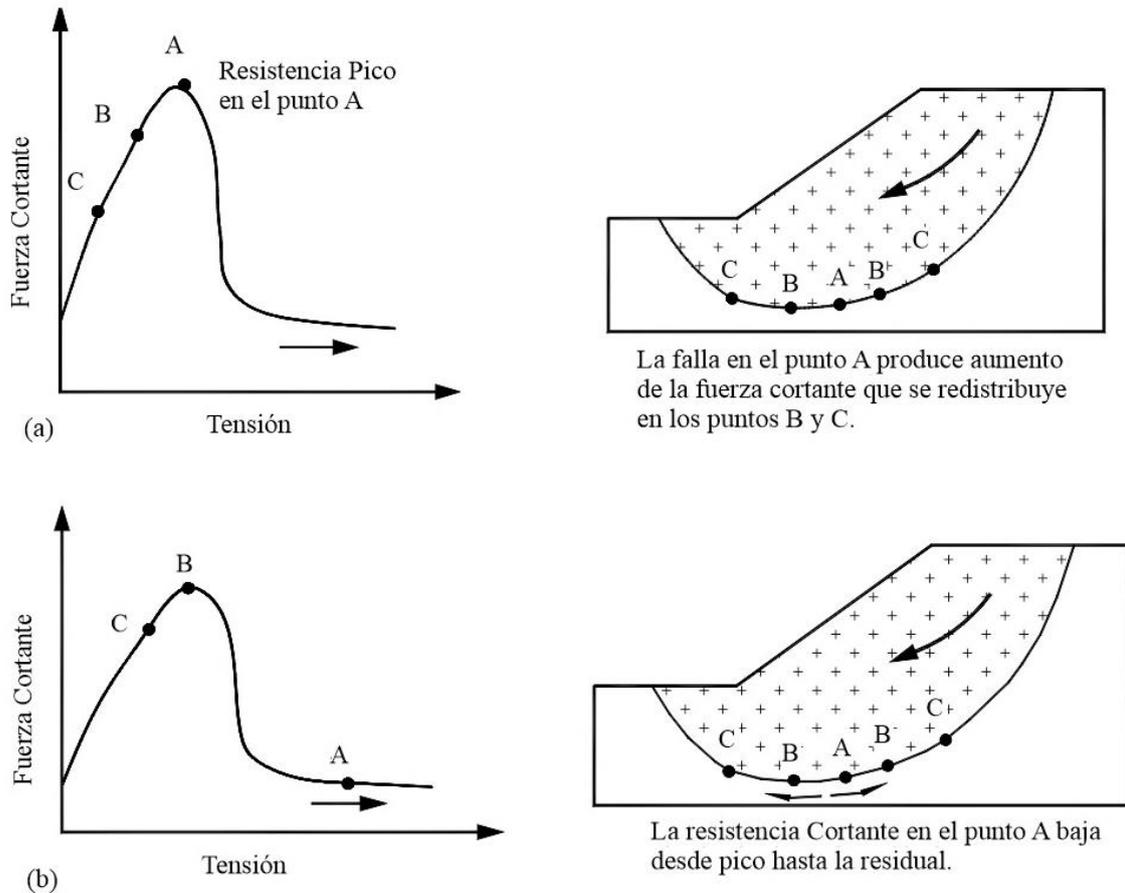


Figura 7: Esquema de la generación de una falla progresiva en suelos que pierden resistencia al deformarse (Suarez, J. 2009)

2.2.4 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos - SUCS (Unified Soil Classification System (USCS)) es un sistema de clasificación de suelos usado en ingeniería y geología para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se representa mediante un símbolo con dos letras. Cada letra es descrita debajo (con la excepción de Pt). Para clasificar el suelo hay que realizar previamente una granulometría del suelo mediante tamizado u otros. También se le denomina clasificación modificada de Casagrande. (Braja, M. 2001)

Tabla 1: Tabla de Clasificación SUCS (Braja, M. 2001)

Divisiones mayores		Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos más del 50% retenido en el tamiz n°200 (0.075 mm)	Grava > 50% de la fracción gruesa retenida en el tamiz n°4 (4.75 mm)	Grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200	GW Grava bien graduada, grava fina a gruesa
			GP Grava pobremente graduada
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	GM Grava limosa
			GC Grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n°4	Arena limpia	SW Arena bien graduada, arena fina a gruesa.
			SP Arena pobremente graduada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	SM Arena limosa
			SC Arena arcillosa
Suelos de grano fino más del 50% pasa el tamiz No.200	Limos y arcillas límite líquido < 50	Inorgánico	ML Limo
			CL arcilla
	Limo y arcilla límite líquido ≥ 50	Orgánico	OL Limo orgánico, arcilla orgánica
		Inorgánico	MH Limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH Arcilla de alta plasticidad
		Orgánico	OH Arcilla orgánica, Limo orgánico
Suelos altamente orgánicos		Pt	Turba

2.2.5 EL CRITERIO DE ROTURA DE HOEK-BROWN

El criterio de rotura de Hoek-Brown es ampliamente aceptado y ha sido aplicado en de proyectos a nivel mundial, sólo debe aplicarse a los macizos rocosos donde la estructura analizada es grande y los bloques son pequeños en comparación y en los que hay un número suficiente de discontinuidades muy próximas entre sí, con características superficiales similares, para asumir al comportamiento de fractura como isotrópico.

El criterio de falla generalizado de Hoek-Brown para macizos rocosos fracturados está definido por:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \times \left(m_b \times \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde σ_1' y σ_3' son los esfuerzos efectivos principales mayor y menor, respectivamente, en la condición de falla, m_b es el valor de la constante m de Hoek-Brown para el macizo rocoso, s y a son constantes que dependen de las características del macizo rocoso y σ_{ci} es la resistencia a la compresión uniaxial de los trozos o bloques de roca intacta que conforman el macizo rocoso. (Hoek & Brown, 2002)

Índice de Resistencia Geológica (GSI: Geological Strength Index)

El GSI estima la reducción de la resistencia del macizo para diferentes condiciones geológicas. El GSI se ha actualizado para macizos débiles en varias ocasiones.

La caracterización del macizo rocoso es simple y está basada en la impresión visual de la estructura rocosa, en términos de bloques y de la condición superficial de las discontinuidades indicadas por la rugosidad y alteración de las juntas. La combinación de estos dos parámetros proporciona una base práctica para describir un rango amplio de tipos de macizos rocosos.

La determinación de los parámetros del GSI se basa en las descripciones de la calidad del macizo rocoso en lugar de formular datos de entrada cuantitativos como en los sistemas RMR, Q y RMi. El GSI es principalmente útil para macizos rocoso más blandos con RMR menor a 20.

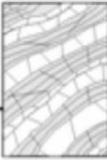
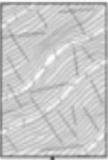
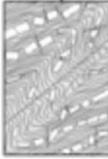
El GSI es utilizado para la estimación de los parámetros de entrada para el cálculo de la resistencia, solo es una relación empírica y los procesos asociados a las clasificaciones de la ingeniería de rocas.

La determinación del GSI se hace a partir de la Tabla 2 y la Tabla 3 a las que se ingresa desde 2 puntos diferentes, uno horizontal: referente al tamaño y entramamiento de bloques, composición y estructura; el ingreso vertical es referente a las condiciones de las discontinuidades, se converge posteriormente en el valor del GSI dispuesto en las líneas diagonales. (Hoek, E. et al., 2002)

Tabla 2: Caracterización del macizo rocoso en función de los bloques basado en el entramamiento y las condiciones de las juntas. (Hoek, E. 2006)

<p>ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA ROCAS FRACTURADAS (Hoek y Marinos, 2000)</p> <p>Estimar el valor promedio del GSI para la litología, estructura y condiciones superficiales de las discontinuidades. No intentar ser muy preciso. Citar un rango de 33 a 37 es más realista que un GSI de 35. Note que las tablas no se aplican a fracturas estructuralmente controladas. Cuando los planos estructurales débiles están en una orientación desfavorable con respecto de la cara excavada, estas dominarán el comportamiento de todo el macizo rocoso. La resistencia de cizalla de las superficies de la roca son propensas a deteriorarse como el resultado en cambios en el contenido de humedad, se reducirá si hay presencia de agua. Cuando se trabaja con rocas en las categorías de débil a muy débil, se debería hacer un desplazamiento hacia la derecha. La presión del agua es tratada con análisis de esfuerzos efectivos.</p>		CONDICIÓN DE LAS DISCONTINUIDADES				
		MUY BUENA Superficies muy rugosas, inalteradas y frescas	BUENA Superficies rugosas, ligeramente intemperizadas, con pátinas de óxidos de hierro	REGULAR Superficies lisas, moderadamente intemperizadas y/o alteradas	MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos compactos o fragmentos angulares	MUY MALA Superficies lisas y cizalladas, muy intemperizadas con revestimientos o rellenos arcillosos blandos
ESTRUCTURA		DECRECEN LAS CONDICIONES SUPERFICIALES →				
 <p>INTACTA O MASIVA. Espécimen de roca intacta o roca in-situ masiva con pocas discontinuidades ampliamente espaciadas. Esp. 100cm</p>	150	90			N/A	N/A
 <p>BLOCOSA. Macizo rocoso inalterado bien trabado, definido por bloques cúbicos formados por 3 familias de discontinuidades. Esp. 30cm</p>	80	80				
 <p>MUY BLOCOSA. Macizo rocoso trabado, parcialmente perturbado, definido por bloques angulares de varias caras formado por 4 o más familias de discontinuidades. Esp. 10cm</p>	40	70	60			
 <p>BLOCOSA/PERTURBADA/DEFORMADA. Plegada, bloques angulares de muchas familias de discontinuidades. Persistencia de los planos de estratificación o esquistosidad. Esp. 3cm</p>	20		50			
 <p>DESINTEGRADA. Pobremente trabada, macizo rocoso muy fracturado con mezcla de fragmentos de rocas angulares y redondeados. Esp. 1cm</p>	5		40		30	
 <p>LAMINADA/CIZALLADA. Ausencia de blocosidad debido a espacios cercanos de débil esquistocidad o planos de cizalla.</p>	2				20	
						10
		N/A	N/A			

Tabla 3: Estimación del GSI para macizos heterogéneos como Flysch. (Hoek, E. 2006)

ÍNDICE DE RESISTENCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA MACIZOS ROCOSOS HETERÓGENOS COMO LOS FLYSCH (V, Marinos, 2007)		CONDICIONES DE LAS SUPERFICIES DE LAS DISCONTINUIDADES									
		MUY BUENA	BUENA	REGULAR	MALA	MUY MALA					
COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA											
 <p>TIPO I: Imperturbado, capas de areniscas de grosos de anchos a medios con lentes finos esporádicos de limolitas. En tuneles superficiales o taludes donde el confinamiento es pobre, el modo de fractura tiene características cinemáticas controladas por los planos de estratificación y el GSI pierde significado.</p>	 <p>TIPO II: Limolitas masivas imperturbadas (los planos de estratificación no son perceptibles) con esporádicas capas finas de areniscas.</p>	80	I	II							
 <p>TIPO III: Areniscas moderadamente perturbadas con delgados estratos de limolitas</p>	 <p>TIPO IV: Macizos rocosos moderadamente perturbados con areniscas y limolitas en similares cantidades</p>	 <p>TIPO V: Limolitas moderadamente perturbadas con intercalaciones de areniscas</p>	 <p>TIPO VI: Limolitas moderadamente perturbadas con esparcidas intercalaciones de areniscas</p>	60	III	IV	V	VI			
						Incremento si las capas de areniscas son mayores a 50cm ↑					
 <p>TIPO VII: Macizos rocosos muy perturbados y plegados, que conservan su estructura con areniscas y limolitas en similar extensión</p>	 <p>TIPO VIII: Macizos rocosos muy perturbados y plegados de intercalaciones de limolitas y areniscas. La estructura se conserva y la deformación-cizalla no es muy fuerte</p>			40	VII	VIII					
 <p>TIPO IX: Macizo rocoso desintegrado que puede ser encontrado en zonas falladas y/o de alta meteorización. Se encuentran principalmente materiales deleznable con algunas limolitas deformables entra las piezas de roca</p>	 <p>TIPO X: Limolitas o lutitas tectónicamente deformadas con intenso plegamiento y fallamiento con capas de areniscas en bloques y deformadas, llegando a formar una estructura caótica</p>			30	IX	X					
 <p>TIPO XI: Limolitas o lutitas fuertemente cizalladas tectónicamente formando una estructura caótica con paquetes de arcilla. Las delgadas capas de areniscas son transformadas a pequeñas piezas de roca. Al extremo, el comportamiento es como un suelo</p>							20	XI			
									10		
										N/A	N/A

→ Disminución a la derecha si hay deformación luego de la perturbación tectónica

2.2.6 CRITERIO DE MOHR-COULOMB

La ventaja del criterio de Mohr-Coulomb es su simplicidad. Sin embargo, presenta los inconvenientes ya descritos para el caso de la matriz rocosa, sobre todo los relacionados con el comportamiento tensión-deformación no lineal de los macizos rocosos, por lo que no es un criterio adecuado para la estimación de su resistencia. No obstante, en determinados casos el criterio puede ser empleado para macizos rocosos resistentes en los que la rotura se produzca a favor de superficies de discontinuidad, teniendo en cuenta que deben adoptarse valores para la cohesión y para el ángulo de rozamiento representativo del macizo rocoso. (Vallejo L. et. al. 2004)

Generalmente para el caso del criterio de Mohr-Coulomb, se define el criterio de rotura en función de la tensión tangencial y la tensión normal en un plano. En este caso la superficie de fluencia es de la forma $\tau = f(\sigma)$ La expresión matemática de dicha ecuación es:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi$$

donde:

- c es la cohesión, una constante que representa la tensión cortante que puede ser resistida sin que haya ninguna tensión normal aplicada.
- ϕ es el ángulo de fricción.
- τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura.
- σ_n es la tensión normal que actúa en el plano de rotura.

A continuación, se representa el criterio de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. Se puede apreciar que la ecuación de la superficie de rotura es la ecuación de la recta tangente a todos los círculos de falla.

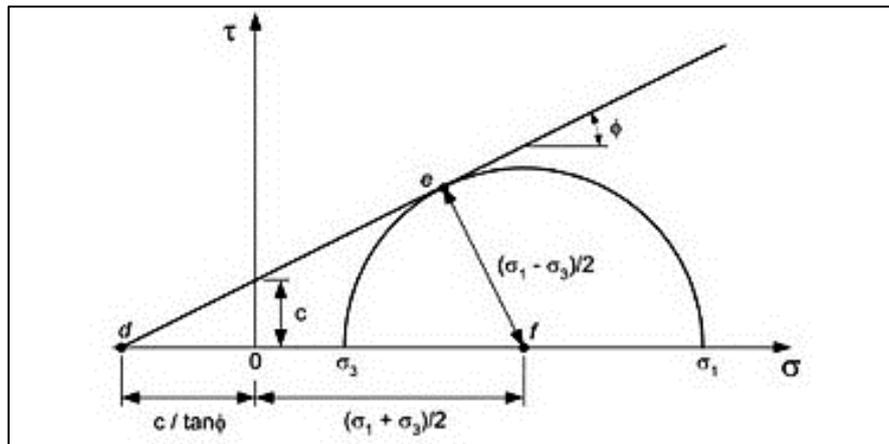


Figura 8: Representación de la envolvente de Mohr-Coulomb en el espacio de tensiones normal y tangencial. (Melentijevic, S. 2005)

En este caso, el dominio elástico viene representado por la envolvente de Mohr. Por lo tanto, los puntos del macizo con estado tensional por debajo de dicha envolvente están en un estado elástico mientras que los que se sitúan encima se encuentran en rotura. La zona de estados tensionales inaccesibles para este macizo es aquella que se encuentra por encima de la envolvente de Mohr. (Melentijevic, S. 2005)

2.2.7 DESLIZAMIENTOS

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 que son producto de la acción de las fuerzas gravitacionales, hidráulicas, etc. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de las superficies de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera, pueden moverse hacia abajo mientras otros se mueven hacia arriba. Los fenómenos de inestabilidad incluyen, generalmente, una combinación de procesos erosionales y denudacionales interrelacionados entre sí y a menudo mezclados. (Suarez, 2009)

Clasificación de los Movimientos

Caído: Caído es el desprendimiento y caída de materiales del talud. En los caídos se desprende una masa de cualquier tamaño desde un talud de pendiente fuerte a lo largo de una superficie en la cual el desplazamiento de corte es mínimo o no se da. (Suarez, J. 2009)

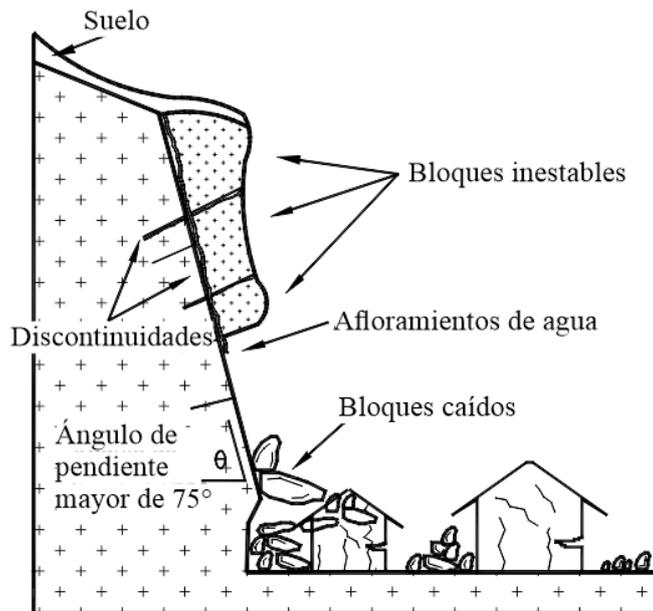


Figura 9: Caídos de bloques en caída libre de roca fracturada. (Suarez, J. 2009)

Deslizamiento Rotacional: En un desplazamiento rotacional, la superficie de falla es cóncava hacia arriba y el movimiento es rotacional con respecto al 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, lo cual genera, comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. (Suarez, J. 2009)

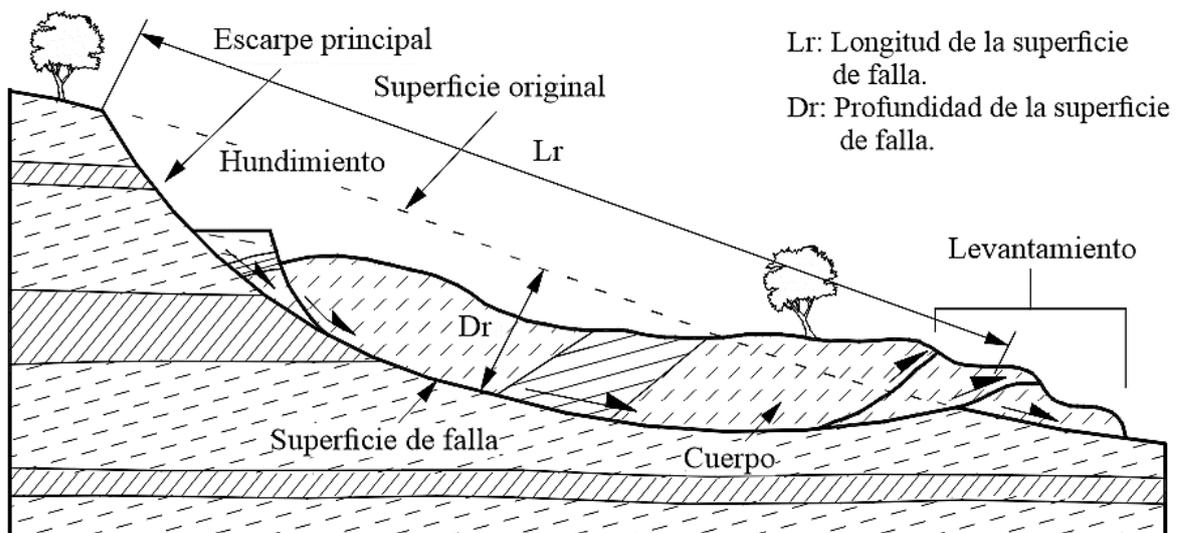


Figura 10: Desplazamiento de rotación en una ladera. (Suarez, J. 2009)

Flujos: En un “flujo” ocurren movimientos relativos de las partículas, o bloques pequeños, dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie. Las deformaciones relativas internas son muy grandes y fluyen en forma similar a un líquido viscoso. El flujo puede ser laminar a turbulento. Al aumentar la densidad y la viscosidad, el flujo puede transportar grandes bloques hacia la parte superior.

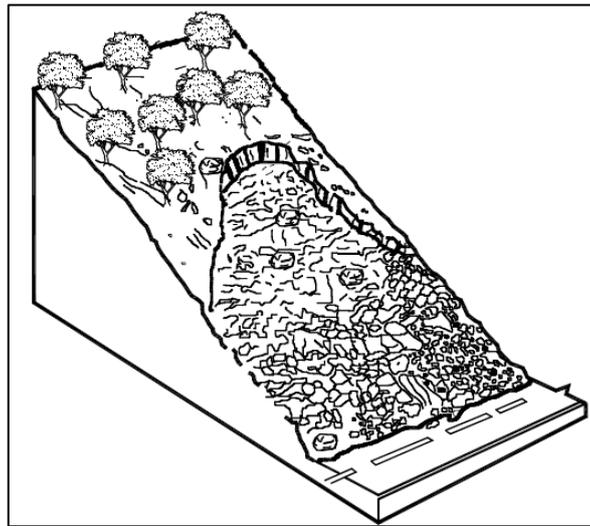


Figura 11: Flujo de bloques de roca y residuos en la excavación de un “talud” para la construcción de una vía. (Suarez, J. 2009)

2.2.8 SISMICIDAD

La sismicidad es el estudio de los sismos que ocurren en algún lugar en específico. Un lugar puede tener alta o baja sismicidad, lo que tiene relación con la frecuencia con que ocurren sismos en ese lugar. (Zúñiga, R. 2011)

Zonas Sísmicas del Perú

El territorio nacional se considera dividido en cuatro zonas. La zonificación propuesta se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de éstos con la distancia epicentral, así como en la información neotectónica. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)

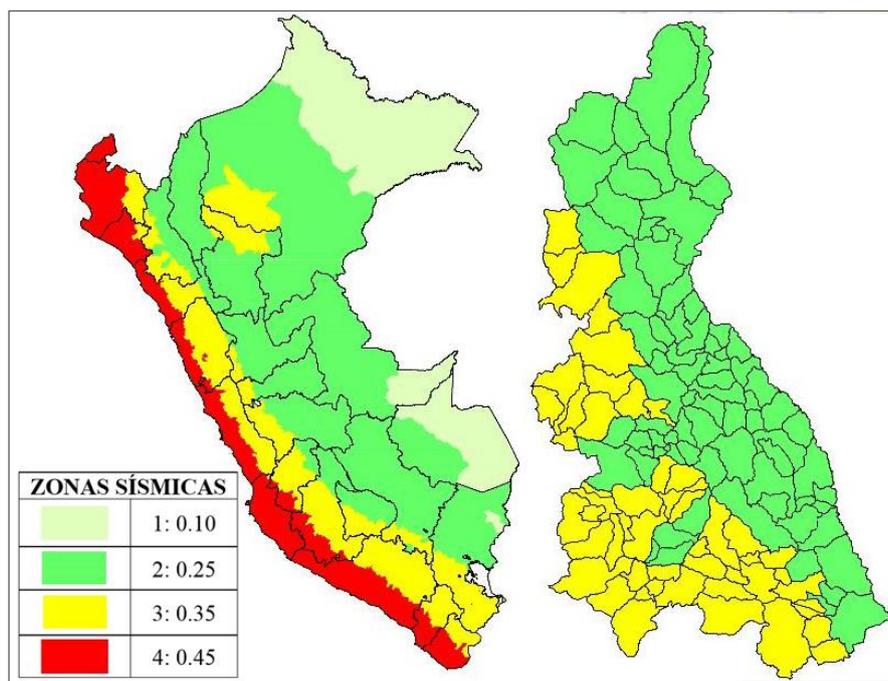


Figura 12: Zonas sísmicas en el Perú y Cajamarca. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016)

Análisis de Sismicidad

Para el análisis de sismicidad se requiere las componentes de sismicidad (Kh y Kv) que se obtienen de la siguiente tabla.

Tabla 4: Variables de sismicidad para obtener las componentes sísmicas horizontales y verticales. (LoadCap, 2014)

a: Zonas sísmicas del Perú	b: Coeficiente de amplificación topográfica	c: Categoría del perfil estratigráfico
1= 0.10 2= 0.25 3= 0.35 4= 0.45	<p>1: Laderas y taludes con pendientes menores a 15°.</p> <p>1.2: Laderas y taludes aislados con pendientes mayores a 15°.</p> <p>1.4: Taludes y laderas con significativo menor grosor de cresta que de base, con pendientes mayores a 30°</p>	<p>0: S1 (Depósitos con niveles de más de 10m de arcillas/limos blandos con un índice de plasticidad alto (IP>40) y alto contenido de agua. S2 (Depósitos de suelos licuefactables, arcillas sensibles)</p> <p>1: A (Roca u otra formación geológica similar a roca, incluyendo como máximo 5 m de material más débil en superficie)</p> <p>1.25: B (Depósitos de arena muy densa, gravas, o arcilla muy dura, de decenas de metros de espesor caracterizado por un incremento de las propiedades mecánicas en profundidad). C (Depósitos de arena densa o media, grava o arcilla dura con un espesor de unas decenas hasta centenares de metros). E (Un perfil de suelo formado por una capa aluvial superficial.</p> <p>1.35: D (Depósitos de suelo suelto de cohesión media a no cohesivo, con o sin capas de débil cohesión, o de ligera a gran cohesión predominantemente).</p>

Las componentes sísmicas se definen como:

Amplificación estratigráfica:

$$Kh = (a \times b \times c) / 2$$

Parámetros de zona:

$$Kv = (a \times b \times c) / 4$$

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Estabilidad: estado y condición de una estructura o de una masa de material cuando puede soportar los esfuerzos aplicados durante largo tiempo sin sufrir una deformación o movimiento apreciable que no se recupere o devuelva al retirar la carga (Hoyos, F. 2012)

Depósitos Aluviales: material depositado en las depresiones generalmente continentales transportados por las aguas de los ríos. (Dávila, J. 2011)

Deslizamiento: los deslizamientos (“Landslides”) consisten en “movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo de un talud” (Suarez, J. 2009)

Factor de Seguridad: equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. (Suarez, J. 2009)

Talud: un “talud” o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente. (Suarez, J. 2009)

Ángulo de Fricción (ϕ): el ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física. El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo. Todos los suelos poseen fricción. Sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos: $\phi = 0$. (Suarez, J. 2009)

Cohesión: parámetro de resistencia de un suelo que expresa la fuerza por la cual las moléculas homogéneas de un cuerpo se adhieren unas con otras. (GEMMA, 2007)

Densidad: Es la relación existente entre el peso de un material y su volumen. La comparación en el sistema métrico decimal se realiza en Ton/m³, Kg/dm³, gr/cm³. (Dávila, J. 2011)

Peso Específico: se llama peso específico al peso que posee una sustancia en un determinado volumen. El símbolo del peso específico es γ . Suele expresarse en newtons sobre metro cubico (N/m³). (Dávila, J. 2011)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1 GEOGRÁFICA

Geográficamente la carretera Choropampa – Magdalena, se encuentra en la cordillera occidental de los andes en el norte del Perú, al suroeste de la ciudad de Cajamarca, en el distrito de Magdalena. Con coordenadas UTM: DATUM WGS84, ZONA – 17S.

Tabla 5: Coordenadas UTM: DATUM WGS84 de los límites de la carretera.

VÉRTICES	LONGITUD	LATITUD
Punto inicial (Km 115+000)	758 865	9 197 633
Punto final (Km 127+000)	768 000	9 193 821

3.1.2 POLÍTICA

Políticamente la carretera se encuentra al suroeste de la ciudad de Cajamarca comprende el distrito de Magdalena de la provincia y región de Cajamarca. (ANEXO C.1)

La carretera Choropampa - Magdalena abarca una longitud de 12 km; iniciando en el Km. 127+000 hasta el Km. 115+000.

3.1.3 ACCESIBILIDAD

La carretera Choropampa - Magdalena, forma parte de la carretera Cajamarca - Ciudad de Dios, se accede a la zona de estudio desde la ciudad de Cajamarca, en el paradero a la costa, ubicado en la Av. Independencia, siendo el acceso principal a la zona de estudio. Con un tiempo de 50 minutos aproximadamente, en auto hasta Choropampa.

Tabla 6: Vía de acceso al tramo de estudio.

RUTA - TERRESTRE	DISTANCIA (Km)	VÍA	ESTADO
Cajamarca - Choropampa	47	Asfaltada	Buena

3.1.4 CLIMA

Magdalena está dominada por el clima templado. A lo largo del año, se dan pocas precipitaciones en Magdalena. La temperatura media anual en Magdalena se encuentra en 19.2°C. El mes más seco es Julio, mientras que en el mes de Marzo se dan las mayores precipitaciones del año. (SENAMHI, 2016)

3.1.5 HIDROLOGÍA

Río Magdalena

El río Magdalena es el cauce principal de la zona, en donde convergen las quebradas Tallal, de Lucma y El Mirme, estas quebradas interceptan la carretera.



Figura 13: Cauce del río Magdalena, en donde se observa depósitos fluviales constituidos por clastos polimícticos redondeados, su tamaño varía desde arcilla hasta gravas.

Quebrada Tallal

Ubicada entre el km 122 y 123, por esta quebrada discurren huaycos en las épocas de lluvia, por derrumbes en los márgenes de la quebrada. Es afluente del río Magdalena.



Figura 14: Quebrada Tallal, ubicada en las coordenadas N: 9195004 y E: 769650

Quebrada de Lucma

Quebrada susceptible a la ocurrencia de huaycos. Derrumbes y deslizamientos activos en ambas márgenes de la quebrada, aportan material suelto al cauce principal. Es afluente del río Magdalena.



Figura 15: Vista de la quebrada de Lucma, que atraviesa la carretera en el Km 126+250
Coordenadas N: 9194269 y E: 767089

Quebrada del Mirme

Quebrada por donde discurren huaycos, se observan derrumbes hacia ambas márgenes de la quebrada. Es afluente del río Magdalena.



Figura 16: Quebrada El Mirme, se observa derrumbes en los márgenes, ubicada en las coordenadas N: 9195720 y E: 761792

3.2 PROCEDIMIENTOS

3.2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Tipo y método de la Investigación

El tipo de investigación es no experimental, descriptiva, correlacional, explicativa y transversal. En cuanto a los métodos de la investigación que se utilizan son: la observación, métodos analíticos, deductivos y explicativos.

Población de estudio

Taludes de la Carretera Choropampa - Magdalena, en el tramo Km 115 - Km 127.

Muestra

Los taludes inestables de la carretera Choropampa – Magdalena.

Unidad de análisis

La unidad de análisis está representada por las propiedades intrínsecas y extrínsecas de suelos y rocas, en la Carretera Choropampa – Magdalena.

Análisis e interpretación de datos

El análisis e interpretación de datos será realizado en gabinete, donde se utilizarán los datos obtenidos en campo, y el procesamiento será en el software Slide v7.0 y RocData v5.0.

3.2.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Tabla 7: Definición de variables.

Variables independientes (Causa)	Variables dependientes (Efecto)
Factor de seguridad	Estabilidad de taludes
Tipo de material Geodinámica externa	Movimiento en masa

3.2.3 TÉCNICAS

Las técnicas empleadas para la recopilación de la información serán:

- Observación Dirigida.
- Análisis documental.
- Tomas fotográficas.
- Mediciones en campo (medición de discontinuidades, rumbos y buzamientos, de resistencia).

3.2.4 INSTRUMENTOS Y EQUIPOS

- Brújula Brunton Azimutal.
- GPS Navegatorio Garmin Mal 60 Cx.
- Wincha (30m) y Fluxómetro (5m).
- Picota geológica Estwing.
- Lápiz de dureza Carbide (Rayador), protactor-Escala 1/5000.
- Mapas topográficos, geológico e imagen satelital.
- Libretas de campo, lapiceros y lápices, bolsas de muestreo.
- Cámara fotográfica Sony DSC-WX80
- Laptop Toshiba Satellite S55.
- Software ArcGis 10.2.
- Software Slide v7.0, RocData v5.0, Dips v6.0.
- Software AutoCAD 2015 y AutoCAD Civil 3D 2016.
- Microsoft Office v2016 (Word, Excel, PowerPoint).

3.3 ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

El análisis y la interpretación de datos se realizó en gabinete usando los datos obtenidos en campo (los datos de mediciones de azimuth, buzamiento de estratos, identificación de litología y suelos, y datos geotécnicos).

Los datos fueron procesados en el software ArcGis 10.2, con la elaboración de mapas temáticos, en los softwares Slide v7.0, RocData v5.0 y Dips v6.0, donde se analizó la inestabilidad de taludes, para obtener el factor de seguridad de los taludes.

3.4 ESTRATIGRAFÍA

3.4.1 GRUPO CRISNEJAS

Formación Chúlec (Ki-chu)

Los afloramientos de esta formación se encuentran entre el km 120+800 y km 119+000, está compuesta por estratos de calizas fosilíferas, que adquieren un color crema amarillento debido al intemperismo. El espesor de los estratos varía de 20 a 40 cm.



Figura 17: Estratos de calizas de la Formación Chúlec, en contacto con un cuerpo intrusivo.

Formación Pariatambo (Ki-pa)

La Formación Pariatambo aflora al NW de la carretera entre el km 116+000 y 116+500 y al SE entre el km 122+200 y 122+400, está compuesta por estratos de calizas bituminosas negruzcas, intercaladas con estratos delgados de lutitas, con presencia de fósiles.



Figura 18: Estratos de calizas bituminosas intercaladas con lutitas de la Formación Pariatambo.

3.4.2 GRUPO PULLUICANA (Ks-p)

El Grupo Pulluicana aflora al SE de la carretera entre el km 124+100 y 124+400, está conformada por estratos gruesos de calizas mudstone de aproximadamente 1.50 m a 2.00 m de espesor, intercaladas con estratos delgados de lutitas.

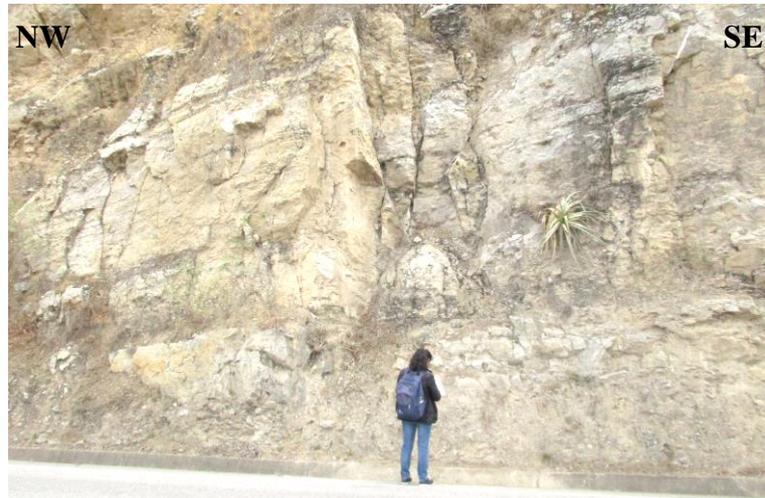


Figura 19: Estratos de calizas mudstone del Grupo Pulluicana.

3.4.3 SILL DIORÍTICO (Nm-di)

En la zona se hallan afloramientos de sills de composición diorítica, que ha intruido lateralmente capas de rocas sedimentarias, en la Formación Chúlec y la Formación Pariatambo. Las dioritas se encuentran muy meteorizadas, de estructura porfirítica, constituidas por plagioclasas, bajo contenido de cuarzo y hornblendas.



Figura 20: Sill de composición diorítica, intruyendo lateralmente dos capas de rocas sedimentarias.

3.4.4 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Depósitos Aluviales (Qh-al)

Los depósitos aluviales se hallan en gran parte de la zona de estudio, ubicados en la parte media e inferior de las quebradas, conformados por suelos gravo-arcillosos y arcillas de alta plasticidad.



Figura 21: Depósitos aluviales, conformados por suelos gravo-arcillosos y arcillas de alta plasticidad, cercanos a la Quebrada de Lucma.

Depósitos Coluvio-Aluviales (Qh-co/al)

Estos depósitos se originaron por deslizamientos en los que el agua fue el factor desencadenante principal, generando una mezcla de materiales de poco transporte y aquellos materiales transportados por el flujo de agua, está conformado por arcillas y limos de alta plasticidad, y gravas arcillosas.



Figura 22: Depósitos coluvio-aluviales compuestos por arcillas y limos de alta plasticidad, y gravas arcillosas. Ubicado en el Km 123+950.

Depósitos Deluviales (Qh-de)

Los depósitos deluviales se presentan en las laderas de los cerros, conformado por materiales erosionados que no han sido transportados, y con presencia de suelos finos-orgánicos en la parte superior de estos depósitos.



Figura 23: Depósitos deluviales en las laderas de los cerros, conformado por materiales erosionados que no han sido transportados.

Depósitos Fluviales (Qh-fl)

Estos depósitos se hallan en los márgenes de quebradas y ríos, poseen materiales que han sido transportados grandes distancias, su composición puede ser variada, en su mayoría los clastos son redondeados.



Figura 24: Depósitos fluviales de la quebrada de Lucma, compuesto por gravas, limos y arcillas.

3.5 PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS

Las propiedades geomecánicas de las unidades geológicas fueron analizadas en el software Rocdata v5.0, a partir de datos obtenidos en campo. (ANEXO A)

Los taludes analizados están conformados por depósitos aluviales, coluvio-aluviales, deluviales, y rocas de las Formaciones Chúlec, Pariatambo y Grupo Pulluicana.

Condiciones de aplicación para las unidades geológicas:

- Taludes de suelos: Criterio de Mohr-Coulomb.
- Taludes de rocas: Criterio Generalizado de Hoek-Brown.

3.5.1 GEOMECÁNICA DE LAS UNIDADES CRETÁICAS

Para la obtener los parámetros geomecánicos de las formaciones sedimentarias se utilizó el software RocData v5.0, aplicando el Criterio Generalizado de Hoek-Brown para rocas.

Tabla 8: Propiedades geomecánicas de la Formación Chúlec.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN CHÚLEC (Ki-chu)				
Tipo de macizo	Homogéneo	Parámetros de Salida		
Tipo de roca	Caliza	Criterio Hoek-Brown	mb	0.487048
Densidad seca	2450 Kg/m ³		s	0.00034533
Densidad sat.	2560 Kg/m ³		a	0.508086
Alt. Prom. Del Talud	50 m	Mohr-Coulomb Fit	c	0.269578 Mpa
Datos de Entrada (Clasificación Hoek-Brown)			Φ	38.1844°
Sigci (σ)	35 MPa	Parámetros del macizo rocoso	sigt	-0.0248158 Mpa
GSI	45		sigc	0.609808 Mpa
mi	10		sigcm	3.15497 Mpa
D	0.7		Erm	1917.33 Mpa
Ei	24500	Failure Envelope Range	sig3max (σ ₃)	0.960386 Mpa
MR	700			

Tabla 9: Propiedades geomecánicas de la Formación Pariatambo.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LA FORMACIÓN PARIATAMBO (Ki-pa)				
Tipo de macizo	Heterogéneo	Parámetros de Salida		
Tipo de roca	Caliza	Criterio Hoek-Brown	mb	0.333045
Densidad seca	2450 Kg/m ³		s	0.00016731
Densidad sat.	2560 Kg/m ³		a	0.511368
Alt. Prom. Del Talud	50 m	Mohr- Coulomb Fit	c	0.225298 Mpa
Datos de Entrada (Clasificación Hoek-Brown)			Φ	34.8769°
Sigci (σ)	35 MPa	Parámetros del macizo rocoso	sigt	-0.017583 Mpa
GSI	40		sigc	0.410108 Mpa
mi	9		sigcm	2.54635 Mpa
D	0.7		Erm	1834.25 Mpa
Ei	31500	Failure Envelope Range	sig3max (σ_3)	0.942039 Mpa
MR	900			

Tabla 10: Propiedades geomecánicas del Grupo Pulluicana.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DEL GRUPO PULLUICANA (Ks-p)				
Tipo de macizo	Homogéneo	Parámetros de Salida		
Tipo de roca	Caliza	Criterio Hoek-Brown	mb	0.843713
Densidad seca	2450 Kg/m ³		s	0.00147111
Densidad sat.	2560 Kg/m ³		a	0.504048
Alt. Prom. Del Talud	50 m	Mohr- Coulomb Fit	c	0.576547 Mpa
Datos de Entrada (Clasificación Hoek-Brown)			Φ	47.9179°
Sigci (σ)	75 MPa	Parámetros del macizo rocoso	sigt	-0.130771 Mpa
GSI	55		sigc	2.80168 Mpa
mi	10		sigcm	9.23751 Mpa
D	0.7		Erm	7751.38 Mpa
Ei	52500	Failure Envelope Range	sig3max (σ_3)	1.05788 Mpa
MR	700			

3.5.2 GEOMECÁNICA DE LOS DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Para la obtener los parámetros geomecánicos de los depósitos cuaternarios se utilizó el software RocData v5.0, aplicando el Criterio de Mohr-Coulomb para suelos.

Tabla 11: Propiedades geomecánicas de los depósitos aluviales.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LOS DEPÓSITOS ALUVIALES (Qh-al)					
Datos Generales		Clasificación de Mohr-Coulomb			
Clasificación SUCS	GC>CH	Cohesión	c	24	kPa
Densidad Seca	2100 Kg/m ³	Ángulo de Fricción	Φ	40	Grados
Densidad Saturada	2600 Kg/m ³	Esfuerzo Tensional	σ_t	-0.5	kPa
Altura Promedio del Talud	50 m	Resistencia Compresiva Uniaxial	σ_c	102.936	kPa
		Alpha	α	77.7324	Grados

Tabla 12: Propiedades geomecánicas de los depósitos deluviales.

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LOS DEPÓSITOS DELUVIALES (Qh-de)					
Datos Generales		Clasificación de Mohr-Coulomb			
Clasificación SUCS	MH	Cohesión	c	20	kPa
Densidad Seca	1750 Kg/m ³	Ángulo de Fricción	Φ	32	Grados
Densidad Saturada	2000 Kg/m ³	Esfuerzo Tensional	σ_t	-0.5	kPa
Altura Promedio del Talud	50 m	Resistencia Compresiva Uniaxial	σ_c	72.1619	kPa
		Alpha	α	72.92	Grados

Tabla 13: Propiedades geomecánicas de los depósitos coluvio-aluviales (Suelos GC>MH)

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LOS DEPÓSITOS COLUVIO-ALUVIALES (Qh-co/al)					
Datos Generales		Clasificación de Mohr-Coulomb			
Clasificación SUCS	GC>MH	Cohesión	c	23	kPa
Densidad Seca	1800 Kg/m ³	Ángulo de Fricción	Φ	38	Grados
Densidad Saturada	2300 Kg/m ³	Esfuerzo Tensional	σ_t	-0.5	kPa
Altura Promedio del Talud	50 m	Resistencia Compresiva Uniaxial	σ_c	94.314	kPa
		Alpha	α	76.619	Grados

Tabla 14: Propiedades geomecánicas de los depósitos coluvio-aluviales (Suelos GC>CL)

PROPIEDADES GEOMECÁNICAS DE LOS DEPÓSITOS COLUVIO-ALUVIALES (Qh-co/al)					
Datos Generales		Clasificación de Mohr-Coulomb			
Clasificación SUCS	GC>CL	Cohesión	c	22	kPa
Densidad Seca	2000 Kg/m ³	Ángulo de Fricción	Φ	36	Grados
Densidad Saturada	2300 Kg/m ³	Esfuerzo Tensional	σ_t	-0.5	kPa
Altura Promedio del Talud	50 m	Resistencia Compresiva Uniaxial	σ_c	86.3549	kPa
		Alpha	α	75.4464	Grados

3.6 GEOTECNIA

La carretera Choropampa-Magdalena, tramo Km 115 - Km 127, se desarrolló y analizó en 15 taludes, definiendo el comportamiento geológico y geomecánico, con las variables litología, medidas del talud (pendiente, altura, ancho del pie, azimut y buzamiento) y factores desencadenantes (agua y sismicidad), para obtener el factor de seguridad, mediante el análisis de estabilidad, realizado con el software Slide v7.0. (ANEXO B)

3.6.1 TALUD 01

El talud se encuentra entre el Km 115 y Km 116, constituido por depósitos deluviales, aluviales y principalmente por depósitos coluvio-aluviales, meteorizado por procesos geodinámicos externos, inestable principalmente en épocas de lluvia.

Tabla 15: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 01.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	11.76 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	17.70 m			Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarma
Pendiente del talud	74°					
Dirección del talud	N 145°		Normal	1.065	1.072	1.065
UBICACIÓN			Saturación Total	0.299	0.286	0.303
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.784	0.797	0.732
9197368	759641	1316				



Figura 25: Talud 01, constituido por depósitos cuaternarios.

3.6.2 TALUD 02

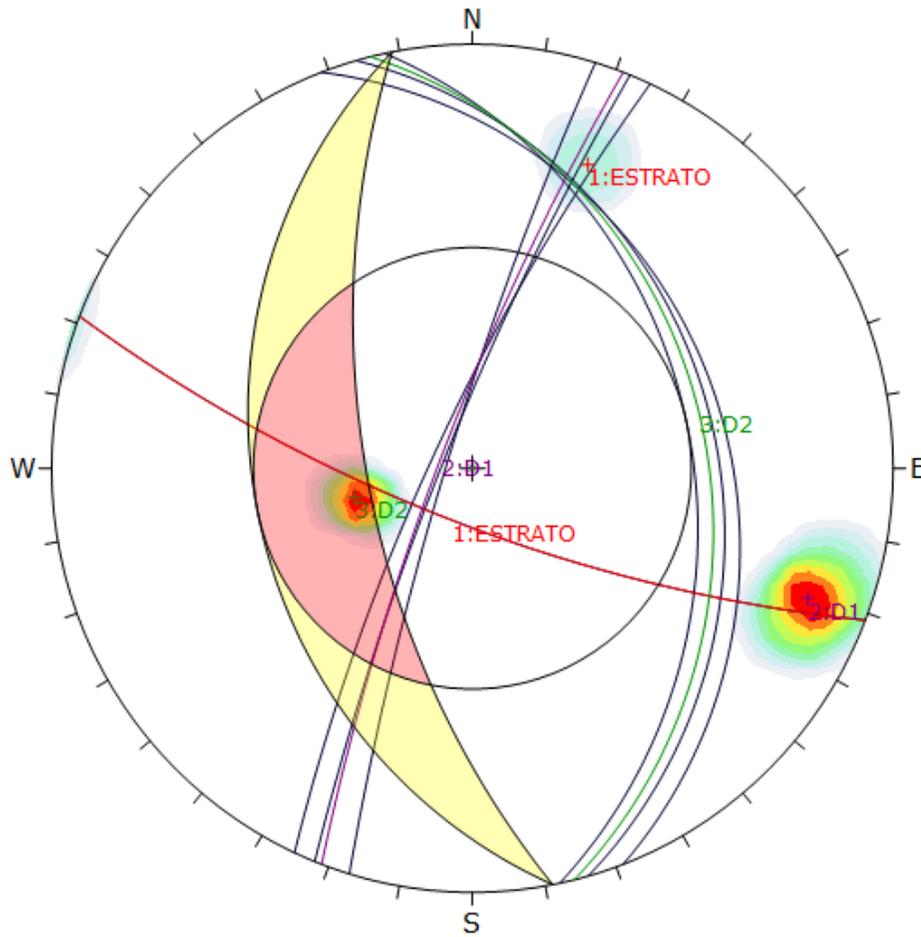
El talud se encuentra en el Km 116+490, constituido por calizas mudstone de la Formación Paritambo, con capas delgadas de lutitas, presenta alta meteorización, y su resistencia a la compresión uniaxial es intermedia, su GSI es de 40. En este tramo se observan taludes que muestran bloques rocosos muy inestables.

Tabla 16: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 02.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	39.24 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	12 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	62°		Normal			
Dirección del talud	169°			Saturación Total	0.237	0.238
UBICACIÓN			Sismicidad Máxima	0.980	0.899	0.908
Norte	Este	Cota				
9196912	759970	1344				



Figura 26: Talud 02, constituido por calizas de la Formación Paritambo, se observan bloques rocosos muy inestables.



Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	62		
Slope Dip Direction	259		
Friction Angle	35°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	0	21	0.00

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		75	201	ESTRATO
2		81	291	D1
3		32	76	D2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7 (7 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

DISCONTINUIDADES	DIP	DIP DIRECTION
ESTRATO	75	201
D1	82	292
D1	79	295
D1	83	287
D2	30	74
D2	35	78
D2	28	69

Figura 27: Análisis en el software Dips v6.0 del talud 02.

3.6.3 TALUD 03

El talud se encuentra en el Km 116+748 aproximadamente, está constituido por depósitos coluvio-aluviales compuestos por clastos sub-angulosos y mal clasificados, presentan bloques y limos arcillosos en mayor cantidad. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>MH.

Tabla 17: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 03.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	16.50 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Cálculo		
Longitud del pie	12 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	65°		Normal			
Dirección del talud	125°			Saturación Total	0.338	0.331
UBICACIÓN			Sismicidad Máxima	0.721	0.712	0.711
Norte	Este	Cota				
9196715	760102	1352				



Figura 28: Talud 03, compuesto por depósitos coluvio-aluviales que presentan bloques sub-angulosos y limos arcillosos.

3.6.4 TALUD 04

Este talud está ubicado en el Km 117+000, y está constituido principalmente por depósitos coluvio-aluviales que están constituidos por clastos sub-angulosos, mal clasificados, presentan bloques, gravas, alto contenido de limos y arcillas. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>MH.

Tabla 18: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 04.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	16.90 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Cálculo		
Longitud del pie	13 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	70°		Normal			
Dirección del talud	120°			Saturación Total	0.290	0.275
UBICACIÓN			Sismicidad Máxima	0.770	0.737	0.720
Norte	Este	Cota				
9196588	760323	1349				



Figura 29: Talud 04, constituido por depósitos aluviales, se puede observar una buena clasificación de los clastos.

3.6.5 TALUD 05

El talud se encuentra en el Km 117+430, está constituido por depósitos coluvio-aluviales compuestos por clastos sub-angulosos y mal clasificados, presentan bloques rocosos y limos arcillosos con ligera plasticidad. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>MH.

Tabla 19: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 05.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	16 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Cálculo		
Longitud del pie	15 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	72°					
Dirección del talud	135°		Normal	1.026	1.034	1.022
UBICACIÓN			Saturación Total	0.193	0.193	0.190
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.807	0.730	0.704
9196328	760655	1387				



Figura 30: Talud 05, constituido por depósitos coluvio-aluviales.

3.6.6 TALUD 06

Este talud está ubicado en el Km 117+720, y está constituido por depósitos coluvio-aluviales donde se aprecia clastos sub-angulosos, con mala clasificación, presenta bloques y alto contenido de finos (arcillas inorgánicas de alta plasticidad). Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>CL.

Tabla 20: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 06.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	12.71 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	15 m			Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarima
Pendiente del talud	80°					
Dirección del talud	110°		Normal	1.025	1.016	1.072
UBICACIÓN			Saturación Total	0.127	0.127	0.121
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.667	0.675	0.672
9196091	760830	1430				



Figura 31: Talud 06, constituido por depósitos aluviales, que tienen alto contenido de finos.

3.6.7 TALUD 07

El talud está en el Km 117+950, y está constituido por depósitos coluvio-aluviales donde se aprecia mala clasificación de los clastos, presenta bloques rocosos mayores de 10 cm, alto contenido de arcillas de baja plasticidad y bajo contenido de limos. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>CL.

Tabla 21: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 07.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	10.45 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Cálculo		
Longitud del pie	13 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	85°					
Dirección del talud	81°		Normal	1.034	1.033	1.177
UBICACIÓN			Saturación Total	0.091	0.091	0.091
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.680	0.683	0.685
9196028	761043	1394				



Figura 32: Talud 07, constituido por depósitos aluviales.

3.6.8 TALUD 08

El talud se encuentra en el Km 118+315 aproximadamente, está constituido por depósitos coluvio-aluviales compuestos por clastos sub-angulosos y mal clasificados, debido al poco transporte que ha tenido, presentan bloques y limos arcillosos en mayor cantidad. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>MH.

Tabla 22: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 08.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	4.35 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Cálculo		
Longitud del pie	11 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	80°					
Dirección del talud	115°		Normal	1.377	1.372	1.372
UBICACIÓN			Saturación Total	0.927	0.904	0.934
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.234	1.233	1.238
9195921	761383	1405				



Figura 33: Talud 08, compuesto por depósitos coluvio-aluviales.

3.6.9 TALUD 09

Este talud está ubicado en el Km 118+650, y está constituido principalmente por depósitos aluviales compuestos por bloques y finos, sus clastos son redondeados y presentan cierta clasificación. Según la clasificación SUCS, el suelo de este talud es de tipo GC>CH.

Tabla 23: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 09.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	3.55 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	13 m			Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarma
Pendiente del talud	80°		Normal	1.981	1.975	1.983
Dirección del talud	125°			1.302	1.308	1.327
UBICACIÓN			Saturación Total	1.584	1.584	1.587
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.584	1.584	1.587
9195800	761650	1442				



Figura 34: Talud 09, constituido por depósitos aluviales.

3.6.10 TALUD 10

Este talud se encuentra en el Km 119+400, está constituido por depósitos coluvio-aluviales que presentan composición de clastos de calizas en una matriz arcillosa, mal clasificados, el talud está altamente meteorizado, principalmente por agentes climáticos. Según la Clasificación SUCS el suelo es de tipo GC>MH.

Tabla 24: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 10.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	8 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	12 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	55°					
Dirección del talud	45°		Normal	1.448	1.449	1.446
UBICACIÓN			Saturación Total	0.938	0.934	0.996
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.175	1.174	1.174
9195603	762229	1454				



Figura 35: Talud 10, compuesto por depósitos coluvio-aluviales principalmente.

3.6.11 TALUD 11

Este talud se encuentra en el Km121+148, está constituido por depósitos coluvio-aluviales que presentan clastos finos constituidos por limos arcillosos en su mayoría, sus clastos son sub-angulosos y mal clasificados, según la Clasificación SUCS el suelo es de tipo GC>MH. Se observa alta meteorización en el talud, que desestabiliza los clastos del talud, provocando caída de los detritos.

Tabla 25: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 11.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	13.62 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	18 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	67°					
Dirección del talud	118°		Normal	1.124	1.132	1.123
UBICACIÓN			Saturación Total	0.394	0.389	0.425
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.858	0.800	0.789
9195363	763748	1521				



Figura 36: Talud 11, constituidos por depósitos coluvio-aluviales.

3.6.12 TALUD 12

El talud se encuentra en el Km 122+375, constituido por calizas de la Formación Pariatambo que presentan alta meteorización debido a agentes climáticos principalmente, su resistencia a la compresión uniaxial es baja, su GSI es de 35. En épocas de lluvia es más inestable debido al fracturamiento del macizo rocoso, provocando caídas de rocas y detritos.

Tabla 26: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 12.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	10.57 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	9.63 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	79°					
Dirección del talud	65°		Normal	2.118	2.117	2.114
UBICACIÓN			Saturación Total	0.234	0.215	0.233
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.500	1.499	1.436
9194995	764568	1542				



Figura 37: Talud 12, constituido por calizas de la Formación Pariatambo, altamente meteorizadas.

3.6.13 TALUD 13

El talud se encuentra en el Km 123+955, está constituido por depósitos aluviales, formados por clastos de calizas en una matriz limo-arcillosa, sub-redondeados y con cierta clasificación, también presenta bloques en la parte superior del talud. Se ha considerado según clasificación SUCS un suelo tipo GC>CH.

Tabla 27: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 13.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	8.55 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	15 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	87°					
Dirección del talud	97°		Normal	1.111	1.110	1.281
UBICACIÓN			Saturación Total	0.138	0.133	0.239
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	0.763	0.762	0.765
9194866	765519	1569				



Figura 38: Talud 13, constituido por depósitos aluviales.

3.6.14 TALUD 14

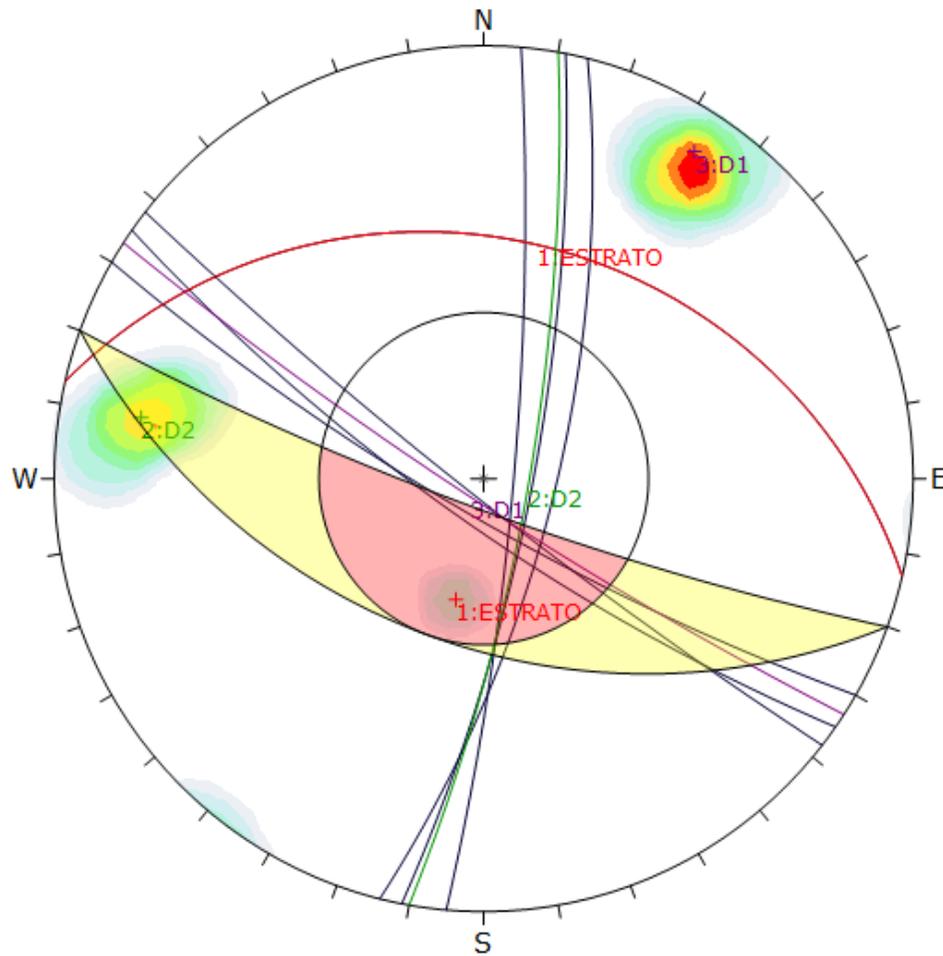
El talud se encuentra en el Km 124+290, constituidos por estratos gruesos de calizas del Grupo Pulluicana, que presentan una alta resistencia, el talud esta levemente meteorizado. Su GSI es de 55. El fracturamiento del macizo rocoso, puede desestabilizar bloques de roca provocando su caída, debido a diferentes factores como el agua o la vibración causada por el paso de vehículos en la carretera.

Tabla 28: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 14.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	15.91 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Método de Calculo		
Longitud del pie	13 m			<i>Spencer</i>	<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	<i>Sarma</i>
Pendiente del talud	82°					
Dirección del talud	110°		Normal	2.358	2.360	2.354
UBICACIÓN			Saturación Total	1.446	1.448	1.457
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.485	1.486	1.480
9194765	765840	1569				



Figura 39: Talud 14, constituido por calizas del Grupo Pulluicana.



Kinematic Analysis	Wedge Sliding		
Slope Dip	82		
Slope Dip Direction	200		
Friction Angle	48°		
	Critical	Total	%
Wedge Sliding	12	21	57.14

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		32	13	ESTRATO
2		78	100	D1
3		84	213	D2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	7 (7 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

DISCONTINUIDADES	DIP	DIP DIRECTION
ESTRATO	32	13
D1	85	218
D1	80	210
D1	78	215
D2	82	95
D2	71	104
D2	77	101

Figura 40: Análisis en el software Dips v6.0 del talud 14.

3.6.15 TALUD 15

El talud se encuentra en el Km 125+000, constituido por depósitos aluviales, compuestos por clastos de origen calcáreo y con contenido de finos arcillosos, está altamente meteorizado. Presenta mayor inestabilidad en épocas de lluvia. Según la clasificación SUCS se considera el tipo de suelo como GC>CH.

Tabla 29: Descripción y factor de seguridad obtenido en el Talud 15.

GEOMETRÍA DEL TALUD			FACTOR DE SEGURIDAD			
Altura	20.45 m		Método de Cálculo			
Longitud del pie	16 m		Condiciones Aplicadas al Talud	Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarima
Pendiente del talud	34°					
Dirección del talud	105°		Normal	1.494	1.494	1.492
UBICACIÓN			Saturación Total	0.780	0.777	0.964
Norte	Este	Cota	Sismicidad Máxima	1.192	1.185	1.190
9194598	766505	1616				



Figura 41: Talud 15, formado por depósitos aluviales inestables.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El análisis de la información obtenida de los 15 taludes estudiados, se realizó mediante el Software Slide v7.0 (Método de Equilibrio Limite), donde se obtuvo los factores de seguridad en taludes de suelo y roca, para la determinación de zonas inestables que son susceptibles a deslizamientos en la carretera Choropampa - Magdalena. Se analizó los factores geológicos (litología, discontinuidades) de cada talud, para determinar los parámetros geomecánicos de las unidades geológicas que influyen en cada talud, mediante el análisis en el Software RocData v5.0. Para los taludes de suelos se utilizó el Criterio de Mohr-Coulomb y para los taludes de roca el Criterio Generalizado de Hoek-Brown.

Los taludes se analizaron en condiciones naturales, de saturación total de los materiales y sismicidad. Para condiciones normales se tuvo en cuenta la litología, topografía, cargas estáticas, propiedades geomecánicas de los materiales (cohesión, ángulo de fricción en suelos; y resistencia a la compresión uniaxial, GSI en rocas, además de parámetros obtenidos en el software RocData v5.0 a partir de datos de entrada determinados en campo);

Para el análisis en el Software Slide v7.0, se emplearon los métodos de Spencer, GLE/Morgenstern-Price, Sarma; que son los métodos de análisis más precisos y complejos, ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión (Suárez, J. 2009). En la siguiente tabla 30 y 31 se resumen los resultados de los taludes analizados.

Tabla 30: Resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados (Talud 1-11).

TALUD	UNIDAD GEOLÓGICA	CONDICIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD		
			MÉTODO		
			Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarma
1-1'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.065	1.072	1.065
		Saturación Total	0.299	0.286	0.303
		Sismicidad Máxima	0.784	0.797	0.732
2-2'	Calizas (Ki-pa)	Normal	1.341	1.316	1.310
		Saturación Total	0.237	0.238	0.227
		Sismicidad Máxima	0.980	0.899	0.908
3-3'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.021	1.024	1.024
		Saturación Total	0.338	0.331	0.375
		Sismicidad Máxima	0.721	0.712	0.711
4-4'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.049	1.052	1.048
		Saturación Total	0.290	0.275	0.383
		Sismicidad Máxima	0.770	0.737	0.720
5-5'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.026	1.034	1.022
		Saturación Total	0.193	0.193	0.190
		Sismicidad Máxima	0.807	0.730	0.704
6-6'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.025	1.016	1.072
		Saturación Total	0.127	0.127	0.121
		Sismicidad Máxima	0.667	0.675	0.672
7-7'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.034	1.033	1.177
		Saturación Total	0.091	0.091	0.091
		Sismicidad Máxima	0.680	0.683	0.685
8-8'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.377	1.372	1.372
		Saturación Total	0.927	0.904	0.934
		Sismicidad Máxima	1.234	1.233	1.238
9-9'	Depósitos Aluviales (Qh-al)	Normal	1.981	1.975	1.983
		Saturación Total	1.302	1.308	1.327
		Sismicidad Máxima	1.584	1.584	1.587
10-10'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.448	1.449	1.446
		Saturación Total	0.938	0.934	0.996
		Sismicidad Máxima	1.175	1.174	1.174
11-11'	Depósitos Coluvio-aluviales (Qh-co/al)	Normal	1.124	1.132	1.123
		Saturación Total	0.394	0.389	0.425
		Sismicidad Máxima	0.858	0.800	0.789

Tabla 31: Resumen de los factores de seguridad de los taludes analizados (Talud 12-15).

TALUD	UNIDAD GEOLÓGICA	CONDICIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD		
			MÉTODO		
			Spencer	GLE/Morgenstern-Price	Sarma
12-12'	Calizas (Ki-pa)	Normal	2.118	2.117	2.114
		Saturación Total	0.234	0.215	0.233
		Sismicidad Máxima	1.500	1.499	1.436
13-3'	Depósitos Aluviales (Qh-al)	Normal	1.111	1.110	1.281
		Saturación Total	0.138	0.133	0.239
		Sismicidad Máxima	0.763	0.762	0.765
14-14'	Calizas (Ks-p)	Normal	2.358	2.360	2.354
		Saturación Total	1.446	1.448	1.457
		Sismicidad Máxima	1.485	1.486	1.480
15-15'	Depósitos Aluviales (Qh-al)	Normal	1.494	1.494	1.492
		Saturación Total	0.780	0.777	0.964
		Sismicidad Máxima	1.192	1.185	1.190

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.2.1 INFLUENCIA DE LOS FACTORES GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS EN LA INESTABILIDAD

Los taludes más inestables en la zona de estudio son los que están compuestos por depósitos cuaternarios, los cuales son suelos gravosos, con abundantes finos arcillosos y limosos, en su mayoría bien graduados o con granulometría discontinua; presentan inestabilidad en las tres condiciones aplicadas. Los taludes en rocas presentan más estabilidad, en condiciones naturales; pero varía al aplicar saturación a los materiales o sismicidad. Sin embargo, tanto en taludes de suelo y rocas, la estabilidad también depende de las propiedades físicas de los taludes (altura, pendiente, longitud de pie) y de la topografía. Estos factores sumados a los factores geológicos y geotécnicos, influyen en el resultado final de los análisis en las tres condiciones aplicadas. El factor de seguridad resultante en los métodos utilizados (Spencer, GLE/Morgenstern-Price, Sarma) no varía significativamente; para la comparación de resultados en esta investigación se va a utilizar el factor de seguridad del Método Sarma. En condiciones normales, los taludes 01, 03, 04, 05, 06, 07, 11 y 13 presentan estabilidad relativa, el factor de seguridad de estos taludes se encuentra en el rango de 1.00 - 1.29, están compuestos por depósitos cuaternarios, geomorfológicamente están ubicados en terrenos con pendientes que varían de 25°-45° y fueron analizados con el criterio de Mohr - Coulomb.

Los taludes 02, 08, 10 y 15 presentan estabilidad temporal, el factor de seguridad de estos taludes se encuentra en el rango de 1.30 - 1.49; el talud 02 está compuesto por calizas de la Formación Pariatambo y los taludes 08, 10 y 15 están compuestos por depósitos cuaternarios, ubicados en terrenos con pendientes de 15°-25°. Los taludes 09, 12 y 14, presentan estabilidad permanente, el factor de seguridad de estos taludes se encuentra en el rango de 1.50 - 2.99; los taludes 12 y 14 están compuestos por calizas de la Formación Pariatambo y Grupo Pulluicana respectivamente, y el talud 09 está compuesto por depósitos aluviales, ubicado en terrenos de pendiente de 15°-20°.

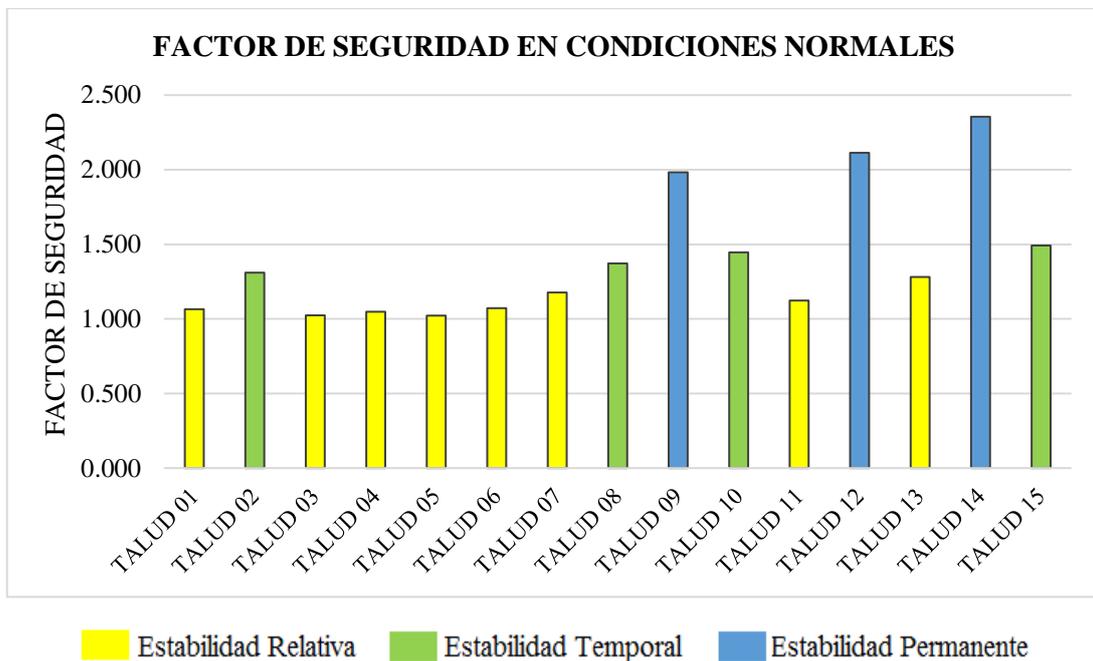


Figura 42: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones normales.

En condiciones de saturación, los taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 11, 12, 13 presentan inestabilidad absoluta, el factor de seguridad está en el rango de 0.00 - 0.89, el mecanismo de rotura en los taludes (superficie de deslizamiento), es la rotura rotacional; la inestabilidad en los taludes 02 y 12 compuestos por calizas está influenciada por la geometría del talud. Los taludes 08, 10 y 15 presentan inestabilidad relativa, el factor de seguridad está en el rango de 0.90 - 0.99. Los taludes 09 y 14 presentan estabilidad temporal, en el talud 14 la superficie de falla está en la base del talud donde hay depósitos coluvio-aluviales.

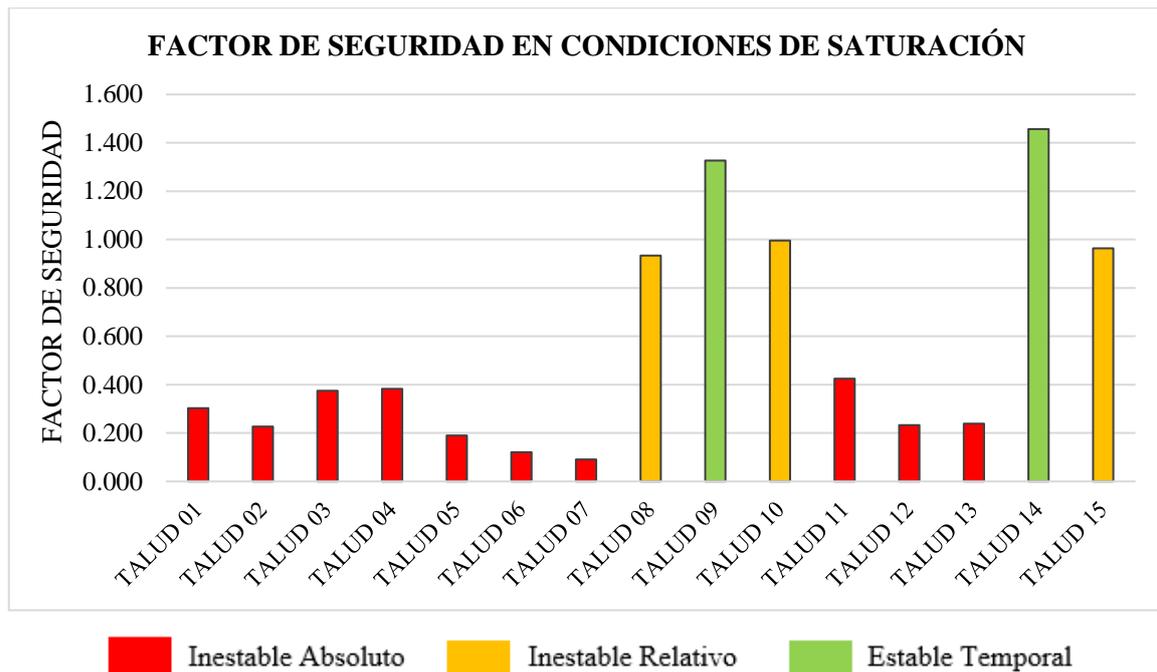


Figura 43: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones de saturación.

Para las condiciones de sismicidad se consideró los siguientes factores:

- Zona sísmica: 3, aceleración máxima: 0.3-0.4 gal = 0.35 gal (promedio)
- Coeficiente de amplificación topográfica: 1.2 (taludes aislados mayores a 15°)
- Categoría de perfil estratigráfico: B (1.25, suelos duros, mediana a alta cohesión)
- Amplificación estratigráfica “Kh” = 0.263
- Parámetros de Zona “Kv” = 0.132

En condiciones de sismicidad, los taludes 01, 03, 04, 05, 06, 07, 11 y 13 presentan inestabilidad absoluta, debido a que están compuestos por depósitos cuaternarios, sus características geológicas, geotécnicas y geométricas influyen en su inestabilidad. El talud 02, compuesto por calizas de la Formación Pariatambo presenta inestabilidad relativa, influenciada principalmente por la topografía del talud. Los taludes 08, 10 y 15 presentan estabilidad relativa, debido a la topografía del talud y por las características geomecánicas de los suelos que contienen los taludes. Los taludes 12 y 14 presentan estabilidad temporal, están compuestos por calizas de las Formación Pariatambo y Grupo Pullucana respectivamente, sus características geomecánicas influyen en la estabilidad de estos taludes; en el talud 14, la superficie de falla se encuentra en la base del talud donde hay depósitos coluvio-aluviales. El talud 09 presentan estabilidad permanente, la estabilidad está influenciada por la topografía del talud (la pendiente del talud es 55°) y propiedades geomecánicas de los suelos que contienen los depósitos aluviales.

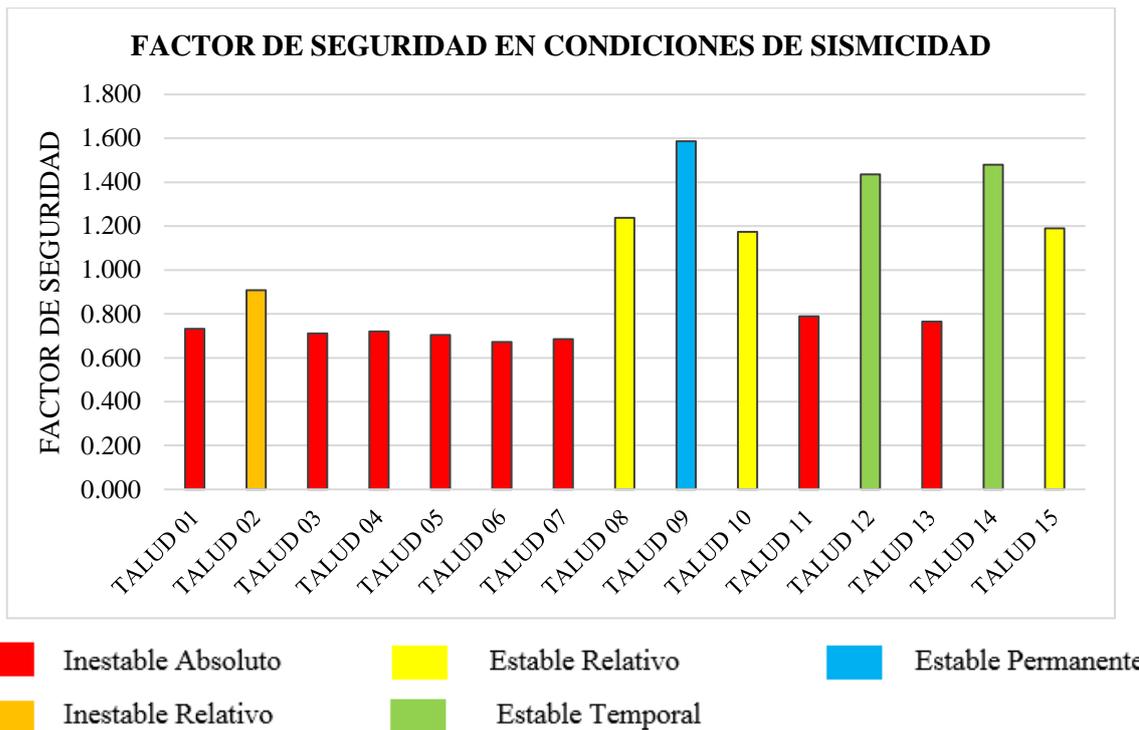


Figura 44: Gráfico del factor de seguridad de los taludes en condiciones de sismicidad.

4.2.2 ZONIFICACIÓN DE ESTABILIDAD SEGÚN EL FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad recomendado para taludes permanentes debe ser igual o superior a 1.5, e incluso 2.0 (González de Vallejo L. et. al., 2004), dependiendo de la seguridad exigida y de los datos geotécnicos que intervienen en los cálculos; para taludes temporales el factor de seguridad está en torno a 1.3, pero en ocasiones pueden adoptarse valores inferiores.

La zonificación en el área de estudio ha sido clasificada de acuerdo a los factores de seguridad en los taludes obtenidos con las tres condiciones aplicadas y los métodos Spencer, GLE/Morgenstern-Price y Sarma. Para ello se ha utilizado la siguiente clasificación, que se muestra en la tabla.

Tabla 32: Zonificación del área de estudio según los factores de seguridad.

FACTOR DE SEGURIDAD	
RANGO	ESTADO DEL TALUD
0.00 - 0.89	Inestable Absoluto
0.90 - 0.99	Inestable Relativo
1.00 - 1.29	Estable Relativo
1.30 - 1.49	Estable Temporalmente
1.50 - 2.99	Estable Permanentemente
3.00 - 15.00	Estable Absoluto

Fuente: Hoek, E. 2007

4.3 CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La inestabilidad de los taludes en la carretera Choropampa - Magdalena, se ve influenciada por el comportamiento de los factores geológicos-geotécnicos, influyendo también factores geométricos y factores detonantes. Los taludes en la carretera están compuestos en su mayoría, por depósitos cuaternarios aluviales (suelos tipo GC>CH), coluvio-aluviales (suelos GC>CL, y tipo GC>MH) y deluviales (suelos tipo MH), por rocas de las Formaciones Chúlec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, y por intrusivos dioríticos en cortos tramos de la carretera, que se ven afectados por agentes geodinámicos externos que erosionan suelos y rocas, provocando fracturamiento, denudación de los materiales; reduciendo su resistencia y alterando sus propiedades geomecánicas. Los factores geométricos de los taludes como su altura, pendiente, ubicación topográfica, también influyen en la inestabilidad de los taludes. La infiltración de agua en los materiales, dándose principalmente en épocas de lluvia, hace al agua un agente detonante, así como el factor sismicidad. La combinación de todos estos factores, influyen en el análisis de estabilidad de los taludes para obtener el factor de seguridad. Por lo que la hipótesis ha sido contrastada y verificada.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Los factores geológicos-geotécnicos, junto con factores geométricos y topográficos del talud, han sido afectados por procesos geodinámicos externos e internos, que han modificado sus propiedades geomecánicas, influyendo en la inestabilidad de los taludes, que incrementa con factores desencadenantes de saturación y sismicidad.

Los taludes analizados de la carretera Choropampa-Magdalena, están compuestos principalmente por depósitos cuaternarios aluviales, coluvio-aluviales, deluviales, por calizas de las Formaciones Chúlec, Pariatambo, Grupo Pulluicana, y por intrusivos dioríticos, se encuentran en terrenos con pendientes fuertes (15° - 25°) y escarpadas ($>45^{\circ}$).

El factor de seguridad obtenido en el análisis, varía de acuerdo a las condiciones aplicadas (normales, de saturación y sismicidad), por lo que, los taludes se clasificaron en inestables absolutos, inestables relativos, estables relativos, estables temporales y estables permanentes.

En condiciones normales los taludes 01, 03, 04, 05, 06, 07, 11 y 13 presentan estabilidad relativa, su factor de seguridad varía entre 1.00 - 1.29. En condiciones de saturación, los taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 (tramo Km 115+500 - 118+500) y los taludes 11, 12 y 13, presentan inestabilidad absoluta, su factor de seguridad varía entre 0.00 - 0.89, los taludes 10 y 14 son inestables relativos, su factor de seguridad está entre 0.90 - 0.99. En condiciones de sismicidad los taludes los taludes 01, 03, 04, 05, 06, 07, 11 y 13 se clasifican como inestables absolutos; y el talud 02 como inestable relativo; los taludes restantes son estables.

5.2 RECOMENDACIONES

En los periodos de lluvias, los taludes presentan mayor inestabilidad, principalmente en los taludes compuestos por depósitos cuaternarios, por lo que las autoridades competentes de la Región y del Distrito de Magdalena, deben monitorear constantemente los tramos más susceptibles a deslizamientos en épocas secas, realizando obras de mitigación, como zanjas de coronación, en los puntos identificados de mayor susceptibilidad.

Se recomienda realizar ensayos geomecánicos en los taludes de suelos y rocas, para obtener resultados más fiables, ya que en esta investigación se utilizaron estimaciones empíricas de los datos obtenidos en campo; procesándolos luego en softwares como RocData y Slide.

Se recomienda realizar obras de estabilidad en las quebradas, ya que, en sus cauces se ha observado presencia de abundante material suelto producto de los derrumbes y los procesos de meteorización, este material es susceptible de ser acarreado como huaycos durante periodos de lluvia excepcional, afectando directamente a la carretera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRAJA, M. (2001) "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica". Sacramento, USA. Cengage Learning Latin Am.
- DAVILA, J. (2011) "Diccionario Geológico". INGEMMET, Lima, Perú.
- GEMMA - GRUPO DE ESTÁNDARES PARA MOVIMIENTOS EN MASA (2007). "Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas". Publicación Geológica Multinacional No. 4.
- GRANADOS, A. (2006). "Estabilización del Talud de la Costa Verde en la Zona del Distrito de Barranco". Lima-Perú.
- HERRERA, F. (2003). "Introducción al Análisis de la Estabilidad de Taludes en Suelos y los Diferentes Métodos de Cálculo Utilizados". Ponencia presentada en el VI Curso de Geotecnia. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)-Aragón.
- HOEK, E., CARRANZA TORRES, C., & CORKUM, B. (2002). "El Criterio de Rotura de Hoek - Brown". Edición 2002. Minnesota
- HOEK, E. (2013). "Quantification of the Geological Strength Index Chart". 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium.
- HOEK, E. (2007). "Rock Mass Properties. In Practical Rock Engineering". Toronto, Canadá: Rocscience.
- HOYOS, F. (2012). "Geotecnia Diccionario Básico". 1st Ed. Medellín-Colombia.
- GEOSTRU SOFTWARE (2014). LoadCap. <http://www.geostru.eu/es/>.
- MELENTIJEVIC, S. (2005). "Estabilidad de Taludes en Macizos Rocosos con Criterios de Rotura No Lineales y Leyes de Fluencia No Asociada". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO (2016). Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, DECRETO SUPREMO N° 003-2016-VIVIENDA. El Peruano - 576293.
- MONTOYA, F. (2014) “Evaluación geotécnica de los Taludes de la Carretera Cruz Blanca - El Gavilán”. Universidad Nacional de Cajamarca.
- REYES, L. (1980). Boletín N° 31, “Cuadrángulo de Cajamarca - San Marcos – Cajabamba”. INGEMMET, Lima-Perú.
- RICO A, A. & CASTILLO, H. (1998). “La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres”. (1st Ed.). Limusa - México.
- SÁENZ, E. (2015). “Evaluación Geotécnica De Los Taludes En El Tramo De La Carretera El Gavilán - Chigden”. Universidad Nacional de Cajamarca.
- SUAREZ, J. (2009). “Deslizamientos: Análisis Geotécnico”. España. U. Industrial de Santander.
- TORRES, W. (2015). “Evaluación Geotécnica de los Deslizamientos en Taludes de la Carretera Peña Blanca - Choropampa - Cajamarca”. Universidad Nacional de Cajamarca.
- VALLEJO, L. Et. Al, (2004). “Ingeniería Geológica”. Madrid, España. Pearson Educacion.
- VILCHEZ, M. & GUERRERO, C. (2006). “Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la Cuenca del Río Jequetepeque”. INGEMMET, Lima-Perú.
- ZAVALA, B. & ROSADO, M. (2011). “Riesgo Geológico en la Región de Cajamarca”. INGEMMET. Lima-Perú.
- ZAVALETA, A. (2016). “Evaluación Geotécnica en Zonas Críticas de la Carretera Cajabamba-Cauday”. Universidad Nacional de Cajamarca.
- ZÚÑIGA, R. (2011). “Sismología”. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México.

ANEXOS

A. RESULTADO DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE ROCDATA V5.0

B. RESULTADO DEL ANÁLISIS CON EL SOFTWARE SLIDE V7.0

C. PLANOS

C.1 UBICACIÓN

C.2 IMAGEN SATELITAL

C.3 TOPOGRÁFICO

C.4 PENDIENTES

C.5 GEOLÓGICO

C.6 ESTABILIDAD EN CONDICIONES NORMALES

C.7 ESTABILIDAD EN CONDICIONES DE SATURACIÓN

C.8 ESTABILIDAD EN CONDICIONES DE SISMICIDAD