

# Evaluación geodinámica y modelamiento geotécnico del deslizamiento de Madrigal–Arequipa

Geodynamics evaluation and geotechnic modelling of Madrigal landslide – Arequipa

Juan Carlos Gómez Avalos<sup>1</sup>, Enrique Guadalupe Gómez<sup>2</sup>, Ciro Bedia Guillén<sup>2</sup>, Néstor Chacón Abad<sup>2</sup>

Recibido: 17/02/2017 - Aprobado: Diciembre 2015

---

## RESUMEN

El distrito de Madrigal, Provincia de Caylloma, Arequipa, es afectado por un deslizamiento rotacional que se activó desde 1959 y que actualmente muestra un alto peligro y por ende niveles de vulnerabilidad física altos. Esta localidad se asienta sobre suelos de cimentación finos de origen lacustre.

Estudios de fotointerpretación de fotos aéreas de los años 1955, 1970 y 1997 determinaron que en casi 50 años el deslizamiento de Madrigal incrementó el área inestable en 0.6 km<sup>2</sup>.

El deslizamiento del tipo rotacional que afecta la seguridad física de Madrigal involucra un 70% del área del distrito. Monitoreos geodésicos con GPS y EDM entre los años 2001 al 2014 se establecieron tasas de desplazamiento entre 0.3 a 0.4 m respectivamente.

El análisis de estabilidad en los sectores Ushina y Pullhuay arrojan valores de Factor de Seguridad (FS) menores a 1 en condición estática y pseudoestática y modelamiento numérico arrojan que la parte media y baja de Madrigal se encuentra en condición inestable crítica.

Para la reducción de la vulnerabilidad se propone realizar un drenaje de coronación de 500 m a la altura de la cota 3290 m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3090 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja. En la parte media se proponen banquetas con sistema de drenaje para disminuir la carga hidráulica.

**Palabras clave:** geodinámica, deslizamientos, geodesia, geotecnia.

## ABSTRACT

The district of Madrigal, Province of Caylloma, Arequipa, is affected by a rotational slip that has been activated since 1959 and which currently shows a high danger and therefore levels of high physical vulnerability. This locality is based on fine foundation soil of lacustrine origin. Studies of photointerpretation of aerial photos of the years 1955, 1970 and 1997 determined that in almost 50 years the landslide of Madrigal increased the unstable area by 0.6 km<sup>2</sup>. The sliding rotational type that affects the physical safety of Madrigal involves 70% of the area of the district. Geodetic monitoring with GPS and EDM between 2001 and 2014 displacement rates were established between 0.3 and 0.4 m respectively.

---

<sup>1</sup> Maestría FIGMMG-UNMSM. Email: jcga20@hotmail.com

<sup>2</sup> Docente de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas, Metalurgia y Geografía de la UNMSM. Email: eguadal@unmsm.edu.pe; cbedia@unmsm.edu.pe

The stability analysis in the sectors Ushina and Pullhuay yields values of Safety Factor (FS) less than 1 in static and pseudo-static condition and numerical modeling show that the middle and lower part of Madrigal is in critical unstable condition.

To reduce vulnerability, a crowning drainage of 500 m is proposed for the height of the 3290 m height, a stabilizing filler at the foot of the main escarpment (dimension 3090 m) and a gabion type support structure in the bottom. In the middle part, there are benches with a drainage system to reduce the hydraulic load.

**Keywords:** geodynamics, landslides, geodesy, geotechnics.

## I. INTRODUCCIÓN

La región de Arequipa, particularmente el valle del río Colca, muestra evidencias de una fuerte actividad sísmica, volcánica y fenómenos geológicos peligrosos.

Como producto de estas actividades, se han desencadenado en el Colca fenómenos geodinámicos de gran magnitud, tal como un represamiento y la formación de un gran lago durante el pasado geológico reciente, aquí denominado «Lago Colca». Este gran Lago se desembalsó, aparentemente rápida y repentinamente, con efectos desastrosos aguas abajo (Ocola & Gómez 2005b).

Esta situación generó que en esta parte del valle quedaran como evidencias de ese gran lago, un gran volumen de materiales lacustres depositados en ambas márgenes del río Colca, donde actualmente se asientan poblados como Lari, Maca y Madrigal. Esta composición predominante de materiales finos en los suelos de cimentación aunados a las labores antrópicas de agricultura que se desarrollan desde el tiempo de los Incas en la zona y la alta sismicidad, han dado como consecuencia la generación de movimientos de masa activos y recurrentes en esta zona que amenazan la seguridad física de los poblados anteriormente citados (Zavala & Fidel, 1994).

De los estudios geológicos realizados en la zona por anteriores investigadores y el suscrito se reconocieron depósitos lacustres que tipificaron la existencia de un paleolago de 40 km de longitud y 2 km de ancho máximo entre las localidades de Pinchollo y Yanque, en el curso presente del río Colca. A este lago se le ha denominado «Lago Colca» (Ocola et al, 2004).

Se infiere que el Lago Colca fue formado por el represamiento repentino debido a una

avalancha muy grande proveniente del nevado Hualca Hualca.

El área de estudio que se muestra en la Figura N°1, está ubicada a 31 km. al Oeste de Chivay, en el distrito de Madrigal, provincia de Caylloma, Región Arequipa. La ubicación está delimitada por las siguientes coordenadas UTM:

Hemisferio : Sur  
Zona : 19  
Datum : WGS 84  
Coordenadas : 178000, 8260000  
216000, 8280000



Figura N° 1: Vista panorámica del deslizamiento de Madrigal que afecta la seguridad física del poblado del mismo nombre.

Los estudios geodinámicos realizados en la zona de Madrigal y alrededores, concluyen que existen eventos (derrumbes, deslizamientos, huaycos, flujos hiperconcentrados, avalanchas, etc.) de gran magnitud, como los que originaron del Paleolago Colca, que han ocurrido en este valle y han condicionado su morfología actual.

A lo anterior debe añadirse que la actividad turística, es la segunda actividad productiva de la región Arequipa (después de la minería). Esta actividad se ha incrementado notoriamente en la zona del valle del Colca, por su gran belleza natural y paisajística.

A inicios del año 2000 arribaron cerca de 90,000 turistas y en el año 2015 bordean los 500,00 turistas, representa 1/3 de los ingresos de la Región. Por tanto, se requiere conocer las características geodinámicas de esta zona a fin de reducir la vulnerabilidad de la infraestructura y patrimonio cultural frente a probables desastres por ocurrencia de eventos de origen natural que pudieran generarse en el área (Palacios y Gómez, 2008).

El poblado de Madrigal presente alta vulnerabilidad ante movimientos en masa por lo descrito en párrafos anteriores, que se ve incrementada por acciones antrópicas, como es el deficiente manejo de los recursos hídricos para las labores agrícolas por lo que actualmente todo el borde de las terrazas que dan al río Colca están afectados por deslizamientos rotacionales que amenazan en la actualidad ya un 70% de la parte urbana-rural del distrito (Gómez, 2010).

Asimismo, se requiere conocer las tasas de movimiento y las direcciones (vectores) con la finalidad de zonificar las áreas de mayor peligro para una probable reubicación de un sector de la población de esta localidad. Esto fue posible mediante un modelamiento geotécnico usando elementos finitos.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se ha dividido en tres etapas:

- Recopilación de la información existente: Consistió en buscar toda la información referente a la zona de estudio y a las actividades que debían desarrollarse en la misma. Esta etapa se desarrolló en diversas instituciones de Lima y Arequipa.
- Análisis fotogramétrico de fotografías aéreas vuelo SAN del año 1997 delimitándose los deslizamientos existentes y su posterior comprobación en campo.

Trabajo de campo. Se realizaron las siguientes actividades:

- Levantamiento topográfico a escala 1:15,000 con estación total de la zona de estudio.
- Mapeo geológico estructural,

delimitación de deslizamientos y manantiales a escalas 1:35000.

- Cartografiado geodinámico a escala 1/35,000
- Recolección de muestras de suelos para ensayos geotécnicos.
- Monitoreo Geodésico Satelital, que consistió en el control de puntos GPS en la zona de estudio, los cuales fueron ubicados en el año 2001 como parte de un proyecto IGP- CONCYTEC.
- Investigación geofísica 10 sondajes eléctricos verticales en la zona del deslizamiento en Madrigal.
- Vigilancia geodésica del deslizamiento mediante puntos de control EDM (medidas con distanciómetro electrónico).

Trabajo de gabinete: consistió en las siguientes actividades:

- Realización de los ensayos de las muestras de suelos en laboratorio de mecánica de suelos de la UNAS (Arequipa) y UNALM (Lima), para su posterior interpretación de resultados.
- Elaboración de base topográfica: Se ha utilizado la topografía digital del Catastro Rural del Ministerio de Agricultura a escala 1/25,000, que ha sido complementada con la topografía obtenida a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDT) con resolución de 30 m descargado de [www.astergdem.com](http://www.astergdem.com). Esta información ha sido georeferenciada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se ha trabajado en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y Datum WGS 84 (Sistema Geodésico Mundial 1984), Zona 18 S.
- Elaboración del Modelo Digital del Terreno (MDT): Es una representación digital de la superficie terrestre que permite reconocer las geoformas presentes en el área de estudio, teniendo en cuenta la elevación del terreno (m.s.n.m); se obtiene en base a la restitución fotogramétrica, a escala 1:5000 que se realizó en el área de estudio, con coordenadas UTM, resolución espacial de 5 m y con referencia al geoide WGS 84, la cual se referencia con el SIG.

En base al MDT elaborado para Madrigal se obtiene que la zona urbana se asienta sobre terrazas fluvio-aluvionales que presentan una cota promedio entre los 2100 y 2900 m.s.n.m, El MDT se utilizó para el modelamiento numérico del deslizamiento de Madrigal.

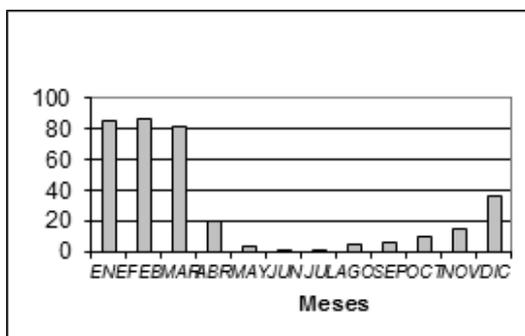
Elaboración del mapa de pendientes: Mapa temático que mediante un sistema gráfico digital representa los diferentes grados de desnivel (inclinación de una superficie respecto a la horizontal de un territorio) del terreno.

Consiste en representar mediante colores zonas del terreno con pendiente semejante, por lo tanto, el objetivo de este mapa es reconocer las distintas geoformas presentes en el terreno a través de la pendiente que presenten. Se obtiene en base a la aplicación de la rutina SPATIAL ANALYST del software SIG, usando como archivo fuente el MDT generado anteriormente.

•

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La hidrología general de la zona tiene como principal colector al río Colca que nace a 4886 msnm en las inmediaciones de Condorama (límite Arequipa-Cusco) y desemboca en el Océano Pacífico donde toma el nombre de río Ocoña. Se analizó el parámetro de precipitación como uno de los desencadenantes de los movimientos en masa que ocurren en el valle del río Colca, denotándose que la precipitación promedio en el período 2012-2015 en la estación meteorológica en Madrigal es de 346 mm anuales, siendo los meses más lluviosos de octubre a marzo Figura N° 2.



**Figura N° 2:** Promedio de precipitación anual en Madrigal, período 2012-2015

- Los principales agentes modeladores del relieve actual en el valle del río Colca es la actividad glaciaria en la parte alta de la cuenca, zona de montañas, los procesos gravitatorios en zonas de alta y moderada pendiente y el agua en las zonas de quebradas y el colector hidrológico principal de la cuenca que es el río Colca. Estos agentes junto a la geodinámica activa de la zona han dado lugar a un paisaje agreste y complejo en la zona como son terrazas, colinas de acumulación, zona de valle represado y valle cañón, entre las principales geoformas identificadas.
- En la geomorfología y geología de la localidad de Madrigal, destacan las unidades litológicas reconocidas cuyas edades de emplazamiento van desde el Mesozoico hasta el Cuaternario Reciente. Así se tiene afloramientos del Grupo Yura: Formaciones Labra y Huachuani durante el Jurásico y Cretáceo, ya en el Cenozoico predominó el emplazamiento de cuerpos volcánicos donde destacan los afloramientos del Grupo Tacaza, Mismi, Barroso y Colca, este último en el Cuaternario y ya en el período Reciente los depósitos aluviales, fluviales y coluviales, Figura N° 3.



**Figura N° 3:** Afloramientos del Grupo Yura en la parte baja de Madrigal en inmediaciones del río Colca.

En relación a la geomorfología se describen básicamente cuatro unidades geomorfológicas diferenciadas: unidad laderas, planicies altas, valle represado y valle cañón, Figura N° 4.

La geodinámica interna de la zona de estudio incluye el análisis del vulcanismo y la sismicidad asociada a éste y en general al proceso de subducción que ejerce la placa de Nazca sobre la Sudamericana.



**Figura N° 4:** Zona del valle Cañón a la altura de la Cruz del Cóndor -Cabanaconde

- Regionalmente el área estudiada está enmarcada por dos complejos volcánicos: Cordillera Volcánica del Chila en la margen derecha del río Colca y el Complejo Volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca en la margen izquierda, ambos forman parte de la Franja volcánica Cenozoica de la Cordillera Occidental. Desde el año 1981 el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca presenta actividad sísmica recurrente cuyos focos sísmicos se distribuyen desde Pampa Sepina, extremo norte del Volcán Hualca Hualca a la altura de los poblados de Achoma y Yanque hasta las inmediaciones de Cabanaconde en el extremo occidental de esta parte del valle del río Colca. Los sismos registrados en el período 1986-1996 por el IGP reporta eventos de magnitud de hasta 6.2 Ms, uno de estos eventos en el año 1990 afectó severamente a la localidad de Maca y alrededores.
- Se utilizó el método de prospección geofísica: resistividad eléctrica, con el objetivo de determinar la profundidad del nivel freático en la zona que es la causa de la sobresaturación de los materiales y pérdida de resistencia que da lugar a la ocurrencia de los movimientos en masa que afectan Madrigal, Figura N° 5. Como resultados

se obtuvo que la napa freática en Madrigal se encuentra a una profundidad promedio de 12-13 m y que en el subsuelo se diferenciaron hasta 4 capas: material de cobertura, suelo arenoso arcilloso, suelo gravoso y bloques fracturados como probable basamento.

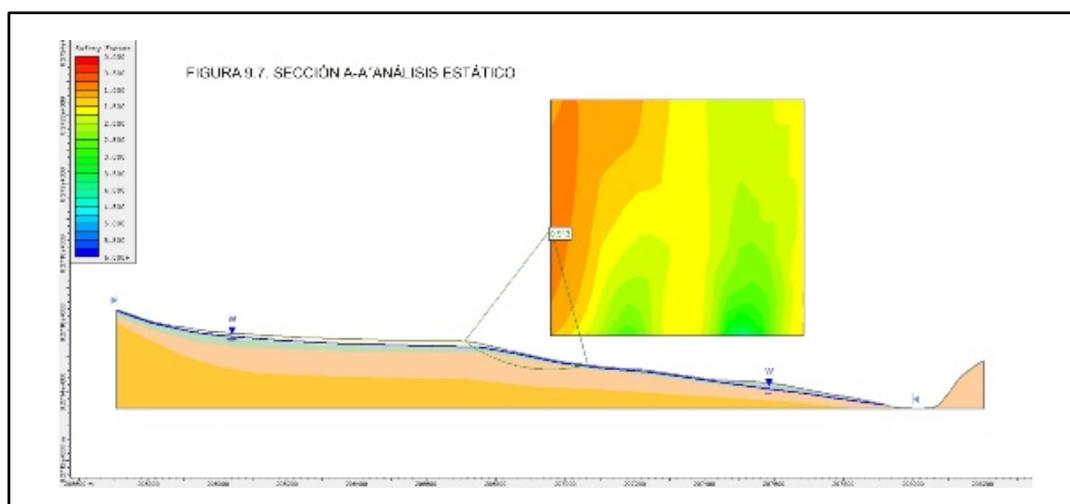


**Figura N° 5** Mediciones de resistividad eléctrica en Madrigal.

- Los parámetros geotécnicos en la zona de Madrigal se obtuvieron en base a una campaña de excavaciones (calicatas) realizadas en la zona. Se realizaron 9 calicatas distribuidas en toda la localidad de Madrigal con el objetivo de conocer el tipo de suelo de cimentación, sus propiedades físicas y capacidad portante de los mismos. En lo que respecta al análisis de estabilidad de taludes se aplicó lo utilizado para modelo de falla circular en suelos, de acuerdo a la teoría de equilibrio límite. Se utilizó el modelo de Bishop simplificado cuyo algoritmo de cálculo se encuentra dentro de las librerías del programa SLIDE que permite hacer este tipo de análisis en modo estático y pseudoestático.
- Se utilizaron dos secciones transversales a los deslizamientos de Ushina y Pullhuay: A-A' y B- B' respectivamente, donde se obtuvieron valores del Factor de Seguridad en modo estático y dinámico menores a 1, lo que ratifica la condición de inestable de estas laderas, Figura N° 6.
- En base al análisis de estabilidad de los taludes y las propiedades físicas y dinámicas de los suelos de cimentación en Madrigal se elaboró un modelo numérico mediante la técnica de elementos finitos que incluye previamente la elaboración de un

modelo digital del terreno y el cálculo de las pendientes con el MDT elaborado, todo esto utilizando el lenguaje Octave, bajo la plataforma Matlab, obteniendo un modelo similar a lo que se obtiene con el programa QUAKE, que al final permite hacer un análisis dinámico de la estabilidad de taludes por elementos finitos, obteniéndose la variación del factor de seguridad durante un sismo y la deformación permanente que sufrirá la masa inestable, ambas para cada una de las superficies de falla analizadas. La simulación numérica arroja como resultados una deformación del talud en la parte superior, en la parte media de las lagunas también aumenta la zona de acumulación, en cambio en la parte baja muestra la deformación del terreno en función a los agrietamientos que se presentan, Figura N° 7.

- Se realizó un monitoreo geodésico realizado en el deslizamiento de Madrigal, el cual se utilizó el método geodésico satelital (GPS) y las mediciones con distanciómetro electrónico (EDM).
- Las mediciones con GPS se realizaron en el período 2001-2004 con 4 puntos de control dentro del deslizamiento mediante GPS Trimble de doble frecuencia, mostrando desplazamientos de 0.5 m en promedio en las tres componentes (norte-sur, este-oeste y vertical).
- Las mediciones con EDM se hicieron en el período 2007-2011, en 20 puntos de control desde dos bases localizadas en la otra margen del río Colca (fuera del deslizamiento) obteniéndose un movimiento promedio entre 0.40 a 0.70 m.
- La vulnerabilidad física de Madrigal y las medidas de mitigación que deben realizarse para la reducción de la vulnerabilidad en esta localidad. Las alteraciones de la naturaleza por el uso territorial y la actividad antrópica son factores importantes en el análisis de la gestión del riesgo de desastres en esta localidad.
- Uno de los factores de la alta vulnerabilidad de Madrigal son los suelos de cimentación sobre los que se asienta este poblado, que son heterogéneos que varían entre arenas limosas y conglomerados provenientes de depósitos aluviales y lacustres con baja capacidad portante. A esto se auna la profundidad del nivel freático a unos 12-13 m de profundidad que genera sobresaturación y pérdida de resistencia de estos suelos.
- Los procesos antrópicos son también parte importante de este análisis de la vulnerabilidad, puesto que los inadecuados sistemas de regadío en la zona generan una infiltración importante en los suelos de cimentación que afectan su resistencia.



**Figura N° 6:** Análisis de estabilidad en Madrigal cuyo Factor de Seguridad obtenido es menor a 1.

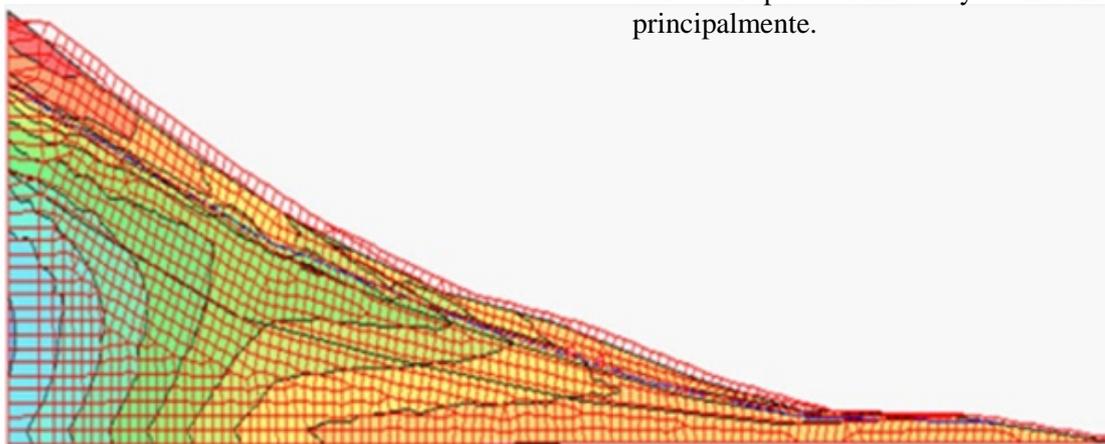
Como medidas de mitigación se proponen de dos tipos: estructurales y no estructurales: Entre las medidas de mitigación estructural se propone lo siguiente: Realizar un drenaje de coronación de 500 m. de longitud, a la altura de la cota 3340 m, un relleno estabilizador a la altura del pie de la escarpa principal (cota 3235 m) y una estructura de sostenimiento tipo gaviones en la parte baja con base en la zona aledaña al cauce del río Colca, en la cota 2650 msnm, Figura N° 8. Entre las medidas de mitigación no estructural se propone lo siguiente: Capacitación en gestión de riesgo de desastres de la población de Madrigal a cargo de las entidades conformantes del Sistema Nacional de Gestión de Riesgo (SINAGERD) tal es el caso del CENEPRED, INDECI, INGEMMET, IGP, entre otras.

#### IV. CONCLUSIONES

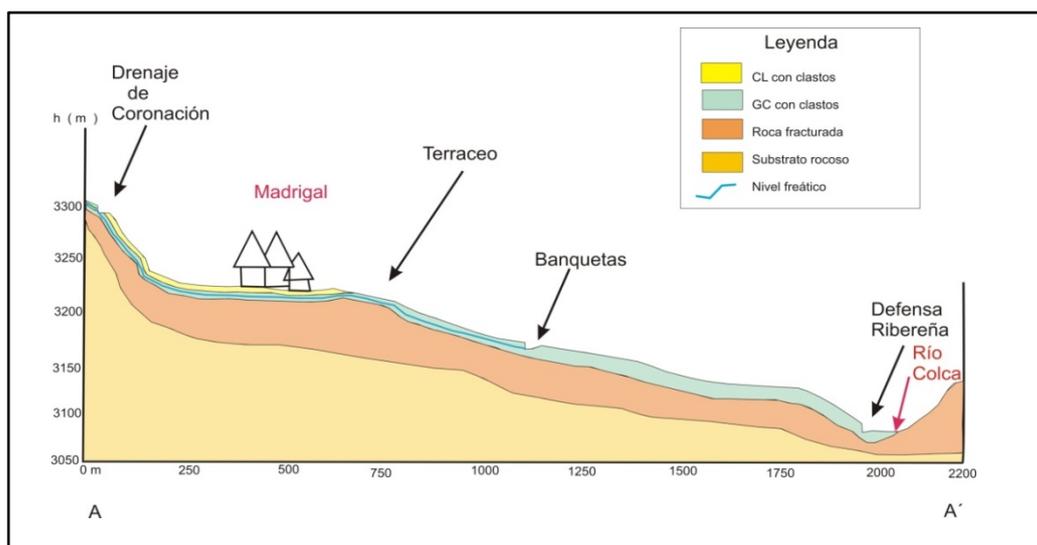
1. La geodinámica en la localidad de Madrigal tiene como antecedente la ocurrencia de un evento geológico extremo que cambió la configuración morfológica del valle del río Colca, la avalancha de escombros por el colapso de la ladera Norte del volcán Hualca Hualca, este evento represó las aguas del río Colca y conformó un gran paleolago, luego de la desaparición de este, quedaron como evidencia los depósitos lacustres, que conforman los suelos de cimentación de esta localidad.

Sobre estos suelos se han originado deslizamientos recurrentes, de tipo rotacional. La escarpa principal muestra un salto promedio de 20 a 25 m y una longitud aproximada de 2100 m.

2. Los estudios geofísicos realizados en Madrigal fueron utilizando el método de resistividad eléctrica que permitieron delimitar la napa freática a una profundidad promedio de 12-13 m y en el subsuelo delimitar hasta 4 capas: cobertura, suelo areno arcilloso, suelo gravoso y bloques fracturados como probable basamento.
3. El análisis de estabilidad del deslizamiento de Madrigal en base a las investigaciones geotécnicas y los estudios geofísicos arrojó que en estado estático resultó un FS de 0.8 y en estado pseudoestático un FS de 0.5 en promedio.
4. El modelado geotécnico basado en el método de elementos finitos arroja como resultado una deformación del talud en la parte superior entre la cota 3265m. y 3250 m, en la parte media de las lagunas también aumenta la zona de acumulación entre las cotas 3210 m. y 3180 m, en cambio en la parte baja muestra la deformación del terreno en función a los agrietamientos que se presentan entre las cotas 3145 m. y 3080 m.
5. La geología local en la zona la conforman una cobertura superficial conformada principalmente por depósitos Cuaternarios de origen fluvio- aluvial, con un substrato rocoso volcánico de naturaleza traquiandesítico del Grupo Colca y Tacaza principalmente.



**Figura N° 7:** La malla generada usando elementos finitos (en color rojo) muestra la deformación de la ladera afectada por la dinámica del deslizamiento.



**Figura N° 8:** Perfil que muestra las soluciones ingenieriles para la reducción de la vulnerabilidad en Madrigal.

6. La geomorfología en las inmediaciones de Madrigal la conforma un sistema de terrazas, la zona próxima al cañón (laderas empinadas) y la zona de montañas y la zona de valle represado.
7. Las investigaciones geotécnicas (calicatas) permitieron diferenciar cinco tipos de suelos: GP- GC, SC y ML principalmente, los granulares en las inmediaciones del río Colca, los limosos en las zonas agrícolas y los areno arcillosos en las inmediaciones de la parte urbana.
8. Se realizaron dos tipos de monitoreos geodésicos en el deslizamiento de Madrigal: El primero con GPS de doble frecuencia en el período 2001-2004 con desplazamientos de hasta 0.50 m en las componentes N-S, E-W y vertical. El segundo utilizando distanciómetro electrónico en el período 2007-2011 con tasas de movimiento entre 0.4 a 0.7 m.

## V. AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Geofísico del Perú, por permitir utilizar su base de datos para la presente investigación. A los docentes de la FIGMMG Guadalupe, Bedia y Chacón por su valioso aporte en la investigación presentada. Al Instituto de Investigación (IIGEO) por permitir presentar esta investigación.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gómez J. (2010). *Mediciones GPS en el deslizamiento de Madrigal, Valle del Río Colca-Arequipa*. Publicación interna IGP.
2. Ocola L., J. C. Gómez, J. L. Macías, C. Siete & F. COF. (2004). Informe Final: *Paleoeventos geológicos en el Sector Medio del Valle del Colca Arequipa (entre Sibayo y Cabanaconde) y peligros geológicos asociados*. Proyecto No. 075-CONCYTEC-IGP. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica, Instituto Geofísico del Perú y CONCYTEC, Lima, Perú.
3. Ocola L. & Gómez J. (2005b). *Memorias sobre el Peligro Geológico en el valle del río Colca- Arequipa*. Publicación interna IGP.
4. Palacios D. & Gómez J. (2008). *Caracterización de avalanchas de escombros en los valles de los ríos Colca y Cotahuasi – Arequipa*. Sociedad Geológica del Perú. Resúmenes extendidos Congreso de Geología. Lima.
5. Zavala B. & Fidel L. (1994). *Estudio Geodinámico del Valle del río Colca*, Boletín Serie C Estudios Geodinámicos. INGEMMET, Lima.