



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UTILIZACIÓN DE PIEZÓMETROS PARA EL MONITOREO
DE LOS NIVELES FREÁTICOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA LADERA SURESTE DEL
PROYECTO RESIDENCIAL LOMAS DE SAN ISIDRO, ZONA 16, GUATEMALA**

Paola del Rosario Turcios

Asesorado por el MSc. Ing. José Alberto Pérez Zarco

Guatemala, abril de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTGACIÓN DE UTILIZACIÓN DE PIEZÓMETROS PARA EL MONITOREO DE
LOS NIVELES FREÁTICOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA LADERA SURESTE DEL PROYECTO
RESIDENCIAL LOMAS DE SAN ISIDRO, ZONA 16, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PAOLA DEL ROSARIO TURCIOS

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ ALBERTO PÉREZ ZARCO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

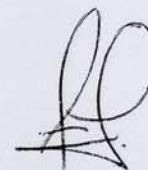
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UTILIZACIÓN DE PIEZÓMETROS PARA EL MONITOREO DE
LOS NIVELES FREÁTICOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA LADERA SURESTE DEL PROYECTO
RESIDENCIAL LOMAS DE SAN ISIDRO, ZONA 16, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 26 de febrero de 2014.



Paola del Rosario Turcios



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



MOD-MGEPP-0001-2014

10 00 1 48

Guatemala, 26 de febrero de 2014.

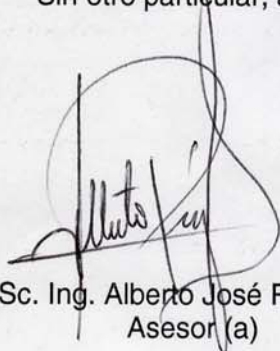
Director:
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
Escuela de Ingeniería Civil
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Paola del Rosario Turcios** con carné número **2005-11665**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría en Ingeniería Geotécnica**.

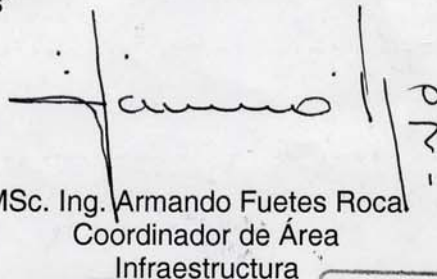
Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,



MSc. Ing. Alberto José Pérez Zarco
Asesor (a)

"Id y enseñad a todos"



MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Área
Infraestructura

Alberto José Pérez Zarco
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 5701




Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado

ARMANDO FUENTES ROCA
Ingeniero Civil
Col 2999

Cc: archivo
/db



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
 2 de abril de 2014
 Ref. IC. 020.14

Ingeniero
 Hugo Humberto Rivera Pérez
 Secretario Académico
 Facultad de Ingeniería
 Guatemala

Ingeniero Rivera.

De manera atenta informo a usted que la estudiante Paola del Rosario Turcios, Carnet No. 200511665, ha cumplido con el proceso de graduación de Licenciatura mediante la modalidad "Estudio de Postgrado", presentando a esta Dirección de Escuela el DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UTILIZACIÓN DE PIEZÓMETROS PARA EL MONITOREO DE LOS NIVELES FREÁTICOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA LADERA SURESTE DEL PROYECTO RESIDENCIAL LOMAS DE SAN ISIDRO, ZONA 16, GUATEMALA, asesorado por el Msc. Ing. José Alberto Pérez Zarco, debidamente aprobado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, por lo que en calidad de Director de la Escuela de Ingeniería Civil, doy mi visto bueno para continuar con el procedimiento correspondiente.

Sin otro particular me suscribo de usted.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Hugo Leonel Montenegro Franco
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
 Director de Escuela de Ingeniería Civil



Mas de ~~134~~ ¹³⁴ años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE UTILIZACIÓN DE PIEZÓMETROS PARA EL MONITOREO DE LOS NIVELES FREÁTICOS Y DEL DESPLAZAMIENTO DE LA LADERA SURESTE DEL PROYECTO RESIDENCIAL LOMAS DE SAN ISIDRO ZONA 16, GUATEMALA**, presentado por la estudiante universitaria: **Paola del Rosario Turcios**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Reginos
Decano



Guatemala, abril de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi guía y darme la oportunidad de culminar esta meta.
- Mis padres** Matilde Turcios, por ser una mujer luchadora y mi ejemplo a seguir y por animarme a continuar y Mario Flores, por su apoyo incondicional siempre.
- Mi hermano** Mario Fernando Turcios, por su amor y ayuda en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por formarme como profesional y como persona.
Facultad de Ingeniería	Por enseñarme a ser un profesional de bien y trabajar por mi país.
Proyectos y Desarrollo de Construcción, S. A.	Por facilitarme y apoyarme con los recursos para el desarrollo de la presente investigación.
Ing. José Alberto Pérez Zarco	Por su ayuda y asesoría en el presente trabajo de graduación.
Mis amigos	Mariano Gutiérrez, Andrea Mencos, Alejandra Maldonado, Pedro Estrada, Adriana Madrid, Ingrid Madrid, Jorge Perussina, German Jerez y todos aquellos que fueron parte de esta etapa.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS	7
4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	9
5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	13
6. ALCANCE	15
7. MARCO TEÓRICO.....	17
7.1. Inestabilidad de laderas.....	17
7.1.1. Caídos o derrumbes	17
7.1.2. Flujos	18
7.1.3. Deslizamientos	20
7.1.4. Expansiones o desplazamientos laterales	21
7.2. Factores que influyen en la inestabilidad de laderas	22
7.2.1. Factores característicos de la ladera	22

7.2.2.	Factores externos.....	23
7.3.	Agua subterránea y su afectación en la inestabilidad de las laderas	24
7.4.	Investigación geotécnica en laderas	25
7.4.1.	Ensayos de campo	27
7.5.	Instrumentación geotécnica	29
7.5.1.	Sistema de medidas de presión intersticial	30
7.5.1.1.	Piezómetros.....	31
7.5.2.	Sistema de medidas de desplazamientos horizontales	32
7.5.2.1.	Estudio topográfico.....	33
7.5.2.2.	Presentación de los datos topográficos...	35
8.	HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN.....	37
8.1.	Definición de las variables	37
9.	CONTENIDO	39
10.	MÉTODOS Y TÉCNICAS	43
10.1.	Estudio	43
10.2.	Fase 1: investigación preliminar.....	44
10.3.	Fase 2: trabajos de gabinete.....	50
10.4.	Fase 3: análisis de correlaciones	51
10.5.	Fase 4: técnicas de investigación	51
11.	RESULTADOS ESPERADOS	53
12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	55

13.	RECURSOS NECESARIOS.....	57
13.1.	Recursos físicos	57
13.2.	Recursos financieros.....	57
14.	BIBLIOGRAFÍA	59
15.	ANEXOS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Desprendimientos	18
2.	Vuelcos	18
3.	Flujos.....	19
4.	Deslizamientos traslacionales	20
5.	Deslizamientos rotacionales.....	21
6.	Avalanchas.....	21
7.	Desplazamientos laterales	21
8.	Muestreador de tubo partido para ensayos de penetración	27
9.	estándar	27
10.	Monitoreo topográfico mediante nivelación y colimación	35
11.	Ubicación preliminar de los piezómetros.....	45
12.	Detalle de piezómetro	47
13.	Medidor del nivel de agua, modelo 101.....	48
14.	Cronograma de los meses 1 al 4	55
15.	Cronograma de los meses 5 al 8	56

TABLAS

I.	Penetración estándar versus densidad relativa de arenas.....	28
II.	Penetración estándar versus consistencia de arcillas	28
III.	Registro de mediciones del nivel freático	49
IV.	Registro de mediciones topográficas	49
V.	Recursos financieros.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ϵ_t	Error aleatorio de los elementos considerados en el modelo de correlación (adimensional).
β_1	Impacto en el nivel freático en el desplazamiento (metros).
β_0	Nivel inicial del desplazamiento (metros).
R_u	Resistencia no drenada (toneladas por pie cuadrado).

GLOSARIO

Agua subterránea	Agua que se encuentra en la zona saturada, es decir, la que se encuentra debajo del nivel freático.
Desplazamientos	Movimientos de masas de tierra o de rocas que se encuentran en pendiente.
Instrumentación	Método o técnica de control geotécnico.
Ladera	Declive lateral de una montaña, cuya pendiente es el ángulo que forma con la horizontal.
Nivel freático	Superficie superior de la zona de saturación.
Piezómetro	Instrumentos utilizados para medir la presión de poro.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como foco de estudio el análisis del desplazamiento de la ladea sureste del proyecto residencial Lomas de San Isidro, zona 16, Guatemala, en función de la variación de los niveles freáticos de la zona. El objetivo del estudio será determinar si la fluctuación de los niveles es la causante del desplazamiento de la ladera y si la metodología propuesta nos ayuda a determina dicha relación.

En el desarrollo de la investigación se analizarán las variables mencionadas por medio de una campaña de instrumentación geotécnica, en la que se propone el monitoreo del nivel freático por medio de la instalación de piezómetros y el registro del desplazamiento superficial a través de puntos fijos o bancos de marca fijados para toda la investigación, los cuales serán medidos desde un punto fijo localizado en un área estable.

El monitoreo del sistema de instrumentación se realizará en un período de seis meses, realizándose medidas piezométricas quincenales y medidas topográficas mensuales. Los registros obtenidos serán analizados por medio de un modelo de correlación, con el fin de determinar el grado de influencia de la variación del nivel freático en los desplazamientos.

Además se relacionarán los resultados obtenidos de las correlaciones con la estratificación del suelo encontrado en el área en estudio.

1. INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de las laderas es la ocurrencia de movimientos pendiente abajo de masas de suelos y rocas que pueden causar pérdidas humanas y/o materiales. En la mayoría de los casos, los deslizamientos suceden por causas naturales como lluvias intensas y prolongadas, sismos fuertes, actividad volcánica o la combinación de dichos factores. También pueden ser provocados por causas antropogénicas, es decir inducidas por el hombre, cuando no se estudian y prevén las implicaciones de la ejecución de un corte para la construcción de una obra en el que pueden ocurrir fallas en las laderas.

Es importante tener en cuenta que el monitoreo de laderas puede detectar manifestaciones tempranas de inestabilidad, con lo que es posible reducir los desastres asociados a dicha situación.

En el 2013, en Lomas de San Isidro, zona 16 de la ciudad de Guatemala, se estaba llevando a cabo la urbanización en la que se han identificado grietas tensionales en el suelo del lado sureste debido al desplazamiento de la ladera colindante.

Se considera necesario un estudio y análisis de la ladera, así como una campaña de medición de los niveles freáticos con la instalación de piezómetros que evalúen estas fluctuaciones en un tiempo determinado, y un monitoreo con mediciones topográficas del desplazamiento de la ladera.

Con los registros obtenidos en esta investigación se presentarán los datos arrojados en las mediciones de los piezómetros y las topográficas, así como su respectiva correlación, para evaluar si las fluctuaciones del nivel freático afectan el desplazamiento de la ladera.

Este estudio presenta en el primer capítulo las definiciones generales de la inestabilidad en las laderas; en el segundo, se amplía el tema de instrumentación geotécnica para laderas y se describe el sistema empleado en la investigación del desplazamiento de la ladera sureste del proyecto residencial Lomas de San Isidro, zona 16 de la ciudad de Guatemala. En el capítulo tercero se describe la metodología utilizada para la medición y se presentan los datos obtenidos; finalmente, en el capítulo cuarto, se analizan y presentan los resultados de la investigación, así como la interpretación de la información.

Para finalizar, con este trabajo se espera determinar por medio de los resultados de la investigación de campo si la herramienta empleada es de utilidad para la medición de las fluctuaciones del nivel freático y del desplazamiento de la ladera, para ofrecer una alternativa frente a problemas similares, así como proporcionar información que contribuya al manejo adecuado de los suelos y sus mantos freáticos.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad, debido a la necesidad de cumplir con los estándares y requerimientos de la sociedad, se han construido obras de gran magnitud como urbanizaciones, edificios, centros comerciales, carreteras, presas, entre otras, que debido a su importancia deben ser monitoreadas (Instrumentación Geotécnica, 2011), es allí donde la instrumentación geotécnica juega un papel importante proporcionando información útil para mantener márgenes de seguridad en la operación de estas obras.

Tanto la ingeniería civil en general como la rama de la geotecnia buscan desarrollar diseños e hipótesis que permitan entender los análisis del comportamiento del suelo, por lo que se han diseñado diferentes instrumentos que ayudan a medir el comportamiento del mismo; dentro de estos se puede mencionar: piezómetros, inclinómetros, extensómetros, celdas de carga, entre otros.

En Guatemala se ha observado una susceptibilidad muy elevada ante problemas de inestabilidad de laderas, según un estudio realizado por el Ministerio de Comunicaciones, Transporte y Obras Públicas y el Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología en 1991, se recabó información de los principales deslizamientos ocurridos en la República de Guatemala; se pudo constatar que la mayoría de ellos han sido generados por períodos de lluvias intensas y acumulación de agua en el subsuelo, afectando a poblaciones o infraestructuras públicas.

En un estudio realizado por Geopetrol (2007), se analizaron varios componentes para estimar la susceptibilidad a deslizamientos en la zona metropolitana y la estabilidad de laderas a nivel local. Según la metodología utilizada en este estudio, se concluye que la mayor parte de los deslizamientos se generan en taludes con ángulos de inclinación mayores a 12° y han ocurrido entre los meses de agosto a octubre, debido a altas lluvias y saturación en el suelo.

A su vez en su estudio Barillas (s.f.), concluye que la ocurrencia de estos deslizamientos está directamente relacionada con las cuantiosas lluvias asociadas con los fenómenos climáticos extremos y a la inestabilidad del terreno, lo que se incrementa debido a factores socioeconómicos como la deforestación, la degradación ambiental, el rápido y desordenado crecimiento poblacional y el desarrollo territorial no planificado e insostenible. Además hace énfasis en la necesidad de implementar un sistema de monitoreo de lluvia con capacidad de procesamiento de información en tiempo real, con el objetivo de alertar poblaciones vulnerables al impacto de los deslizamientos.

Los problemas asociados con los deslizamientos e inestabilidad de laderas, se dan en muchos países; tal es el caso del estudio realizado por Cahuana (2008), en donde se aplica un monitoreo en zonas susceptibles al deslizamiento debido a precipitaciones intensas. En su estudio realiza una comparación de investigaciones realizadas en Malasia, Singapur y Estados Unidos, en donde se presentan datos de la relación existente entre la variación del nivel freático con los desplazamientos ocurridos. Además, indica que es importante conocer el comportamiento del suelo bajo estas condiciones, para poder detectar de manera temprana los deslizamientos y así reducir los daños.

El monitoreo de los niveles freáticos es utilizado según indica Deluchi et al. (2005); es importante analizarlo debido a los cambios respecto de las condiciones naturales como consecuencia del desarrollo urbano. En su estudio analizan las variaciones reales y temporales de la relación entre aguas superficiales y aguas subterráneas en la zona de influencia en estudio, con el fin de reconocer las características de dichas variaciones a partir de la interpretación de perfiles transversales.

En el estudio realizado por Rinaldi et al. (s.f.) se analizan los problemas de ascenso del nivel freático en una zona caracterizada litológicamente por la existencia de una formación típica de suelos colapsables, de espesor considerable. En este estudio se concluye que en el área se cuenta con materiales de alta permeabilidad y con movimientos subterráneos de fluidos que aportan infiltraciones significativas y se recomienda se realicen auscultaciones periódicas para el monitoreo de los descensos del nivel freático.

Los piezómetros son utilizados en obras en donde se requiere conocer la variación del nivel freático o el valor de la presión de poro, tal como se indica en el estudio del terreno de El Cune, municipio de Villeta, Cundinamarca, realizado por Palomino (2011), en donde se estudió el comportamiento de las rocas y los principales factores que intervienen en los procesos de deslizamiento. En este estudio se realizó una campaña de instrumentación geotécnica que consistió en la instalación de piezómetros de cuerda vibrante, mojones de control topográfico para medir los desplazamientos superficiales, inclinómetros y extensómetros.

En esta investigación se recabó información necesaria para ubicar y limitar el área en movimiento, determinar la dirección y establecer la magnitud de los desplazamientos.

Además, con los registros de la variación del nivel freático se pudo generar una relación entre estos y los desplazamientos medidos, con el fin de obtener información para el diseño de las obras correctivas necesarias.

En un estudio realizado por la Inga. Tobar (2014) referente al deslizamiento denominado El Berrinche, Honduras, en donde utilizó la metodología de instrumentación geotécnica para el control de deslizamientos utilizada en Japón indicada por Utsuki et al (s.f.). Según indica Tobar, este deslizamiento fue ocurrido en 1998 y fue ocasionado por fuertes lluvias, por lo que las medidas de control empleadas en deslizamientos en Japón, tales como, evaluación de la estabilidad del talud, antes, durante y posterior a las construcciones, son aplicables al problema estudiado.

De igual manera en el estudio No. 1458-13, realizado en la urbanización Lomas de San Isidro, zona 16, Guatemala, se indica que el sector a analizar “tiene suelos muy blandos y será necesario hacer algunos trabajos preliminares antes de definir qué se hará en esta zona del proyecto” (Semrau, 2013). Además recomienda que debido a que en esta zona se encontraron altos niveles freáticos, sean instalados 4 piezómetros para monitorear el abatimiento del nivel freático.

Por todo lo anterior se considera importante realizar la campaña de monitoreo y comprobar si las variaciones del nivel freático se encuentran relacionadas con los desplazamientos superficiales detectados en el área.

3. OBJETIVOS

General

Determinar la variación de los niveles freáticos y del desplazamiento de la ladera sureste del proyecto residencial Lomas de San Isidro, zona 16 de la ciudad de Guatemala, para establecer si la herramienta propuesta y los resultados obtenidos son suficientes para detectar problemas de desplazamiento por empuje de agua y si efectivamente el nivel piezométrico es determinante en la inestabilidad de la ladera.

Específicos

1. Determinar si los piezómetros son los instrumentos de medición adecuados para obtener la variación de del nivel freático.
2. Establecer con base en los resultados de las correlaciones, si las fluctuaciones del nivel freático explican el desplazamiento en la ladera.
3. Determinar si las variables analizadas en las correlaciones proporcionan resultados que ayuden a entender el movimiento evidenciado en el área.
4. Generar con base en los resultados obtenidos, gráficas y planos de la variación del nivel freático y su área de influencia.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En la ciudad de Guatemala se está iniciando una tendencia a crear ambientes que no solo armonicen con la naturaleza sino también brinden un mejor entorno en cuanto a seguridad y eficiencia, como es el caso de los proyectos neourbanistas, según afirman Juárez y Ponce en su artículo publicado en el 2008.

Esta alta demanda de viviendas que proporcionen áreas óptimas de habitabilidad con entornos naturales, es la razón principal por la que se planifican y ejecutan urbanizaciones en sectores en los que es necesario modificar el entorno, dejando de lado la evaluación y el análisis a profundidad del impacto que esto ocasiona en el proyecto.

La zona 16 de la ciudad capital aún cuenta con áreas boscosas, que con el paso del tiempo se han ido modificando por el desarrollo de nuevas urbanizaciones. Este es el caso del proyecto residencial Lomas de San Isidro, foco de este estudio.

En dicha urbanización se realizan trabajos de conformación de plataformas para la construcción del área suroeste del proyecto.

Este sector colinda con una ladera y se han observado ciertos desplazamientos y grietas tensionales en el terreno, producto del empuje que genera el alto nivel freático del área.

Debido a que los desplazamientos de las laderas y el empuje que el agua ejerce en ellas es un tema de suma importancia, no solo para la urbanización en particular sino también en obras de infraestructura civil en general en donde las modificaciones del entorno pueden ocasionar diversos comportamientos que tengan efectos negativos sobre la infraestructura, por lo que se considera necesario realizar una implementación de un sistema de instrumentación geotécnica para monitorear los desplazamientos de la ladera y de las fluctuaciones del nivel freático en esta área.

El estudio propuesto en esta investigación corresponde al área de técnicas para el control del terreno, comúnmente llamadas auscultación o instrumentación geotécnica. Según Rodríguez (2003), la instrumentación geotécnica consiste en medir la respuesta del terreno ante determinadas variaciones en las condiciones de su entorno, las cuales pueden ser debidas a la ejecución de obras o fenómenos naturales.

La instrumentación también es útil cuando se precisa controlar el comportamiento de un talud frente a la estabilidad, a fin de obtener información sobre el comportamiento del mismo y las características del movimiento; velocidad, situación de las superficies de rotura, presiones de agua, entre otras, afirma Barboza (2013). Además, indica que una adecuada interpretación de los resultados de las mediciones de los controles instrumentales del monitoreo, indicará oportunamente las medidas a adoptarse para el manejo de problemas asociados con las inestabilidades.

Debido a que se desea conocer la variación del nivel freático, se propone utilizar piezómetros que son un tipo de instrumentación geotécnica que sirve para recabar estos datos.

Además, el monitoreo del desplazamiento de la ladera será registrado por medio de mediciones topográficas de las coordenadas establecidas en cada uno de los piezómetros desde un punto estable.

Con los datos obtenidos en el monitoreo se realizará un análisis por medio de correlaciones estadísticas, para determinar el grado de significancia que estos factores tienen en el problema evaluado.

Con base en los registros y análisis se presentará un informe en donde se indiquen los datos obtenidos, hidrogramas y planos que servirán para comprender e interpretar el comportamiento del flujo del agua subterránea del área y conocer los niveles en los que se encuentra, así como los datos registrados con los levantamientos topográficos y el desplazamiento de la ladera, si lo hubiese o si se detectara en el tiempo de la medición.

La finalidad de la investigación es proporcionar información preliminar del problema en mención, así como comprobar si con este tipo de herramientas es posible determinar que el desplazamiento de la ladera en estudio se debe a las fluctuaciones del nivel freático; lo que beneficiará a la empresa que realiza la urbanización de este sector, ya que se obtendrán los registros y el informe necesario para que en los trabajos que se lleven a cabo en el área, se puedan controlar los mantos freáticos y contrarrestar el desplazamiento, lo que mejorará la plusvalía y facilitará comercialización del sector.

Además, serán beneficiados los futuros propietarios de las viviendas, así como estudiantes y profesionales que puedan tomar este estudio como referencia para resolver problemas similares.

Esta indagación se llevará a cabo con un trabajo de campo para la obtención de los datos. Los trabajos de tabulación, análisis de correlaciones, elaboración de gráficas, planos y las interpretaciones de los resultados, se realizarán con trabajo de gabinete.

5. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el 2013, en la zona 16 de la ciudad de Guatemala, se inició la ejecución de los trabajos de urbanización de la Residencial Lomas de San Isidro y en la construcción de los trabajos de conformación de plataformas del área sureste se han observado grietas tensionales en el terreno, producto del desplazamiento de la ladera colindante.

La falta de estudio y control del desplazamiento de la ladera afecta de manera directa a la empresa constructora de la urbanización, debido a que no se cuenta con un área estable y con el control adecuado de los mantos freáticos para la cimentación de las viviendas planificadas que serán construidas en esta área, y también se ven afectados los futuros propietarios de las viviendas.

Por esta razón, se evaluará el desplazamiento de la ladera por el empuje del agua por medio de piezómetros, monitoreando los niveles freáticos y el desplazamiento de la misma para obtener correlaciones, las que servirán de base para determinar si la investigación y las herramientas empleadas identifican este tipo de problemas; así como brindar datos preliminares para realizar los trabajos correctivos necesarios.

Por lo anteriormente mencionado se plantea la siguiente interrogante central:

¿Es posible que el desplazamiento de la ladera y la inestabilidad del suelo del sector sureste de la colonia Lomas de San Isidro sean provocados por los altos niveles freáticos que existen en el área, y será suficiente la herramienta

propuesta y los resultados que se obtengan para detectar problemas de desplazamiento por empuje de agua y si efectivamente el nivel piezométrico es determinante en la inestabilidad de la ladera?

Asimismo, se establecen los siguientes cuestionamientos auxiliares:

¿Serán adecuados los piezómetros como instrumentos de medición para obtener la variación del nivel freático?

Con base en los resultados, ¿confirman las variaciones del nivel freático la existencia de empujes y desplazamientos en la ladera?

6. ALCANCE

El control de las mediciones de los niveles freáticos del área en estudio generará un informe con el que se presentarán los registros obtenidos en las mediciones de los piezómetros y las topografías, el modelo de la correlación de los datos, la interpretación y las gráficas de la fluctuación del nivel del agua respecto del tiempo, así como los planos de nivel freático; todo esto para comprender el movimiento del agua en la zona y analizar si las variaciones del nivel freático afectan en el desplazamiento de la ladera de observación.

Este estudio busca predecir por medio de correlaciones estadísticas la relación o dependencia que existe entre las variaciones del nivel freático y el desplazamiento de la ladera, con el fin de establecer si estos factores son los causantes principales del movimiento evidenciado en el área.

Desde la perspectiva técnica se empleará un sistema de instrumentación geotécnica para obtener los registros de la variación del nivel freático y levantamientos topográficos para detectar movimientos superficiales del área. Además, se realizarán ensayos de penetración estándar y la clasificación de los estratos de suelo para completar los estudios y herramientas necesarias para el análisis.

Debido a que las causas de los movimientos en laderas pueden deberse a uno o varios factores, con la metodología empleada se busca determinar si los factores analizados son los causantes del desplazamiento y con ello delimitar el problema.

Al finalizar este estudio se espera que la empresa desarrolladora del proyecto cuente con información que le ayude a diseñar obras para controlar los mantos freáticos y detener el desplazamiento de la ladera. Además, se espera que esta metodología pueda ser aplicada en proyectos con problemas similares para determinar de manera preliminar la causa del problema.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Inestabilidad de laderas

Alcántara, Echavarría, Gutiérrez, Domínguez y Noriega, en el fascículo editado en el 2001, exponen que la inestabilidad de laderas es uno de los mayores riesgos naturales porque representan amenazas para la vida y los bienes materiales de la población. Asimismo, indican que la inestabilidad de laderas está determinada por diferentes mecanismos, que sirven para clasificar los diferentes tipos de procesos de ladera existentes y que los movimientos dependerán de los criterios utilizados para su diferenciación.

“Las clasificaciones de los movimientos de ladera suelen referirse a los tipos de materiales involucrados, distinguiendo generalmente entre materiales rocosos, derrubios y suelos y al mecanismo y tipo de rotura, considerando también otros aspectos, como el contenido de agua en el terreno y la velocidad y magnitud del movimiento” (González, Ferrer, Ortuño & Oteo, 2002).

A continuación se presenta la clasificación simplificada, indicada por González et al (2002), para los diferentes tipos de movimientos de ladera en función del mecanismo de rotura y del tipo de material.

7.1.1. Caídos o derrumbes

Los caídos o derrumbes se caracterizan por ser movimientos repentinos de suelos y fragmentos de rocas que se originan en altas pendientes.

Este tipo de movimientos generalmente se da en macizos rocosos que presentan bastantes discontinuidades. Además, se caracteriza por la acumulación de bloques de tamaño variable al pie de la ladera.

Figura 1. **Desprendimientos**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

Figura 2. **Vuelcos**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

7.1.2. **Flujos**

Los flujos son movimientos de ladera en donde se genera o desarrolla deformación interna y continua del material, y en donde no se presenta superficie neta de desplazamiento.

Los movimientos pueden ser de forma lenta o súbita y la velocidad del desarrollo depende del tipo de material y el contenido de humedad.

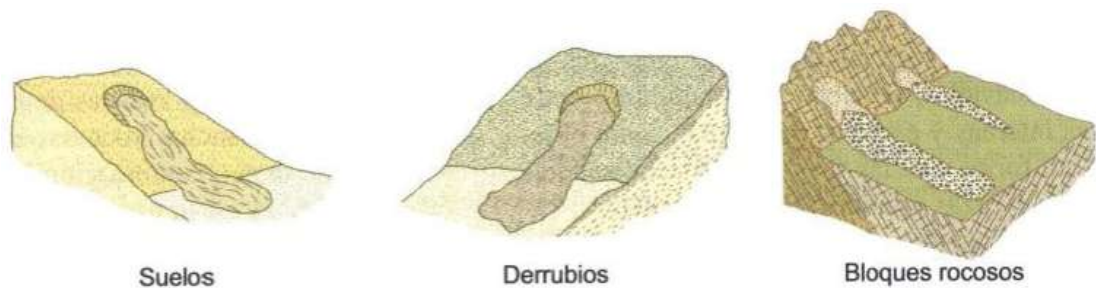
Los flujos más comunes son movimientos de suelo, flujos de lodo, de derrubios y de bloques rocosos.

Los flujos de lodo se dan cuando la masa de suelo y agua se desplazan pendiente abajo de manera súbita. Generalmente se dan en suelos que contienen por lo menos 50 % de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.

Por el contrario, los flujos o avalancha de detritos, se dan cuando se combinan partículas sueltas, fragmentos de rocas y vegetación con aire y agua, formando una masa viscosa y fluida que se mueve pendiente abajo.

Se conocen como lahares a los flujos de suelo o detrito originados en el talud de un volcán, generalmente se dan por precipitaciones intensas, actividad volcánica o por sismos.

Figura 3. **Flujos**



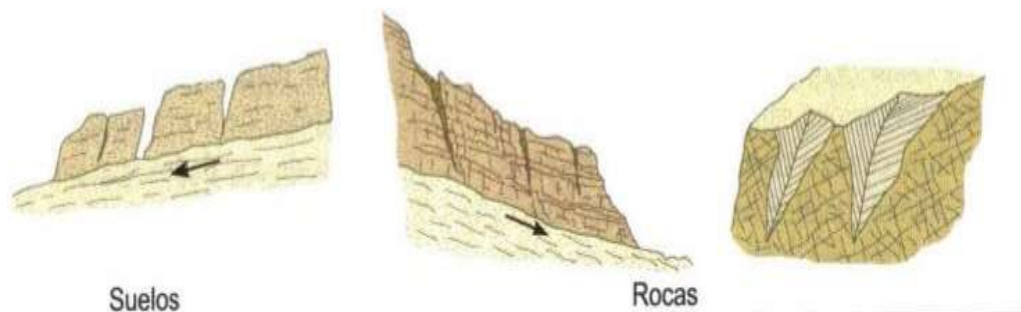
Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

7.1.3. Deslizamientos

En los deslizamientos el movimiento se da sobre una o varias superficies de rotura bien definidas. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad, prácticamente sin deformación interna, en su recorrido. Según la superficie de rotura, los deslizamientos pueden ser: traslacionales o rotacionales.

En el desplazamiento traslacional, la inclinación de la superficie de rotura es más o menos constante.

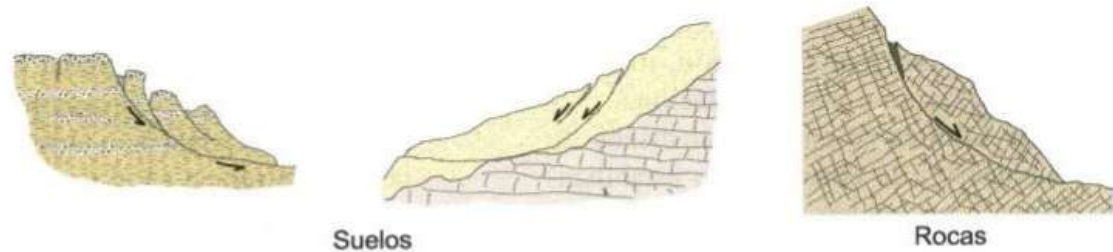
Figura 4. **Deslizamientos traslacionales**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

Por el contrario, los deslizamientos rotacionales poseen una superficie de rotura cóncava.

Figura 5. **Deslizamientos rotacionales**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

7.1.4. **Expansiones o desplazamientos laterales**

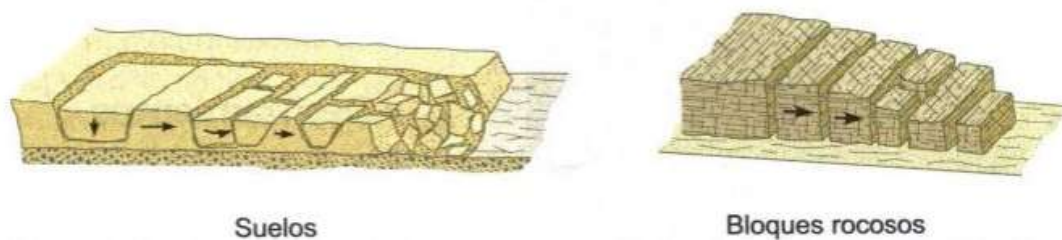
En los deslizamientos el movimiento se da sobre una o varias superficies de rotura bien definidas. Los desplazamientos laterales generalmente ocurren en pendientes muy suaves, dando como resultado desplazamientos casi horizontales. La mayoría de las veces los desplazamientos son causados por licuefacción en terrenos predominantemente arenosos y limosos, y adquieren el comportamiento de un fluido como consecuencia de las vibraciones causadas por un sismo.

Figura 6. **Avalanchas**



Figura 7. Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

Figura 8. **Desplazamientos laterales**



Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO Luis et al. *Ingeniería geológica*, p. 624.

7.2. Factores que influyen en la inestabilidad de laderas

Alcántara, Echavarría, Gutiérrez, Domínguez y Noriega (2001) indican que existen diversos factores que determinan la estabilidad de una ladera, y los clasifican en: internos, cuando dependen de las características intrínsecas del material, y externos, debidos a las condiciones climáticas, eventos extremos y al impacto ocasionado por el hombre.

Los factores internos y externos que intervienen en la inestabilidad de laderas que exponen Alcántara et al (2001), se amplían a continuación.

7.2.1. Factores característicos de la ladera

- Topografía: las condiciones del terreno influyen fuertemente en la inestabilidad de una ladera, por ejemplo lugares montañosos con pendientes altas son más vulnerables a deslizarse. Además, se pueden dar casos de laderas con pendientes muy bajas pero con rocas o suelo suelto y presencia de agua en el subsuelo, y de igual manera son propensos a sufrir deslizamientos.

- Geología del área: la influencia de la geología presente en el área se refiere al tipo de roca, grado de alteración y meteorización, la presencia de discontinuidades, los planos estratigráficos, porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas y estado de esfuerzos.
- Condiciones hidrogeológicas: las condiciones del agua subterránea en el terreno afectan la resistencia del material al corte, debido a que aumenta la presión intersticial, y consecuentemente se da el incremento en el peso volumétrico del terreno y el aumento en los esfuerzos actuantes.

7.2.2. Factores externos

- Condiciones climáticas: en Guatemala el principal desencadenante de los deslizamientos son las lluvias. En las regiones lluviosas se suele encontrar materiales alterados por la meteorización y el nivel freático alto, condiciones que combinadas facilitan al deslizamiento.
- Acciones antrópicas: “el crecimiento acelerado y la inadecuada planeación territorial de muchas poblaciones y ciudades en todo el mundo han generado transformaciones antropogénicas negativas en el entorno, debido a la urbanización de zonas donde las condiciones geológicas, geotécnicas, hidrológicas y topográficas no son las más apropiadas para la construcción de edificaciones”. (Cuanalo, Oliva, & Gallardo, 2011).

Con las diferentes actividades realizadas por el hombre se crea inestabilidad de laderas; dentro de ellas se pueden mencionar: cortes y excavaciones, conformación de rellenos y plataformas para urbanizaciones, rellenos de material suelto en los taludes y escarpe de

las laderas, voladuras para la explotación de minas o de bancos de material, vertido incontrolado y excesivo de agua, y deforestación, entre otras, debido a que se altera el equilibrio que existe en la naturaleza.

7.3. Agua subterránea y su afectación en la inestabilidad de las laderas

El agua subterránea es un factor predominante en la inestabilidad de laderas, según explica Suárez (1998), que “al efectuar un corte en una ladera se cambia el flujo natural interno del agua que puede originar aumento de presiones y de fuerzas de filtración desfavorables. Se ha reconocido que muchas fallas de laderas se presentan durante o posteriormente a la temporada de lluvias, y que existe una estrecha relación con el régimen de las filtraciones y con el establecimiento de los escurrimientos subterráneos”.

A su vez Mendoza, Ortíz, Noriega y Guevara (2002), explican que las fluctuaciones del nivel freático son provocadas por las variaciones estacionales y los cambios climáticos, lo que genera diferentes estados de esfuerzos en la masa del suelo. Asimismo, indican que en tiempos de sequía, se produce una presión negativa en el agua contenida en el suelo, es decir que este se encuentra parcialmente saturado, favoreciendo el aumento de la resistencia al corte. A esta presión negativa contribuyen: el fenómeno de capilaridad, la absorción que se establece entre las partículas minerales cargadas eléctricamente, y el agua que las rodea.

Las condiciones del terreno en época lluviosa varían debido a que la presión negativa en el agua contenida en el subsuelo se pierde, e incluso se genera una presión positiva (presión de poro).

Este aumento de la presión de poro disminuye la resistencia del subsuelo de manera proporcional al aumento de la presión de poro, favoreciendo la inestabilidad de las laderas.

Por lo anteriormente presentado se concluye que el monitoreo de la presión de poro es indispensable para conocer la variación de la resistencia de los suelos en la potencial superficie de falla y con ello prevenir la inestabilidad de las laderas.

7.4. Investigación geotécnica en laderas

“El área de la investigación depende del tamaño del proyecto y de la extensión de los factores geológicos y topográficos que afectan el problema que se estudia y que cuando se buscan movimientos potenciales que no se han desarrollado, el área de la investigación no se puede determinar por adelantado” (Suárez, 1998). Además, recomienda que el área de estudio debe ser lo más extensa posible, así:

- Los deslizamientos deben relacionarse con áreas estables a su alrededor.
- Generalmente los deslizamientos son más grandes que lo previsto inicialmente.
- Como regla general, el área de estudio debe ser al menos el doble del área que se presume comprende el problema.
- En el área de estudio deben incluirse las fuentes de agua subterránea y superficial que puedan afectar la inestabilidad.

Suárez (1998), también indica que la profundidad de la investigación es todavía más difícil de definir, ya que los sondeos deben profundizarse hasta identificar los materiales estables por debajo de los movimientos reales o potenciales. Las especificaciones de los estudios deben ser flexibles para permitir la adición de cantidades suficientes de sondeo que con mucha frecuencia se van a requerir.

El periodo de estudio debe incluir periodos lluviosos y secos y por lo menos debe tenerse información de un año de duración, aunque es común que los fenómenos climáticos críticos tarden de diez a veinte años en repetirse en su máxima actividad. Dentro de las recomendaciones indicadas para el planeamiento del estudio detallado se encuentran:

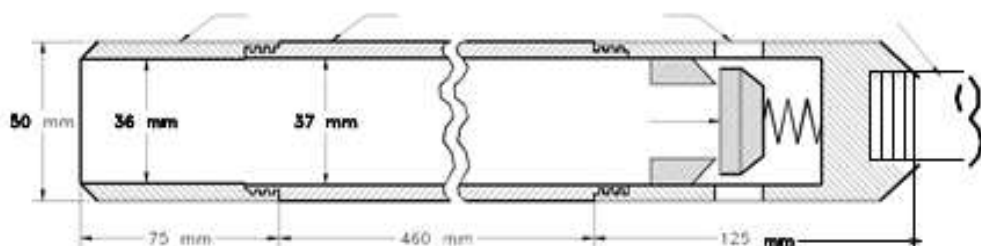
- Topografía: consistente en planos planimétricos con líneas de nivel y perfiles del talud.
- Geología: consiste en determinar el tipo de formación, estructura y meteorización del área en estudio.
- Agua subterránea: comprende los niveles piezométricos dentro del talud, las variaciones de estos niveles, las indicaciones exteriores del agua, los efectos de la actividad humana en el agua subterránea y la química del agua.
- Historia de deslizamientos en la zona: consiste en contar con un registro de los procesos naturales, erosión, evidencia de movimientos en el pasado y la influencia de la actividad humana en los cortes, rellenos, cambios en el agua, superficie, vegetación, etc.

- Caracterización de movimientos: se refiere al estudio de las propiedades de los materiales, resistencia, permeabilidad, determinación de la superficie de falla y correlación de los movimientos con el agua subterránea, la geología, la actividad humana, etc.

7.4.1. Ensayos de campo

Según Suárez (1998), los ensayos de campo tienen la ventaja de simular situaciones en el ambiente mismo del talud y son muy útiles para cuantificar los parámetros que se emplean en el análisis de un deslizamiento. Dentro de los ensayos descritos, el que se aplica a este estudio es el de penetración estándar, ya que por ser rápido y sencillo, permite encontrar la resistencia relativa de las diferentes formaciones de suelo y localizar la superficie de falla. En este ensayo se cuenta el número de golpes necesarios para hincar 30 centímetros (un pie) un muestreador en forma de tubo partido vertical (figura 8) y este valor número de golpes (N) se correlaciona empíricamente con la resistencia del suelo.

Figura 9. **Muestreador de tubo partido para ensayos de penetración estándar**



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 57.

Tabla I. **Penetración estándar versus densidad relativa de arenas**

N golpes/pie	Densidad de la arena
0 a 4	Muy suelta
5 a 10	Suelta
11 a 24	Media
25 a 50	Densa
Más de 50	Muy densa

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 57.

Tabla II. **Penetración estándar versus consistencia de arcillas**

N golpes/pie	Consistencia de la arcilla
Menos de 2	Muy blanda
2 a 4	Blanda
4 a 8	Media
8 a 15	Firme
15 a 30	Muy firme
Más de 30	Dura

Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. p. 58.

Inicialmente, el uso del SPT se limitaba a los suelos granulares, pero posteriormente se le ha utilizado para determinar la resistencia al cortante no drenado en arcillas normalmente consolidadas. Schmertmann (1975) sugiere que:

$$S_u = \frac{N}{15}$$

Donde:

S_u = resistencia no drenada en toneladas por pie cuadrado

7.5. Instrumentación geotécnica

El objetivo básico de la utilización de la instrumentación geotécnica es “medir la respuesta del terreno ante determinadas variaciones en las condiciones de su entorno, las que pueden ser debidas a la ejecución de obras o a fenómenos naturales” (Rodríguez, 2003).

A su vez Suárez (2009) indica que la utilidad de la instrumentación de campo reside en obtener información del comportamiento del talud a lo largo de periodos de tiempo y el poder medir ciertos parámetros geotécnicos. Para realizar este tipo de investigaciones se debe aplicar un programa de instrumentación en donde se determine:

- Qué tipos de medición se requieren
- Selección del instrumento requerido según las necesidades del estudio
- Determinar la ubicación de la investigación, cantidad y profundidad de la instrumentación
- Escoger la metodología de lectura de las mediciones
- Decisiones sobre el manejo y presentación de los datos obtenidos

Además, agrega que, inicialmente se requiere haber estudiado las causas del deslizamiento y los límites probables del movimiento en cuanto a profundidad y extensión en planta.

Previo a la instalación de la instrumentación se deben haber estudiado y planteado las posibles causas de la falla, el área de influencia y riesgo y lo que

se pretende es corroborar la validez o no de las teorías propuestas y la cuantificación de ciertos parámetros y procesos.

Asimismo, explica que la instrumentación geotécnica se requiere en varias acciones típicas, dentro de las que se pueden mencionar:

- Determinar la profundidad y forma de la superficie de falla en un deslizamiento activo.
- Identificar los movimientos laterales y verticales dentro de la masa deslizada.
- Determinar la velocidad de deslizamiento y el establecer mecanismos de alarma.
- Monitorear actividades de cortes naturales e identificar sus efectos.
- Monitorear los niveles de agua subterránea o presiones de poro y su correlación con la actividad del deslizamiento.
- Monitorear y evaluar la efectividad de diferentes sistemas de estabilización o control.

7.5.1. Sistema de medidas de presión intersticial

Cuando se están diseñando taludes de proyectos nuevos o existentes, es fundamental conocer las variaciones de la presión intersticial; “para el diseño de nuevos taludes se deben estimar los regímenes de presión intersticial más desfavorables que pueden darse a lo largo de la construcción y vida útil de la

obra, que pueden no ser los mismos que los medidos en el momento de realizar las investigaciones de proyecto” (Ortuño, 2004)

La medida de los movimientos de las presiones intersticiales en el interior de una ladera se lleva a cabo mediante la instalación de piezómetros de tuberías ranuradas en sondeos o pozos de reconocimiento.

7.5.1.1. Piezómetros

Dunnicliff (2010), define a los piezómetros como dispositivos sellados dentro del suelo para que respondan solamente a la presión de agua subterránea alrededor del mismo y no a presiones de agua subterránea a otras elevaciones, e indica que son usados para monitorear presión de poro y presión conjunta de agua.

Además, afirma que el monitoreo de presión de poro y agua conjunta permite hacer estimados de deformación efectiva y así una valoración de la resistencia, y para esto se debe realizar una campaña de monitoreo en donde se utilizan piezómetros de tubo vertical abierto y piezómetros de hidráulicos de doble tubo. También explica que los piezómetros de tubo abierto, llamados también piezómetros Casagrande, requieren del sellado de un elemento de filtro poroso para que el instrumento responda solamente a la presión de agua alrededor del mismo y no a la presión de agua a otras elevaciones.

Estos piezómetros pueden ser instalados en pozos de sondeo sellados y rellenados, o presionados en posición. La superficie del agua en el tubo abierto se estabiliza a la elevación piezométrica y es determinada por sondeo. Según Salgado (s.f.) los piezómetros tienen las siguientes aplicaciones típicas:

- Monitoreo de la presión del agua para determinación de coeficientes de seguridad en terrenos rellenados o excavaciones.
- Monitoreo de la presión del agua para evaluación de la estabilidad de contrafuertes o terraplenes.
- Monitoreo de sistemas de drenaje en excavaciones.
- Monitoreo de sistemas de mejora del suelo, como por ejemplo drenajes verticales.

De los resultados obtenidos en las mediciones del nivel freático se pueden elaborar gráficos útiles para la interpretación de las fluctuaciones en un tiempo definido, así como planos que muestran la magnitud y distribución espacial de los cambios en el nivel freático durante el tiempo de estudio.

7.5.2. Sistema de medidas de desplazamientos horizontales

En su informe Obando (2009), expone que la medida del desplazamiento en superficie y en el interior del terreno permite detectar el movimiento de una zona determinada de la ladera o en todo el conjunto, y conocer la dirección y velocidad del mismo. Además indica que los sistemas de medida de desplazamientos en superficie estarán condicionados por la precisión que se pretenda y por la magnitud de los movimientos.

Referente a las diversas técnicas de instrumentación, Rodríguez (2003) cita a (Peral et al, 1999) indicando que “existen numerosas técnicas de instrumentación para medir estos desplazamientos y averiguar las circunstancias que los provocan, entre las que cabe citar los procedimientos

topográficos manuales o automatizados, la inclinometría, piezometría, extensometría en sondeos, células de carga en el extremo de anclajes, entre otros”.

7.5.2.1. Estudio topográfico

Según lo afirmado por Suárez (1998), las mediciones topográficas utilizadas para estudios de movimientos o desplazamientos en laderas tienen los siguientes objetivos:

- Determinar los perfiles topográficos para los análisis de estabilidad.
- Establecer un marco de referencia sobre el cual puedan compararse los movimientos futuros del terreno.

Los métodos basados en mediciones con referencias topográficas sirven para “conocer con exactitud la velocidad y magnitud de los movimientos superficiales de una masa de suelo o roca. Estos métodos permiten monitorear un área que haya mostrado algunos indicios de inestabilidad, con lo cual se puede dar seguimiento a sus desplazamientos, teniendo como referencia bancos fijos ubicados fuera del área inestable; este es el procedimiento más directo para conocer, midiendo sus efectos, la evolución de un potencial deslizamiento.

Las mediciones topográficas también permiten dar seguimiento a la formación y progresión de grietas que se generan en los hombros de laderas o taludes, y que comúnmente anteceden a las fallas” (Mendoza, Ortiz, Noriega, & Guevara, 2002).

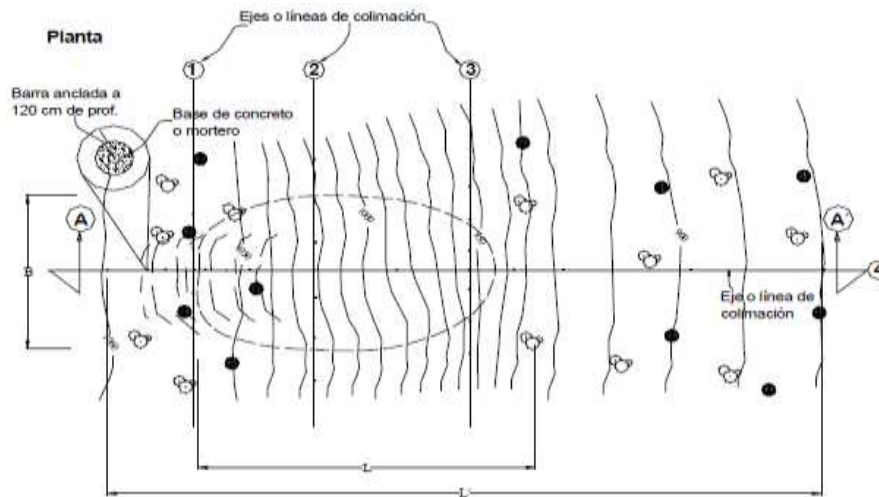
Según explica Mendoza et al (2002), las mediciones topográficas se deben realizar por nivelación y referencias superficiales colocando bancos de marca a lo largo del área en movimiento, según se muestra en la figura 9.

Además, recomiendan establecer referencias longitudinales y transversales y referirlos desde un punto o banco fijo que se localiza fuera del área potencialmente inestable. También indican que la ubicación y cantidad de los ejes dependerá del tamaño del área en estudio y de la posición y cantidad del posible agrietamiento.

Es importante definir la posición y elevación inicial de cada punto de referencia. La posición de las referencias puede ser medida con base en coordenadas topográficas obtenidas en el levantamiento inicial y la elevación de cada referencia puede determinarse por medio de altimetría.

La medición inicial se realiza con el fin de conocer la evolución de sus movimientos. López et al, afirman que los monitoreos de los movimientos o desplazamientos de laderas constituyen un medio para prevenir un desastre, ya que dependiendo de esa velocidad, es un medio idóneo para basar una alerta.

Figura 10. **Monitoreo topográfico mediante nivelación y colimación**



Fuente: MENDOZA, Manuel et al, *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*, p. 26.

7.5.2.2. **Presentación de los datos topográficos**

Para la presentación de los datos topográficos Suárez (1998), recomienda que para deslizamientos grandes es conveniente emplear planos en escala 1: 2.000 a 1: 5.000 y los detalles se pueden presentar en escalas de 1: 500 a 1: 1.000, y para deslizamientos o zonas de estudio más pequeñas se pueden emplear escalas de mayor precisión.

Además, sugiere que las líneas de nivel se hagan cada 50 centímetros si es posible, dentro del rango de escala y tamaño del movimiento, y adicionalmente a los mapas en planta deben presentarse perfiles.

El más importante de estos perfiles es generalmente el que sigue la línea de mayor pendiente dentro del movimiento. Debe hacerse siempre un mínimo de tres perfiles porque es importante seleccionarlos para que incluyan las

peores condiciones y las menos críticas. Los perfiles deben abarcar 15 o 30 metros más fuera de los movimientos. Cada perfil debe dibujarse por separado e incluir todos los detalles, tales como cambios bruscos de nivel, vegetación, nacimientos de agua, entre otros.

8. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Los altos niveles freáticos que existen en la ladera que colinda con el área sureste de la colonia Lomas de Isidro, zona 16, ocasionan empujes y desplazamientos en esta área, por lo que representan un problema en la estabilidad del suelo en este sector.

H0: Existe evidencia muestral estadísticamente significativa, a un nivel de confianza del 90 % que rechaza que el nivel freático en la ladera que colinda con el área sureste de la colonia Lomas de Isidro, zona 16, ocasiona empujes y desplazamientos, representando un problema en la estabilidad del suelo del sector.

H1: Existe evidencia muestral estadísticamente significativa, a un nivel de confianza del 90 % que confirma que el nivel freático en la ladera que colinda con el área sureste de la colonia Lomas de Isidro, zona 16, ocasiona empujes y desplazamientos, no representando un problema en la estabilidad del suelo del sector.

8.1. Definición de las variables

Las variables que se utilizarán y analizarán en el presente estudio son:

- Nivel freático: representa el nivel superior de la zona saturada. Será medido en metros. Esta variable es de tipo cuantitativo.

- Desplazamiento de la ladera: esta es una variable cuantitativa, la cual será medida en metros.

9. CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTADO DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE
PREGUNTAS ORIENTADORAS

OBJETIVOS/HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. CONCEPTOS GENERALES DE INESTABILIDAD EN LADERAS

1.1. Inestabilidad de laderas

1.1.1. Caídos o derrumbes

1.1.2. Flujos

1.1.3. Deslizamientos

1.1.4. Expansiones o desplazamientos laterales

1.2. Factores que influyen en la inestabilidad de laderas

1.2.1. Factores característicos de la ladera

1.2.1.1. Morfología y topografía

1.2.1.2. Geología del área

1.2.1.3. Condiciones hidrogeológicas

1.2.2. Factores externos

1.2.2.1. Condiciones climáticas

1.2.2.2. Acciones antrópicas

1.3. Inestabilidad de laderas inducida por agua subterránea

- 1.3.1. Presión intersticial
- 1.3.2. Superficie freática
- 1.3.3. Agua subterránea y estabilidad
- 1.3.4. Principio de tensión efectiva
- 1.3.5. Tensión efectiva y estabilidad de taludes
- 1.4. Investigación geotécnica en laderas
 - 1.4.1. Ensayos de campo

2. INSTRUMENTACIÓN

- 2.1. Sistema de medida de presiones intersticiales
 - 2.1.1. Pozos
 - 2.1.1.1. Pozos de observación
 - 2.1.2. Piezómetros
 - 2.1.2.1. Piezómetro abierto
 - 2.1.2.2. Piezómetro cerrado
 - 2.1.2.3. Aparatos de medición
 - 2.1.2.4. Frecuencia de medición
 - 2.1.3. Tipos de filtros
 - 2.1.4. Métodos de lectura de piezómetros abiertos
 - 2.1.5. Presentación de datos de medición
 - 2.1.5.1. Registro de mediciones
 - 2.1.5.2. Hidrograma de flujo
 - 2.1.5.3. Planos
 - 2.1.5.4. Plano de equipotenciales
 - 2.1.1.1 Plano de isoprofundidad
 - 2.1.1.2 Plano de fluctuación del nivel freático
 - 2.1.6. Interpretación de datos
 - 2.1.6.1. Interpretación de hidrograma
 - 2.1.6.2. Interpretación de planos

- 2.2. Sistema de medida de desplazamientos
 - 1.1.2. Estudio topográfico
 - 2.3. Instalación de piezómetro para estudio
3. REGISTRO DE DATOS
- 3.1. Metodología de medición
 - 3.2. Medición del nivel freático por piezómetro
 - 3.2.1. Piezómetro 1
 - 3.2.2. Piezómetro 2
 - 3.2.3. Piezómetro 3
 - 3.2.4. Piezómetro 4
 - 3.3. Medición del desplazamiento
 - 3.3.1. Piezómetro 1
 - 3.3.2. Piezómetro 2
 - 3.3.3. Piezómetro 3
 - 3.3.4. Piezómetro 4
4. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
- 4.1. Análisis de correlación
 - 4.2. Análisis de estratificación
 - 4.3. Hidrogramas
 - 4.4. Plano de fluctuación
 - 4.5. Resumen de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

10.1. Estudio

La investigación geotécnica propuesta es de tipo correlacional, ya que se busca saber cómo se comporta la ladera con las variaciones del nivel freático. Además, busca determinar la significancia que el comportamiento de estas variables tiene en la estabilidad del área en estudio.

Este estudio es experimental y será realizado longitudinalmente en el área trazada para la investigación.

Para el correcto control del diseño se definirá y verificará que las condiciones propuestas al inicio no varíen. Estas condiciones son:

- Todos los piezómetros tendrán la misma profundidad.
- La altura de la tubería ranurada será la misma en cada piezómetro.
- Se utilizará el mismo equipo y procedimiento para realizar las mediciones.
- La frecuencia de las mediciones del nivel freático será la misma para cada uno.
- Las mediciones topográficas serán tomadas desde el punto fijado para toda la investigación.

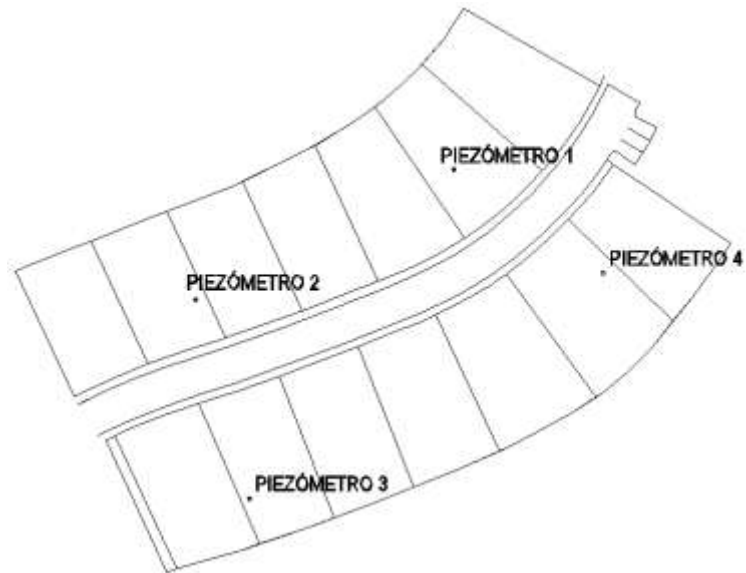
- Se verificará que todos los piezómetros cuenten con el tapón superior para evitar la entrada de agua pluvial.

10.2. Fase 1: investigación preliminar

Los trabajos a realizarse en esta fase comprenden específicamente trabajos preliminares de campo:

- Visita preliminar: previo a iniciar los trabajos de instalación se realizará una vista de campo para delimitar el área de estudio y la ubicación de cada piezómetro.
 - Delimitación del área en estudio: en la vista de campo se podrá determinar que el área que presenta grietas tensionales corresponde a 14 lotes, según lo indicado en los planos de distribución de la urbanización. El área en estudio se ha delimitado considerando 500 metros cuadrados por cada lote y 1,000 metros cuadrados correspondientes a calles y área verde, lo que da un total de 8,000 metros cuadrados.
 - Ubicación de los piezómetros: para monitorear el área establecida se propone la instalación de 4 piezómetros, uno cercano a cada vértice del polígono que forma el área estudiada. Las coordenadas exactas y distancias entre piezómetros serán definidas con topografía al momento de la instalación. A continuación se presenta un esquema referencial de la ubicación propuesta.

Figura 11. **Ubicación preliminar de los piezómetros**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCad.

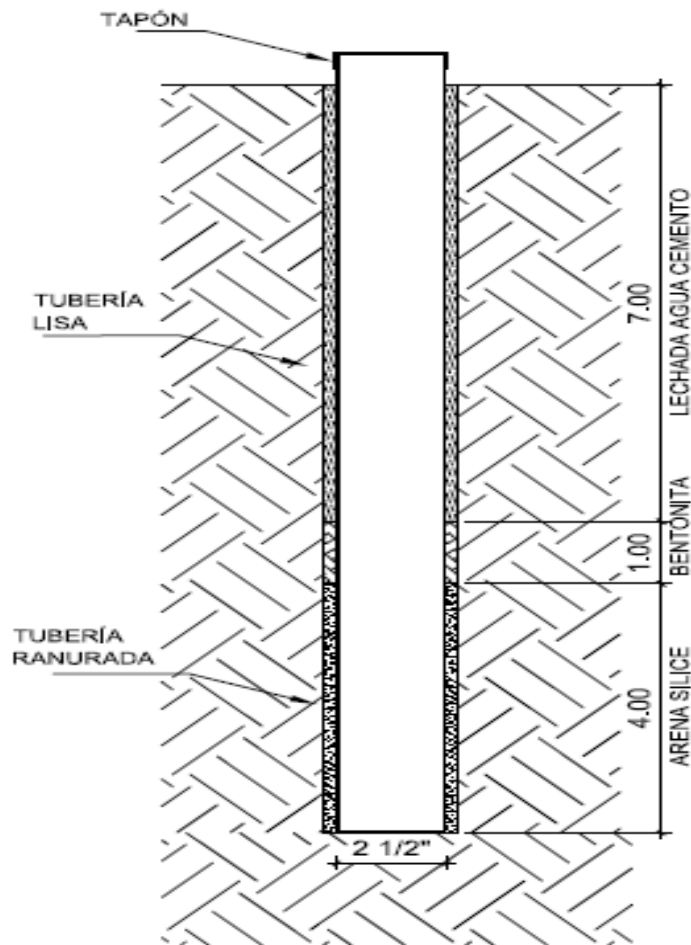
- Ubicación del punto fijo de medición: se establecerá un punto fijo para las mediciones topográficas. El punto a elegir debe encontrarse fuera del área en estudio y con una ubicación tal que puedan ser visualizados los 4 piezómetros.
- Determinación de la frecuencia de las mediciones: la frecuencia con que se deben realizar las lecturas depende del tipo de estudio que se desea realizar. Para los fines de este estudio se propone efectuarlas dos veces al mes. Las mediciones se han programado de tal forma que se tenga un historial de la variación de los niveles freáticos en función del tiempo y la magnitud del desplazamiento de la ladera. Además, que se cuente con registros de las variaciones en época seca y lluviosa.

Se deberá realizar una medición inicial luego de la instalación y se recomiendan mediciones quincenales en las siguientes semanas, durante seis meses. Esta frecuencia se podrá modificar en función de los resultados obtenidos. Además, una vez al mes se medirá la ubicación de la referencia topográfica de cada piezómetro.

- Instalación de los piezómetros: previo a la instalación se ubicarán los mojones o puntos de instalación de cada piezómetro con referencias topográficas tomadas desde el punto fijo establecido para toda la investigación. La instalación de los piezómetros consiste en realizar un sondeo en suelo de 3" de diámetro de 12.00 metros de longitud. La perforación será realizada a destrucción, es decir que no se tendrá recuperación de muestras de suelo. Luego deberá ejecutarse lo siguiente:
 - Posterior a la perforación se prepara e instala la tubería piezométrica, la cual consiste en tubería PVC de 160 psi de 2 ½" de diámetro. Se deben colocar 4.00 metros de longitud de tubería ranurada y 8.00 metros de tubería lisa. La longitud ranurada se forra con geotextil no tejido para evitar el ingreso de suelo fino que pueda tapar las ranuras. En el fondo de la perforación se coloca el extremo ranurado y en el otro debe quedar ligeramente por arriba de la boca de la perforación.
 - Una vez fijada la tubería se colocará un filtro de suelo granular en el espacio dejado entre la tubería y las paredes de la perforación. Se colocarán 4.00 metros de altura de material granular (arena sílice), y luego para sellar el bulbo poroso y aislarlo del resto de la perforación, se aplicará 1 metro con sello de bentonita y 7 con

lechada de agua cemento para fijar la tubería. En la parte superior de la tubería se colocará un tapón de PVC para evitar el ingreso de basura o agua de lluvia que altere las condiciones y resultados. A continuación se presenta un esquema referencial del detalle de un piezómetro.

Figura 12. Detalle de piezómetro



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCad.

- Mediciones del nivel freático: la altura que alcanza el nivel de agua dentro del tubo piezométrico se determina introduciendo por el interior del tubo el medidor Water Level Meter, Model 101, marca Solinst. Este medidor cuenta con una sonda de prueba de presión nominal para 500 psi y láser, conectados a una cinta métrica. La sonda incorpora un intervalo de aislamiento entre los electrodos y cuando hace contacto con agua, se completa el circuito, activando un timbre fuerte y una luz. El nivel de agua se determina tomando la lectura directa de la cinta en la parte superior del entubado del piezómetro.

Figura 13. **Medidor del nivel de agua, modelo 101**



Fuente: www.geokon.com/101. Consulta: 11 de noviembre de 2013.

Las mediciones registradas serán tabuladas en una tabla para su control. A continuación se presenta una tabla preliminar para el registro de los datos.

Es importante mencionar que este puede sufrir cambios según se considere necesario en el transcurso de la investigación.

Tabla III. **Registro de mediciones del nivel freático**

Fecha	Ubicación piezómetro		Cota del terreno (m)	Cota tubería piezométrica (m)	Registro nivel freático (m)	Cota nivel freático (m)	Observaciones
	X	Y					

Fuente: elaboración propia.

- Mediciones del desplazamiento: el desplazamiento de la ladera será medido por medio de levantamientos topográficos de las coordenadas establecidas en el levantamiento de instalación. Las mediciones serán realizadas desde el punto fijado en el primer levantamiento. A continuación se presenta un cuadro referencial para la tabulación de los datos recopilados en las mediciones topográficas.

Tabla IV. **Registro de mediciones topográficas**

Fecha	Piezómetro	Coordenadas (m)	
		X	Y

Fuente: elaboración propia.

10.3. Fase 2: trabajos de gabinete

En esta fase se incluyen los trabajos de gabinete, los cuales consiste en:

- Elaboración de un plano de ubicación de piezómetros con coordenadas topográficas iniciales.
- Tabulación de los registros de las mediciones del nivel freático de cada uno de los piezómetros instalados.
- Tabulación de los resultados obtenidos de las mediciones topográficas en cada piezómetro.
- Elaboración de perfiles de variación de la línea piezométrica. Se realizarán dos perfiles, uno de los piezómetros 1 y 4 y el segundo de los piezómetros 2 y 3.
- Construcción de un hidrogramas de cada piezómetro en donde se muestre en forma gráfica las variaciones del nivel freático en el tiempo, con base en los registros de la variación de nivel freático obtenidos en campo.
- Revisión y análisis del estudio de suelos del área.

10.4. Fase 3: análisis de correlaciones

En esta fase serán desarrollados los trabajos de elaboración y análisis de las correlaciones de la información, tales como:

- Análisis de correlación entre el nivel freático y las coordenadas topográficas. Para este se utilizará la distancia entre el punto fijo establecido y el piezómetro observado.
- Interpretación de resultados de correlación, hidrogramas y estratigrafía, obtenidos en el estudio.
- Interpretación de los resultados de la correlación con la información de los estratos y parámetros del suelo, indicados en el estudio de suelos.
- Redacción de conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.
- Anexión de partes utilizadas del informe de suelos de área.

10.5. Fase 4: técnicas de investigación

Las técnicas de investigación que se emplearán para el desarrollo de este estudio serán:

- Estudio y análisis de la información recabada en el sitio.
- Recopilación y análisis de los datos registrados en las mediciones del nivel freático y el movimiento superficial por medio de levantamientos topográficos.

- Del estudio de suelos del proyecto residencial Lomas de San Isidro, realizado por la empresa del Dr. Rodolfo Semrau Lago, se obtendrán los siguientes valores del área establecida para la investigación, con el fin de relacionarlos con los registros obtenidos en este estudio: peso específico, ángulo de fricción interna, cohesión, niveles freáticos y ensayos de laboratorio.
- Análisis de correlaciones de las variables definidas, desplazamiento y nivel freático, según los datos obtenidos en campo. Para realizar este análisis se aplicará un modelo de regresión lineal simple, en el cual se utilizará como variable dependiente el desplazamiento y como variable independiente el nivel freático. Se partirá del siguiente modelo:

$$DESP_t = \beta_0 + \beta_1 \text{Niv.freático}_t + \varepsilon_t$$

A partir de la estimación de los parámetros β_0 y β_1 se realizarán pruebas de significancia para determinar si la fluctuación de nivel freático explica el desplazamiento. De acuerdo con las hipótesis planteadas, estas se reformularían para el modelo de regresión lineal simple de la siguiente manera:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

Análisis de los resultados de las correlaciones con los parámetros de suelo indicados en estudio de suelos del área, para identificar la relación geotécnica existente.

11. RESULTADOS ESPERADOS

Confirmar la funcionalidad de la herramienta empleada en la investigación de la ladera sureste del proyecto residencial Lomas de San Isidro, zona 16, Guatemala, y si esta ayuda a determinar la relación entre las fluctuaciones del nivel freático y el desplazamiento.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Figura 13. Cronograma de los meses 1 al 4

Descripción de actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Fase 1																
Visita preliminar	■															
Determinación del área de estudio	■	■														
Ubicación de los piezómetros	■	■														
Ubicación del punto fijo de medición	■	■														
Determinación de la frecuencia de mediciones	■	■														
Instalación de los piezómetros			■	■												
Mediciones del nivel freático				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Mediciones del desplazamiento				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fase 2																
Elaboración de planos																
Tabulación de registros																
Construcción de hidrogramas																
Revisión y análisis del estudio de suelos																
Fase 3																
Análisis de correlaciones																
Interpretación de resultados																
Conclusiones y recomendaciones																
Anexos																

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Cronograma de los meses 5 al 8

Descripción de actividad	Mes 5				Mes 6				Mes 7				Mes 8			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Fase 1																
Visita preliminar																
Determinación del área de estudio																
Ubicación de los piezómetros																
Ubicación del punto fijo de medición																
Determinación de la frecuencia de mediciones																
Instalación de los piezómetros																
Mediciones del nivel freático	■	■	■	■	■	■	■	■								
Mediciones del desplazamiento	■	■	■	■	■	■	■	■								
Fase 2																
Elaboración de planos									■	■	■					
Tabulación de registros									■	■	■					
Construcción de hidrogramas										■	■	■				
Revisión y análisis del estudio de suelos											■	■	■			
Fase 3																
Análisis de correlaciones													■	■	■	
Interpretación de resultados														■	■	■
Conclusiones y recomendaciones															■	■
Anexos																■

Fuente: elaboración propia.

13. RECURSOS NECESARIOS

Los recursos utilizados para la elaboración de esta investigación se enumeran a continuación:

13.1. Recursos físicos

- Vehículo para realizar mediciones
- Cámara fotográfica
- Computadora
- Medidor de nivel de agua, modelo 101
- Equipo de topografía

13.2. Recursos financieros

Para la elaboración del presente estudio se contará con la ayuda de la empresa desarrolladora de la urbanización y con la empresa contratada para la realización de los trabajos de campo, es decir, la encargada de la instalación de los piezómetros y medición periódica del nivel freático.

Se adjuntan las autorizaciones extendidas para la utilización de la información indicada como parte de la investigación propuesta (ver anexos).

Tabla V. **Recursos financieros**

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD	INVERSIÓN
Equipo de topografía: se requiere contratar un día de equipo y personal de topografía para medición inicial. Este trabajo fue contratado por la empresa que actualmente realiza la urbanización del proyecto.	Q.900,00
Instalación de piezómetros: la instalación de la instrumentación requerida para el estudio fue contratada por la empresa que actualmente realiza los trabajos de urbanización en el área en estudio.	Q.12 000,00
Mediciones periódicas: el desarrollo del plan de monitoreo, así como la utilización del equipo de medición es proporcionado por la empresa Proyectos y Desarrollo de Construcción S.A.	Q.8 000,00
Mediciones topográficas: se requiere contratar cinco levantamientos topográficos. Incluye equipo y personal necesario.	Q.3 250,00
Estudio de suelos: reproducción de una copia del estudio de suelos proporcionado por la empresa desarrolladora de la urbanización.	Q.50,00
Honorarios asesor	Q. 2 500,00
COSTO TOTAL DE LA INVESTIGACIÓN	Q.26 700,00

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. ALCÁNTARA AYALA, Irasema et al. *Inestabilidad de laderas*. Secretaría Nacional de Prevención de Desastres. [en línea]. Disponible en:
<http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/363/1/images/fasciculo_laderas.pdf>. [Consulta: agosto de 2013].
2. *Auscultación de taludes (Instrumentación)*. [en línea]. Disponible en:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1864/16/cap15.pdf>>. [Consulta: agosto de 2013].
3. BARILLAS, Edy Manolo. *Historia y ocurrencia de los deslizamientos generados por lluvia en Guatemala, Centro América*. Guatemala: Programa de Intercambio Científico para Centro América y el Caribe de la Fundación Fullbright (s.f.). 65 p.
4. CAHUANA OCHOA, Walter Nelson. *Monitoreo hidrológico en zonas susceptibles a desplazamientos*. Perú: Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Instituto Geofísico de Perú, 2008. 198 p.
5. CASSIARAGA, Eduardo; FERRER, Alejandro. *Ingeniería geológica ambiental, control de aguas subterráneas y su aprovechamiento*. Universidad Politécnica de Valencia, 2008. 54 p.
6. CASTENY, G. *Tratado práctico de aguas subterráneas*. 2a ed. Barcelona: Omega, 1971. 672 p.

7. CUANALO CAMPOS, Oscar Andrés; OLIVA GONZÁLEZ, Aldo Onel; GALLARDO AMAYA, Romel Jesús. *Inestabilidad de laderas, influencia de la actividad humana*. México: Elementos 84. 2011. 7 p.
8. DELUCHI, Marta et al. *Variaciones de los niveles freáticos y su relación con el agua superficial en la plata*. Argentina: IV Congreso Hidrogeológico Argentino y II Seminario Hispanolatinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea 2005. 8 p.
9. DUNNICLIFF, John. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 377 p.
10. DUQUE ESCOBAR, Gonzálo. *Manual de geología para ingenieros*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Colombia, 2013. 479 p.
11. ECHARRI, Luis. *Ciencias de la Tierra y del medio ambiente*. [en línea]. Disponible en: <<http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/08RiesgN/140M ovTierr.htm>>. [Consulta: 05 de agosto de 2013].
12. ESPINOZA, Carlos. *Movimiento de agua subterránea*. Curso de hidráulica de aguas subterráneas y su aprovechamiento. Universidad de Chile, 2007. 25 p.
13. ESTRADA GÓMEZ, Jorge. *Inestabilidad de taludes en el valle de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1989. 71 p.

14. Geopetrol, S. A. *Estudio hidrogeológico para la implementación de un sistema de monitoreo y alerta ante deslizamientos en asentamientos urbanos del departamento de Guatemala, Centro América*. Guatemala: Alianza Oxfam, 2007. 83 p.
15. GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis et al. *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación, 2002. 744 p.
16. HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNANDEZ COLLADO, Carlos; BAPTISTA LUCIO, Pilar. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: Mc Graw Hill, 2006. 128 p.
17. *Instrumentación geotécnica*. [en línea]. Disponible en: <<http://ingenieriageotecnicaaldia.wordpress.com/>>. [Consulta: 19 de octubre de 2011].
18. JUÁREZ, Víctor Hugo; PONCE, Alexis. Guatemala. *Empresarial plus. Desarrollo Inmobiliario e inversión en Guatemala*: [en línea]. Disponible en: <<http://guatemalaempresa.blogspot.com/search/?q=+una+tendencia+a+crear+ambientes+que+no+solo+armonicen+con+la+naturaleza+sino+tambi%C3%A9n+brinden+un+mejor+entorno+en+cuanto+a+seguridad+y+eficiencia&x=-1112&y=-237>> [Consulta: 23 de mayo de 2013].
19. LLOPIS LLADÓ, Noel. *Fundamentos de hidrogeología cárstica: Introducción a la geoespeleología*. Primera Edición Madrid: Blume, 1970. 269 p.

20. MENDOZA, Manuel et al. *Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. Área de Ingeniería Estructural y Geotécnica, 2002. 76 p.
21. MORA CHINCHILLA, Rolando. *Fundamentos sobre deslizamientos*. [en línea]. Disponible en: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/conf15.pdf>>. [Consulta: agosto de 2013].
22. NÚÑEZ BARBOZA, Carlos. *Mecánica de rocas II. Monitoreo en la estabilidad de taludes*: [en línea]. Disponible en: <http://www.slideshare.net/elisercubastapia/monitoreo-27964616>>. [Consulta: 12 de enero de 2014].
23. OBANDO RIVERA, Tupak Ernesto. *Sistemas de monitoreo y control de la estabilidad de taludes rocosos y suelos*. España: Universidad Internacional de Andalucía, 2009. 9 p.
24. ORTUÑO ABAD, Luis. *Estabilización de taludes en suelo*. Curso de geotecnia para infraestructuras. Sevilla: Uriel y Asociados, S.A, 2004. 43 p.
25. PALOMINO, César. *Estudio del terreno y obras correctivas en el sitio de El Cune, municipio de Villeta, Cundinamarca, con aplicación del método observacional*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2011. 129 p.
26. PRICE, Michael. *Agua subterránea*. México: Limusa-Noriega Editores, 2003. 330 p.

27. RINALDI, Víctor; ZEBALLOS, Marcelo; ROCCO, Ricardo. *Efecto del ascenso del nivel freático en suelos colapsables*. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Geotecnia, 2010. 13 p.
28. RODRÍGUEZ DÍAZ, Jorge Abraham. *Dinámica de suelos*. Primera Edición. México: Limusa, 2005. 310 p.
29. RODRÍGUEZ SOTO, Ángel. *La instrumentación y su relación con la caracterización geotécnica del terreno a controlar*. ISB: 84-7840-485-6. Madrid: IGME, 2003. 5 p.
30. SALGADO, Luis. *Estudio de niveles freáticos y piezométricos*. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Chile, (s.f.). 29 p.
31. SEMRAU LAGO, Rodolfo. *Informe No. 145813: Estudio de suelos y cimentaciones*. Cluster Posadas, Condominio Lomas de San Isidro. Guatemala, 2013. 12 p.
32. SUÁREZ, Jaime. *Deslizamientos: análisis geotécnico*. Volumen I. Bucaramanga Colombia: Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos, 2009. 588 p.
33. SUÁREZ DÍAZ, Jaime. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos, 1998. 384 p.

34. TOBAR, Marcela. *Aplicación de medidas de control en deslizamientos utilizadas en Japón. Estudio de caso: Deslizamiento El Berrinche, Tegucigalpa, Honduras*. El Salvador: Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo y Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano de El Salvador, 2014. 15 p.
35. TRUJILLO MONTENEGRO, Mario Roberto. *Consideraciones en el análisis de estabilidad de taludes*. Trabajo de graduación de Ing. civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1985. 46 p.
36. WOOLDRIDGE, Jeffrey. *Introducción a la economía*. 4a ed. México: CENGAGE Learning, 2010. 755 p.

15. ANEXOS

Anexo 1. Carta de la empresa Kroghen de Guatemala, S. A.



Fuente: empresa Kroghen de Guatemala, S. A.

Anexo 2. **Carta de la empresa Proyectos y Desarrollo de Construcción, S. A.**



Fuente: empresa Proyectos y Desarrollo de Construcción, S. A.