

Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona Cajamarca-Perú

Research method for geological-geotechnical analysis of unstability of slopes by landslide zona Ronquillo-Corisorgona Cajamarca-Perú

Reinaldo Rodríguez Cruzado¹, Víctor Tolentino Iparraguirre²

Recibido: Agosto 2015 - Aprobado: Diciembre 2015

RESUMEN

La investigación analiza el comportamiento geoestructural, geomorfológico y geomecánico de los macizos rocosos de las Formaciones Farrat, Inca, Chulec y Pariatambo, que se encuentran en la zona Ronquillo-Corisorgona, macizos que presentan laderas inestables por fuerte fracturamiento, originado por la geotectónica regional y local, así como por la meteorización superficial y en profundidad, condiciones que han determinado eventos geodinámicos como, un paleodeslizamiento de aproximadamente 500 metros de largo y pendientes entre 19° y 45°, deslizamientos intermedios, zonas disturbadas y un deslizamiento reciente; evidencias que determinan las probabilidades de un deslizamiento futuro de grandes dimensiones en el Cerro Ronquillo. En consecuencia se tuvo como objetivo analizar la inestabilidad de laderas asociada a los factores internos, es decir sus características intrínsecas condicionadas por las propiedades del material y su resistencia, y extrínsecas, relacionadas con la morfología de las laderas y condiciones ambientales; y los factores externos o desencadenantes como la infiltración del agua y la sismicidad. Al correlacionar estas variables mediante el análisis geoestructural de la información de cada punto de control utilizando Software Dips y la incidencia de la variable hidrológica con sus parámetros precipitación e infiltración, obtuvimos los Factores de Seguridad en tres secciones geológicas, utilizando parámetros geomecánicos, nivel freático y sismicidad, según Bieniawski⁸⁹ y Software RocData, teniendo FS mínimo de 0.524 y máximo de 1.609. Probadas las hipótesis mediante condiciones de correlación y causalidad se definieron los modelos geológicos, geomecánico y numérico, con los cuales se logró el Modelo Geológico-Geotécnico Operacional y Conceptual de Inestabilidad de Laderas, esencia de la investigación inicialmente planteada.

Palabras clave: Geoestructuras, Geomorfología, Geodinámica, Geomecánica, Hidrología, Factor de Seguridad, Modelo.

ABSTRACT

The research analyzes the geostructural, geomorphological and geomechanical behavior of rock masses of Farrat, Inca, Chulec and Pariatambo Formations, found in Ronquillo-Corisorgona area massifs have unstable slopes by strong fracturing caused by the regional tectonics and local as well as superficial and

¹ Egresado de la Maestría de Geología-Mención Geotecnia. UNMSM. E-mail: reinaldo3579@yahoo.es

² Asesor de Tesis. UNMSM. E-mail: vty21@hotmail.com

deep weathering conditions that have determined geodynamic events as a paleodeslizamiento approximately 500 meters long and slopes between 19° and 45° , intermediate landslides, disturbed areas and a recent slide; evidence to determine the likelihood of a future large sliding in the Cerro Ronquillo. Consequently aimed to analyze the slope instability associated with internal factors, and their intrinsic characteristics conditioned by the material properties and resistance, and extrinsic, related to the morphology of the slopes and environmental conditions; and external or triggers such as water infiltration and seismicity. By correlating these variables by Geostructural analysis of information from each control point using Software Dips and incidence of hydrological variable parameters precipitation and infiltration, we obtained safety factors in three geological sections using geomechanical parameters, water table and seismicity, according Bieniawski89 and Software RocData, having minimum and maximum FS 0.524 1,609. Tested the hypothesis by correlation and causality conditions geological, geomechanical and numerical models, which the Geological and Geotechnical Operational and Conceptual Model of Instability Hillside's essence of the investigation had raised initially defined.

Keywords: Geostructures, geomorphology, geodynamics, geomechanics, hydrology, Safety Factor Model.

I. INTRODUCCIÓN

La preocupación continua de pobladores y autoridades sobre problemas geodinámicos en la zona Ronquillo, tuvo como punto desencadenante la ocurrencia del deslizamiento Urubamba II acontecido el 23 de marzo de 2001, sin consecuencias fatales pero con impactos psicológicos y económicos. Profesionales de la UNC, Guzman A. y Nuñez S. (Ingemmet, 2004), CARE-COSUDE, INDECI, realizaron visitas técnicas y evaluaciones durante muchos años sin llegar a una solución técnica y científica sostenible. Es por ello que se tomó la decisión de realizar una investigación geológica-geotécnica para definir las variables geoestructural, geomorfológica y geomecánica asociada a la variable desencadenante como es la infiltración del agua de lluvias (periodo de análisis entre 1968 y 2015, Estación Weberbauer), por las discontinuidades de los macizos rocosos de las formaciones geológicas Farrat, Inca, Chulec y Pariatambo, constituidas por los planos de estratificación y las fracturas.

1.1 Área de Estudio

Se ubica en la zona oeste de la ciudad de Cajamarca, en el norte del Perú, en el lugar denominado Ronquillo-Corisorgona, con accesos viales de avenidas asfaltadas y carreteras afirmadas tanto en lado oeste como este. La altitud máxima es de 3350 msnm y la mínima de 2720 msnm. Considerando el periodo 1968-2015, tenemos temperatura máxima anual de 23.8°C y mínima anual de 2°C ., la precipitación promedio anual es de 835.4 mm.

Geomorfológicamente encontramos planicies (0° - 8°), lomadas (8° a 20°), laderas (20° a 50°) y las escarpas ($>50^\circ$) son muy reducidas. Estructuralmente se tienen fallas regionales y locales de tendencia NW-SE, N-S y NE-SW, las cuales confluyen cerca o dentro del área de investigación (Figura N° 1).



Figura N° 1: Área de Investigación

II. MATERIAL Y MÉTODO DE ESTUDIO

En la investigación se utilizó los métodos de inducción y deducción, tipo aplicativo, con un diseño no experimental-transeccional de alcance descriptivo, correlacional y explicativo, según los lineamientos de investigación científica propuesto por Hernández R. et al (2010).

La técnica básica fue la descripción de los afloramientos rocosos, su litología, estructuras y datos geomecánicos, utilizando como instrumentos de recolección de datos la matriz geológica-geotécnica, diseñada originalmente por Tolentino V. (2008). Modificado por Rodríguez R. (2012-2014), donde se recopiló la

información de campo en los 58 punto de control geológico-geotécnico, datos tomados con instrumentos de medición como el GPS, brújula geotécnica, winchas y equipos auxiliares. Posteriormente se transfirieron los datos a los software's SIG, Dips, RocData y Slide, para generar los 11 planos temáticos, representación de las estructuras y su comportamiento geomecánico. Finalmente los resultados fueron utilizados para el análisis de resultados y su discusión, generando los mode-

los geológico, geomecánico, numérico, geológico-geotécnico operacional y el modelo conceptual para el análisis de inestabilidad de laderas, con lo cual se logró la contrastación de la hipótesis.

El proceso de investigación se realizó en cuatro etapas, las cuales fueron, obtención de la información, fase de campo, fase de análisis e interpretación y generación del informe final como tesis de investigación, como se muestra en la Figura N° 2.

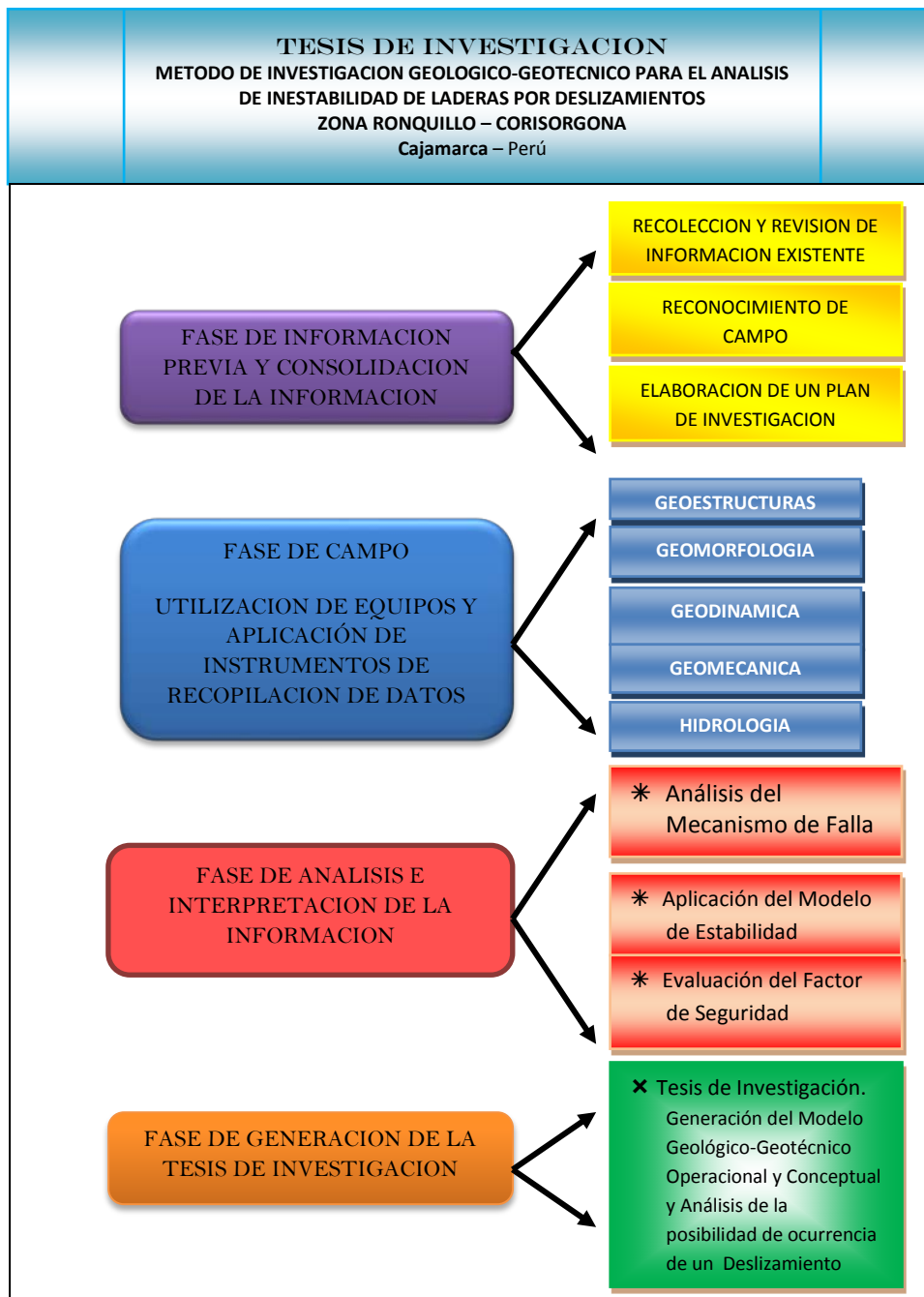


Figura N° 2: Fases del Proceso de Investigación

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Comportamiento Estructural del Área de Investigación

Para encontrar la persistencia y dirección de cada grupo de discontinuidades -estratos y diaclasas- se analizó en cada gráfico de proyecciones estereográficas, mediante el software Dips las tendencias y se calculó cada uno de ellos, obteniendo como resultado los datos que se muestran en la Tabla N° 1. Este análisis de resultados se muestran en las Figuras N°s. 3, 4 y 5, obtenidas con el Dips (Rocscience Inc., 2015. RocData v5).

Tabla N° 1: Tendencias de las Discontinuidades

	Orientación DD	Discontinuidades		
		Cantidad	% Parcial	% Acumulado
Formaciones Farrat - Inca	NW	10	18	52
	SW	19	34	
	SE	14	25	48
	NE	13	23	
Sub total		56	100	100
Formación Chulec	NW	19	14	45
	SW	41	31	
	SE	29	22	55
	NE	43	33	
Sub total		132	100	100
Formación Pariatambo	NW	58	21	52
	SW	82	30	
	SE	55	20	48
	NE	75	28	
Sub total		270	100	100
Total Diaclasas		458		

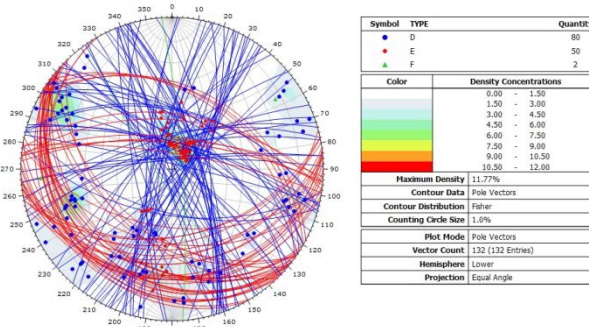


Figura N° 4: Tendencia de las Estructuras en la Formación Chulec-132 planos.

Con la información obtenida podemos definir que la estratificación tiene tendencia hacia el SW lo cual indica que estamos en el flanco del sinclinal, criterio concordante con la información existente en los estudios regionales y locales. Las orientaciones de estratos diferentes indican que existen estructuras menores plegadas que constituyen anticlinales y sinclinales menores. Con respecto a las diaclasas el análisis nos confirma que la mayor tendencia de estos planos son hacia el NE-SE, con dirección hacia la confluencia de los ríos Urubamba y Tres Ríos. (Ver Figura N° 3 hasta la Figura N° 5). Las estructuras geológicas sedimentarias del Cretácico Inferior como son las Formaciones Farrat-Inca, Chulec y las Formaciones Pariatambo y Yumagual del Cretácico Superior, junto con el Volcánico Huambos del Mio-Plioceno estuvieron expuestas a la acción erosiva de los procesos de glaciación y post-glaciación del Plio-Pleistoceno, generando el drenaje dendrítico y geoformas actuales, todas ellas controladas por las estructuras geológicas.

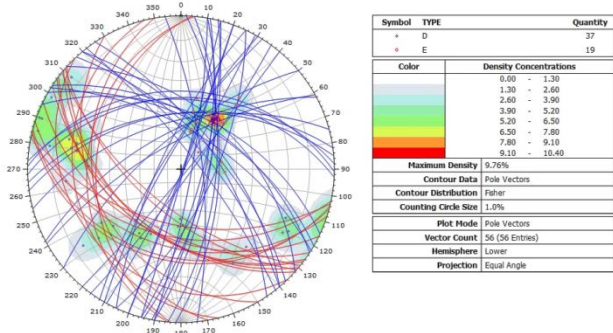


Figura N° 3: Tendencia de las Estructuras en las Formaciones Farrat-Inca-56 planos.

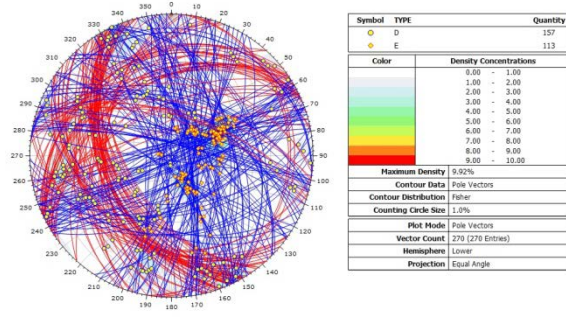


Figura N° 5: Tendencia de las Estructuras en la Formación Pariatambo-270 planos.

3.2 Comportamiento Geomecánico del Área de Investigación

Considerando la información de las geoestructuras como base para el análisis geomecánico, se realizó el procesamiento de los datos de campo tomados en los puntos de control, resultados que se encuentran en la investigación, obteniéndose los cálculos según la clasificación de Bieniaswki89 (Evert Hoek, 2007) y la data de salida del software RocData. Son datos base para el análisis e interpretación de inestabilidad de laderas, el RMR, cohesión (c) y ángulo de fricción (f) de la clasificación de Bieniawski89; y cohesión (c) y ángulo de fricción (f) de los resultados del RocData; los cuales al ser ingresados al software Slide en las secciones geológicas y realizar el procesamiento y calculo obtenemos como resultados los Factores de Seguridad con respecto a la inestabilidad de laderas en la zona Ronquillo, lugar donde puede producirse un deslizamiento de gran magnitud.

Después del análisis Geomecánico de cada formación geológica, obtenemos en la Tabla N° 2, que constituye la síntesis de los cálculos de los parámetros geomecánicos que serán utilizados en el cálculo del Factor de Seguridad (FS), utilizando las secciones geológicas en formato DXF. Como se observa en Tabla N° 2 existen diferencias importantes de la cohesión y el Angulo de fricción entre los valores mínimos y máximos de Bieniawski89 para las dos formaciones geológicas. Mayor es la diferencia del ángulo de fricción mínima de Bieniawski con respecto al ángulo de fricción del RocData en las Formaciones Pariatambo y Chulec, lo cual implicando tener mucho cuidado cuando se utilicen dichos valores en los cálculos y definir cuáles son los que proporcionen mayor seguridad.

Tabla N° 2: Análisis Comparativo de c y ϕ Promedios para la data de Bieniawski89 y RocData

Formaciones Geológicas Afectadas	BIENIAWSKI 89				ROC DATA: Recalculado		Diferencial Porcentual	
	Cohesión		Angulo de Fricción		Cohesión	Angulo de Fricción	C	ϕ
	C	ϕ	C	ϕ	C	ϕ		
Formación Pariatambo	167	287	22	34	379.25	35.5	24	5
Formación Chulec	164	307	21	36	457.57	38.9	33	8

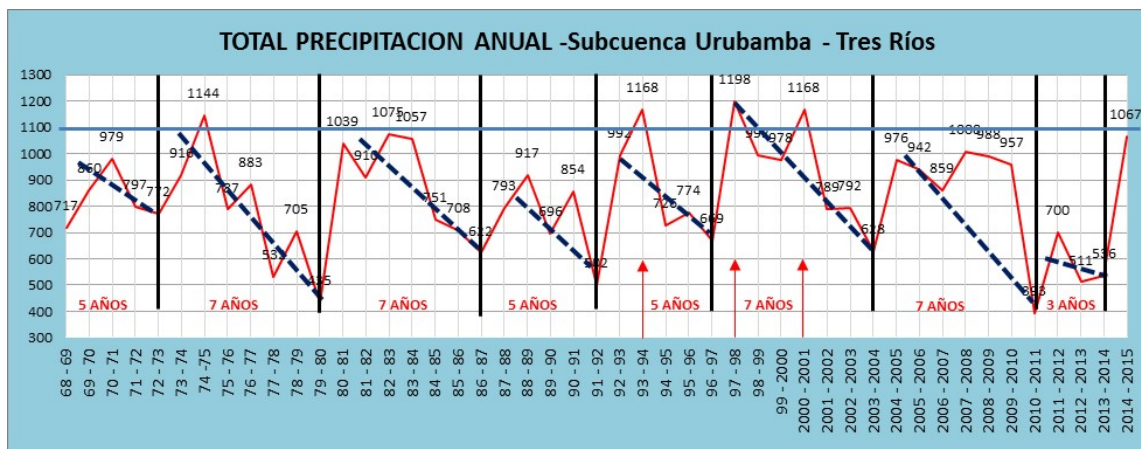


Figura N° 6: Líneas de Tendencia de la Precipitación Total Anual, en la Subcuenca Urubamba-Tres Ríos

3.3 Análisis de las Variables de Precipitación e Infiltración

La precipitación e infiltración son variables muy importantes en la inestabilidad de laderas, considerándose como variables detonantes. En la investigación se realizó el análisis de estas variables considerando los siguientes aspectos:

- Los datos fueron ordenados desde el mes de junio año anterior al mes de mayo del siguiente año para tener una mejor apreciación de la distribución, como se muestran en las 47 curvas de precipitación anual mensualizadas.
- Al analizar la data de los 47 años (1968-2015) los valores estadísticos nos indican que los años de mayor precipitación considerados años críticos serían 1974-1975, 1982-1983, 1983-1984, 1993-1994, 1997-1998, 2000-2001 y 2014-2015.
- La Figura N° 6 muestra el histórico de precipitaciones de los 47 años, donde es notorio los ciclos de 5, 7, 7, 5, 5, 7, 7 hasta el año 2011, volviéndose anómalo hacia el 2015.
- El balance hidrológico para la Subcuenca Tres Ríos para el periodo 1968-2015, según los ciclos de precipitaciones históricas nos proporciona una fuerte infiltración de 651.4 MMC, teniendo la probabilidad de infiltración 81.83 MMC para el área de investigación de 5.75 Km².
- Por la ocurrencia del deslizamiento Urubamba I el día 23 de marzo de 2001 y las tendencias de las precipitaciones se realizó el análisis de probabilidad empírica de una nueva ocurrencia similar mediante el método de Weibull $P(X \leq x) = \frac{x}{T}$, obteniéndose como probabilidad 0.0833 para un periodo de retorno de 12 años, es decir una ocurrencia en el año 2013, el cual no ocurrió posiblemente debido al cambio climático. La información de precipitaciones se obtuvo de la Estación Augusto Weberbauer (2015). Data de Precipitaciones 1968-2015.

3.4 Análisis de Inestabilidad de Laderas en la Zona Ronquillo

Al analizar los resultados de los Factores de Seguridad (FS) presentados en las Tablas N°s. 3, 4 y 5, referidas a las secciones geológicas AA', BB' y CC' (incluidas en la investigación), los valores para Bieniawski89 están entre 0.5 (Sección AA') hasta un máximo de 1.366

(Sección CC') y para RocData en las secciones (AA', BB') están entre 1.038 y 1.389; con excepcionalidad en la sección CC' se tiene tres valores un poco más altos entre 1.384 y 1.610.

Estos valores significan fuerte inestabilidad en las laderas del área de investigación y son el resultado de los cálculos realizados en las secciones AA', BB' y CC' utilizando el software Slide (Rocscience, 2015. Slide v6).

IV. CONCLUSIONES

- 1 Geoestructuralmente la zona de investigación presenta secuencias areniscosas, calcáreas, margosas y lutáceas, las cuales están fuertemente fracturadas debido a la confluencia de fallas regionales y locales, y meteorizadas por efecto de los procesos morfogenéticos.
- 2 El análisis geoestructural mediante el software Dips determinó que la dirección de los estratos tienen tendencia hacia el SW, con buzamientos promedios entre 20° y 40°, y otros buzando hacia el NE creando estructuras muy localizadas como anticlinales, sinclinales en las Formaciones Chulec, Pariatambo y microplegamientos en la Formación Yumagual.
- 3 En promedio, el 50% de discontinuidades desfavorables, están orientadas hacia el NE y SE, con dirección al río Tres Ríos y río Urubamba, posibilitando el flujo del agua subterránea hacia estos lugares, influyendo en la disminución de la magnitud de los parámetros geomecánicos.
- 4 Se ha cartografiado un paleodeslizamiento sin edad definida tipo cóncavo-cilíndrico con 500 metros de longitud y 50° de pendiente máxima, así mismo se tienen deslizamientos menores con pendientes entre 8° y 18° y un deslizamiento reciente del año 2001 en rocas de la Formación Pariatambo con 400 de longitud, 100 metros de ancho una escarpa principal de 15 metros.
- 5 La variable hidrológica demuestra que existe fuerte infiltración en la zona de investigación con precipitaciones en años críticos entre 1,000 y 1,200 mm, con la probabilidad que los flujos sigan las discontinuidades con direcciones NE y SE hacia el río Tres Ríos, controlando el comportamiento geomecánico de las Formaciones Chulec y Pariatambo, llegando a valores mínimos de Cohesión (c) de 167 KN/m² y Ángulo de Fricción (f) de 22°.

Tabla N° 3: Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide.
Parámetros Geomecánicos de Bieniawski89 y RocData- SECCION AA´

Cálculo de los Factores de Seguridad (FS) para la Sección AA´													
Formación		Parámetro Geomecánico			Nivel Freático	Coeficientes de Aceleración Sísmica		Factor de Seguridad FS					
Nombre	Código		C	ϕ	NF	Ko	Kv	Bishop Simplificado	Janbu Simplificado	Janbu Corregido	Spencer	Low-Karafiath	Morgenstern-Price
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Mínimo	100	20	Saturado	0.175	0.088	0.566	0.524	0.552	0.571	0.56	0.576
Pariatambo	pa		167	22	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		164	21	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Máximo	200	30	Saturado	0.175	0.088	0.946	0.885	0.93	0.959	0.94	0.963
Pariatambo	pa		287	34	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		307	36	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	RocData	350	32	Saturado	0.175	0.088	1.107	1.038	1.09	1.122	1.102	1.117
Pariatambo	pa		379.5	35.5	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		457.57	38.9	Saturado	0.175	0.088						

Tabla N° 4: Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide.
Parámetros Geomecánicos de Bieniawski89 y RocData- SECCION BB´

Cálculo de los Factores de Seguridad (FS) para la Sección BB´													
Formación		Parámetro Geomecánico			Nivel Freático	Coeficientes de Aceleración Sísmica		Factor de Seguridad FS					
Nombre	Código		C	ϕ	NF	Ko	Kv	Bishop Simplificado	Janbu Simplificado	Janbu Corregido	Spencer	Low-Karafiath	Morgenstern-Price
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Mínimo	100	20	Saturado	0.175	0.088	0.703	0.676	0.702	0.71	0.695	0.707
Pariatambo	pa		167	22	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		164	21	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Máximo	200	30	Saturado	0.175	0.088	1.167	1.083	1.142	1.179	1.148	1.177
Pariatambo	pa		287	34	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		307	36	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	RocData	350	32	Saturado	0.175	0.088	1.375	1.238	1.315	1.394	1.336	1.389
Pariatambo	pa		379.5	35.5	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		457.57	38.9	Saturado	0.175	0.088						

Tabla N° 5: Cálculo de los Factores de Seguridad con Software Slide. Parámetros Geomecánicos de Bieniawski89 y RocData- SECCION CC'

Cálculo de los Factores de Seguridad (FS) para la Sección CC'													
Formación		Parámetro Geomecánico			Nivel Freático	Coeficientes de Aceleración Sísmica		Factor de Seguridad FS					
Nombre	Código		C	ϕ	NF	Ko	Kv	Bishop Simplificado	Janbu Simplificado	Janbu Corregido	Spencer	Lowe-Karafiath	Morgenstern-Price
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Mínimo	100	20	Saturado	0.175	0.088	0.762	0.664	0.714	0.769	0.735	0.767
Pariatambo	pa		167	22	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		164	21	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	Bieniawski 89 Máximo	200	30	Saturado	0.175	0.088	1.341	1.184	1.27	1.366	1.31	1.366
Pariatambo	pa		287	34	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		307	36	Saturado	0.175	0.088						
Yumagual	yu	RocData	350	32	Saturado	0.175	0.088	1.577	1.384	1.489	1.61	1.543	1.609
Pariatambo	pa		379.5	35.5	Saturado	0.175	0.088						
Chulec	chu		457.57	38.9	Saturado	0.175	0.088						

- 6 Con los datos de campo se determinó el RMR de Bieniawski 89 para cada formación geológica, calculándose la Cohesión (c) y el Ángulo de Fricción (f) mínimo y máximo, y utilizando las secciones geológicas AA', BB' y CC' con el criterio de saturación del macizo y la aplicación de los Coeficientes de Sismicidad Horizontal (0.175) y Vertical (0.088) para la Zona 3 del país, se obtuvieron Factores de Seguridad (FS) entre 0.5 y 1.336, y con RocData en similares condiciones los FS están entre 1.038 y 1.610; definiéndose condiciones de inestabilidad de laderas.
- 7 El resultado final de la investigación proporcionó el Modelo Geológico-Geotécnico Operacional y el Modelo Geológico-Geotécnico Conceptual, los cuales servirán para realizar estudios de inestabilidad de laderas con preferencia en litologías calcáreas, areniscosas, lutáceas, margas y limolitas, permitiendo realizarlo en forma rápida y muy económica.

V. AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y los docentes que me apoyaron en la culminación de mi tesis de Maestría. En especial al Mg. Víctor Tolentino Y., Asesor de tesis, al Mag. Enrique Guadalupe y Mg. Hugo Rivera por sus consejos y apreciaciones para mejorar mi tesis.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Estación Augusto Weberbauer (2015). Data de Precipitaciones 1968-2015. Cajamarca-Perú. Universidad Nacional de Cajamarca.
- 2 Evert, Hoek (2007). *Practical Rock Engineering*. Consulting Engineer Inc. North Vancouver. Canadá.
- 3 Guzmán, A.& Núñez, S. (2004). *Inspección del Riesgo Geológico del Cerro Ronquillo-Cajamarca*. Lima-Perú. Ingemmet.
- 4 Hernández, R., Fernández, C.& Baptista L. (2010). Metodología de la Investigación. México. Edit. McGraw Hill.
- 5 Rocscience Inc. (2015). RocData.v5. Ontario-Canadá.
- 6 Rocscience Inc. (2015). Slide v6. Ontario-Canadá.
- 7 Tolentino, V. (2008). Modificado por Rodríguez, R. (2012-2014). *Registro Geológico-Geotécnico*. Lima-Perú. Formato en el Anexo 01.