



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Análisis de la incidencia del grado de saturación de los suelos en el movimiento de laderas asociado a infraestructuras de carreteras, mediante métodos estadísticos.

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Salinas Ochoa, Fabián Ramiro.

DIRECTORA: Segarra Morales, María Soledad, M.Sc.

LOJA – ECUADOR

2017



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

M.Sc.

María Soledad Segarra Morales.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Análisis de la incidencia del grado de saturación de los suelos en el movimiento de laderas asociado a infraestructuras de carreteras, mediante métodos estadísticos** realizado por: Salinas Ochoa, Fabián Ramiro ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuento se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre del 2017

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Fabián Ramiro Salinas Ochoa declaro ser autor del presente trabajo de titulación: **Análisis de la incidencia del grado de saturación de los suelos en el movimiento de laderas asociado a infraestructuras de carreteras, mediante métodos estadísticos**, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo la M.Sc. María Soledad Segarra Morales directora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico de las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnico y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero académico o institucional (operativo) de la Universidad.

f).

Autor: Salinas Ochoa, Fabián Ramiro.

Cédula: 1103649529

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por sus bendiciones recibidas y oportunidades que me ha brindado a lo largo de mis estudios superiores, pues estoy seguro que su constante guía y mi fe han dado como resultado este logro.

De igual forma mi papá Fabián Ramiro Salinas Pacheco y mamá Naya Itamar Ochoa Álvarez, por su perseverancia, motivación y deseos de superación inculcados en mí, que han hecho posible que mi sueño de niño se vuelva realidad.

A mis hermanos Andrea, Stefany, Astrid, Andrés y a mi sobrino Alejandro, que desde un inicio me demostraron su apoyo, cariño y sobre todo que confiaron en que mi sueño se haría realidad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por haberme dado la vida y permitirme finalizar esta etapa de mi vida dándome fortaleza y sabiduría para poder sobrellevar las dificultades que se me han presentado durante este trayecto.

A mi padre Fabián y a mi madre Naya, por su apoyo incondicional y constate sacrificio hicieron posible la finalización de mis estudios superiores.

A mi directora de trabajo de fin de titulación M Sc. María Soledad Segarra Morales, que gracias a sus directrices, paciencia y dedicación permitieron manejar inteligentemente el proyecto llevándolo a su culminación.

A mis docentes M Sc. Belizario Amador Zarate y M Sc. Carmen Antonieta Esparza Villalba por su ayuda permanente y e interés en este trabajo de investigación, pues les permitió darme consejos muy acertados sobre el desarrollo del proyecto.

A mis hermanos y a las personas que estuvieron desde un inicio de esta etapa y a los que se fueron sumando en el trayecto de misma y me dieron su apoyo y buenos deseos en los momentos precisos. Ya que me han ayudado a crecer en mi vida personal y académica, por medio de buenas y malas experiencias que me han fortalecido y me encaminaron a una finalización feliz de una etapa muy importante de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

CARATULA.....	I
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VI
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS.....	5
JUSTIFICACION	5
CAPITULO I.....	6
ESTADO DEL ARTE.....	6
1.1. GENERALIDADES	7
1.2. RELACIONES PESO – VOLUMEN	8
1.3. PERMEABILIDAD	11
1.4. CONDICIÓN DE SATURACIÓN DEL SUELO.....	12
1.4.1. Suelo saturado.....	13
1.4.2. Suelo parcialmente saturado.....	13
1.5. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.....	13
1.6. ESTABILIDAD DE TALUDES	14
1.7. LA HUMEDAD SUPERFICIAL.....	16
1.8. SECUENCIA HIDROLÓGICA DEL PROCESO DE INESTABILIZACIÓN	17
1.9. GEOESTADÍSTICA	17
1.9.1. Análisis exploratorio de datos espaciales.-	17
1.9.2. Análisis estructural.....	17
1.9.3. Estimaciones.....	18
CAPITULO II.....	19
MATERIALES Y METODOS	19
2.1. GENERALIDADES	20
2.2. ZONA DE ESTUDIO	20
2.2.1. Sismicidad.....	21
2.2.2. Geología regional.....	21
2.2.3. Hidrografía.....	21
2.2.4. Cobertura vegetal.....	21
2.3. MATERIALES	21
2.4. METODOLOGÍA	22
2.4.1. Trabajo de Campo.....	23
2.4.2. Trabajo de Laboratorio	25
2.4.3. Análisis geoestadístico.....	27
CAPITULO III.....	30
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	30

3.1.	GENERALIDADES	31
3.2.	RESULTADOS DE LABORATORIO.....	31
3.2.1.	Resultados del modelo físico experimental.....	32
3.3.	RESULTADOS DE CAMPO.....	35
3.3.1.	Monitoreo de puntos de control.....	35
3.4.	ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO.....	38
3.4.1.	Análisis exploratorio.....	38
3.4.2.	Análisis estructural.....	42
3.4.3.	Estimación.....	43
3.5.	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA INFRAESTRUCTURA LINEAL EN EL PERIODO DE ANÁLISIS.....	45
	CONCLUSIONES.....	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	50
	ANEXOS	53

RESUMEN

En la presente investigación se realizó el análisis geoestadístico de la incidencia del grado de saturación de los suelos frente al movimiento de masas. Para ello se hizo uso de un modelo físico experimental que permitió ver la interacción entre la variación del grado de saturación y el comportamiento de los suelos.

El talud seleccionado para la investigación está compuesto por 4 estratos cuya tipologías son: arenas arcillosas y arcilla inorgánicas de alta plasticidad. De los cuales se realizó el muestreo y preparación de especímenes para la realización de una simulación de precipitación por goteo que permitió variar el grado de saturación de la muestra por medio del incremento del contenido de humedad de los suelos.

Los resultados obtenidos evidenciaron que las arenas alcanzan su saturación en porcentajes próximos al límite líquido, no siendo este el caso de las arcillas inorgánicas de alta plasticidad debido a sus propiedades y baja permeabilidad favorecen a la acumulación de agua, provocando la impermeabilización y acumulación del agua, desencadenando el crecimiento del nivel freático y por ende un aumento del peso específico del suelo.

Palabras claves: grado de saturación, contenido de humedad, límite líquido, permeabilidad.

ABSTRACT

In the present investigation the geostatistical analysis of the incidence of the degree of saturation of the soils in front of the mass movement was carried out. For this, an experimental physical model was used that allowed to see the interaction between the variation of the degree of saturation and the behavior of the soils.

The slope selected for the research is composed by 4 strata whose typology is: clayey sands and inorganic clay of high plasticity. Sampling and preparation of specimens were carried out a drip precipitation simulation that allowed the variation of the degree of saturation of the sample by increasing the soil moisture content.

The results obtained show that the sands reach their saturation in percentages close to the liquid limit, this being not the case of inorganic clays of high plasticity due to their properties and low permeability favor the accumulation of water, provoking the waterproofing and water accumulation, Triggering the growth of the water table and therefore an increase in the specific weight of the soils.

Key words: degree of saturation, moisture content, liquid limit, permeability.

INTRODUCCIÓN

Dentro de lo que son los movimientos de laderas o de talud, las condiciones geológicas, geomorfológicas y la intervención antrópica, juegan un papel fundamental en su estabilidad; sin embargo, un solo factor como la precipitación, es considerado el factor externo que puede generar una respuesta casi inmediata de movilizar los materiales que conforman el talud, sea por el rápido incremento de los esfuerzos debido a la variación del grado de saturación del suelo o por la reducción de su resistencia, lo que aumenta la probabilidad del movimiento de masas (Gerscovich, 2012; Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010; González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Según los registros de los movimientos de masa producidos por la precipitación como un factor externo, el continente asiático, exactamente los países de Nepal, Japón y China son los que registran la mayor cantidad de deslizamientos que producen pérdidas por daños a infraestructuras civiles y pérdidas de vidas humanas. En función de estas catástrofes los ingenieros geotécnicos, principalmente de los países más afectados, estudian la importancia de la correlación entre la precipitación versus movimiento de masas, y la consecuente dinamización del movimiento en capas subsiguientes a la superficie (Mora & Rojas, 2012; Ramos, Trujillo, & Prada, 2015; Echeverri & Valencia, 2004; Sanchez, 2011).

El proyecto de investigación, se generó a partir de la correlación observada entre la precipitación y el movimiento de masas que se produce en la región estudiada cuya ubicación es al noroeste de la ciudad de Loja, en la parroquia Carigán, barrio de San José de Panamá, vía Lateral de Paso, entre vía a la costa y la vía Panamericana. Siendo esta zona escogida por ser un área de expansión urbana, punto de encuentro comercial, además de ser un punto de conexión de dos ciudades, por lo que el alcance del proyecto está enfocado en determinar la incidencia de la variación del grado de saturación, producido por el aumento de la humedad producto de la precipitación, frente al movimiento de la masa de suelo y a la vez la afección inducida a la infraestructura vial que atraviesa al talud en estudio.

Teniendo como objetivo principal, analizar el efecto del grado de saturación de los suelos en el movimiento de laderas mediante métodos geoestadísticos, se ha obtenido la topografía del sector, las propiedades físicas-mecánicas de los suelos y el grado de saturación de los mismos, y con la ayuda de un modelo físico que permitió la simulación de una precipitación por goteo en cada espécimen con la finalidad de variar el contenido de humedad de los especímenes, hasta lograr que estos fluyan (se asemeje mecánicamente a un líquido).

Con la información que se recopiló en campo y laboratorio se correlacionó el comportamiento del grado de saturación de los suelos mediante el aumento del contenido de humedad por medio de un estímulo externo "lluvia" y mediante geoestadística se identificó las zonas donde el grado de saturación de los suelos fue relativamente alto comparado con la dinámica del suelo de estas zonas, y su afección de estos a la integridad de la infraestructura lineal existente.

En proyecto se encuentra dividido en cuatro capítulos los cuales tratarán de:

Capítulo I.- El estado del arte, se expone la fundamentación teórica mínima que se debe tuvo presente en el desarrollo del proyecto.

Capítulo II.- Materiales y métodos, da la información inherente al sector estudiado y la forma en la que se desarrolló el trabajo en campo y de laboratorio

Capítulo III.- El análisis de resultados, se expondrá los datos recopilados en la fase de campo y de laboratorio, donde estos fueron analizados y fundamentos en base a investigaciones recientes y de gran impacto relacionados al proyecto de investigación.

Capítulo IV.- La conclusiones y recomendaciones, acorde a los resultados expuestos en el Capítulo III, y se expone los inconvenientes que se presentaron en el desarrollo del proyecto, que ayudara afinar la metodología de futuras investigaciones relacionadas a la misma línea.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Analizar la incidencia del grado de saturación de los suelos en el movimiento de masas.

Objetivos específicos:

- Analizar la afectación de las precipitaciones en el movimiento de laderas en base al grado de saturación de los suelos del talud.
- Analizar geoestadísticamente la incidencia del grado de saturación de los suelos frente al movimiento de masas.

JUSTIFICACION

El Ecuador, por la ubicación geográfica y por encontrarse atravesado por la Cordillera de Los Andes, se ve afectado por las constantes precipitaciones en época de invierno, mismas que ocasionan pérdidas económicas importantes. En el ámbito vial, éstas pérdidas se relacionan con deslizamientos de taludes, reparación y mantenimiento de carreteras, como consecuencia de este movimiento de laderas se produce un estancamiento de la economía del país y lo más importante pérdidas de vidas humanas.

Es por esto que con la presente investigación se pretende determinar mediante geoestadística la incidencia del contenido de humedad y el grado de saturación de los suelos finos producidos por la infiltración durante periodos de lluvia, con el movimiento de laderas, de tal manera que se pueda prevenir tempranamente en base lluvias esperadas en épocas invernales.

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1. Generalidades

Los suelos son estructuras que están conformados por partículas minerales de distinta geometría y diámetro, siendo esto producto de la desintegración mecánica o química de las rocas, que colaboran en la formación de espacios entre ellas conocidos como poros, siendo estos espacios, el medio que le permiten viajar al agua que se llega a infiltrar (Rico;del Castillo, 2005).

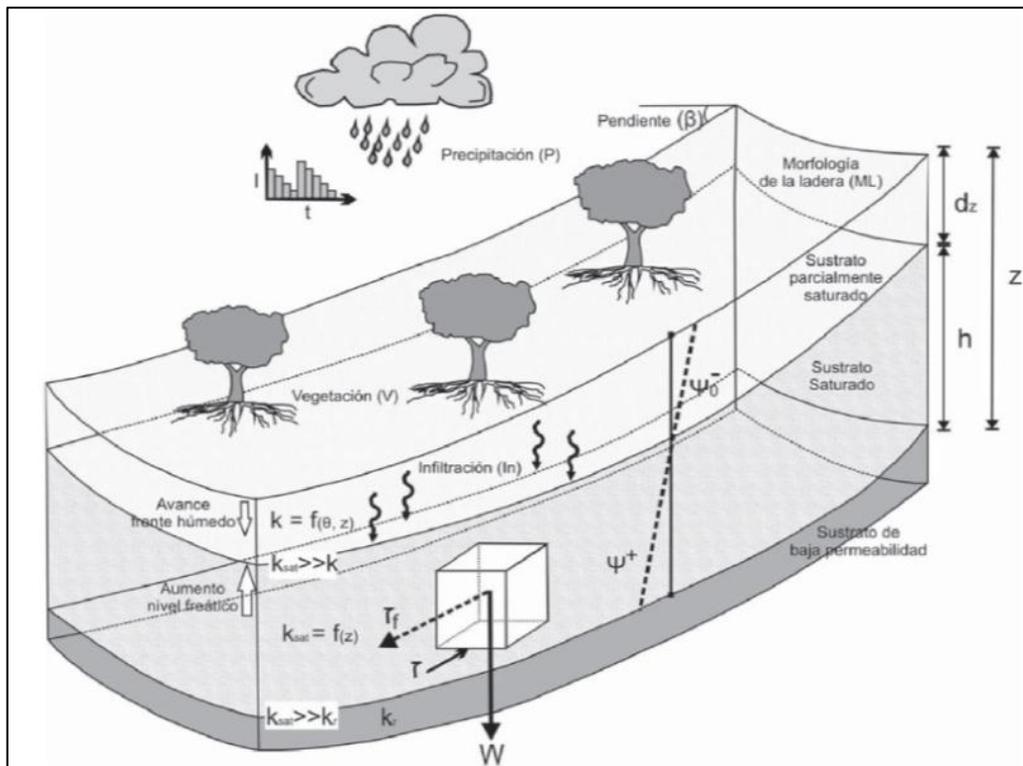


Figura 1. Variables que intervienen en deslizamientos producidos por lluvias.

Fuente.- (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010).

Elaboración.- (Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010).

En la Figura 1, las fallas estructurales del talud, no sólo dependen de las características de resistencia del suelo, sino también de sus propiedades hidráulicas, espesor del perfil de meteorización, cobertura vegetal que contribuyen a la resistencia de los suelos y las condiciones de flujo sub-superficial, induciendo condiciones variables de inestabilidad como respuesta a los patrones de lluvia. Donde la infiltración del agua producto de la precipitación pluvial básicamente puede ser de dos tipos: inundación de la superficie del suelo y la infiltración controlada (Alonso et al., 1995; Collins & Znidarcic, 2004; Crosta, 1998; Aristizábal, Martínez & Vélez, 2010).

De esta forma los factores que controlan la ocurrencia y distribución de los movimientos en masa pueden dividirse en dos categorías: las variables cuasi-estáticas o condicionantes y las variables dinámicas o detonantes (Aristizábal, 2001).

- Las variables cuasi-estáticas.- Contribuyen a la susceptibilidad de las vertientes y definen la distribución espacial de los movimientos en masa. Estos son las propiedades de los suelos, la topografía entre otro (Aristizábal, 2001).
- Las variables dinámicas.- Son factores detonantes de laderas, que se ven afectados por las actividades climatológicas, procesos hidrológicos, entre otros (Aristizábal, 2001).

Como lo enuncia (Laceda y Satos, 2000) citado por (Suarez, 1998) Las fluctuaciones en sus parámetros resistentes, originan deslizamientos con lluvias de menor intensidad que episodios previos, puesto que el suelo se llega a fatigar, debido a las presiones de poros cíclicas, lo que provoca un descenso en la envolvente de falla o disminución de su cohesión.

1.2. Relaciones peso – volumen

Un suelo, por lo generalmente lo constituyen tres fases las cuales se describen a continuación, que conforma cada una de estas fases.

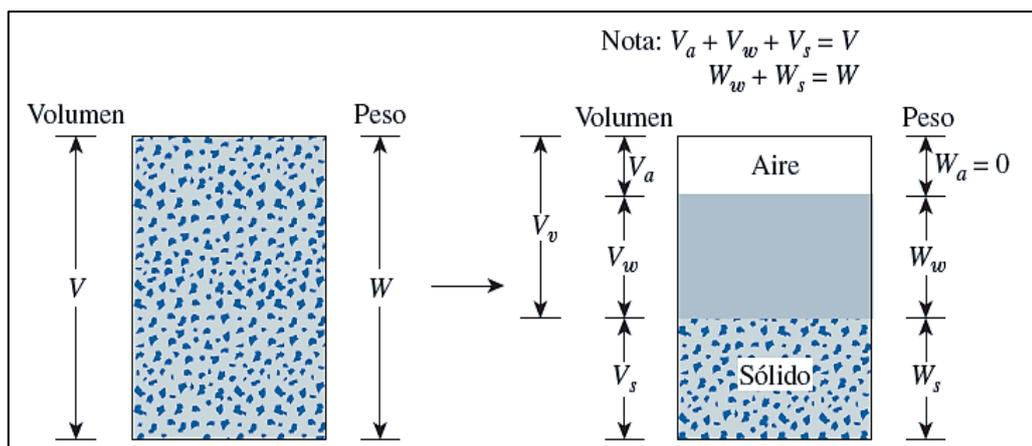


Figura 2. Relaciones peso - volumen del suelo.

Fuente.- (Das, 2015)

Elaboración.- (Das, 2015)

- Fase sólida.- Se encuentra constituida por los minerales (incluyendo la parte líquida absorbida por el sólido), es decir solo por el volumen de los sólidos del suelo (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)
- Fase líquida.- La conforma específicamente el agua que se encuentra libre entre los poros del suelo, es decir, en el volumen de vacíos (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)
- Fase Gaseosa.- Se puede decir que en esta fase la compone el aire y otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.). Al igual que la fase líquida, estos se encuentran localizados en el volumen de vacíos y esta fase gaseosa cuando el suelo

se encuentra saturado esta no existe por lo que la fase líquida ocupa en su totalidad el volumen de vacíos (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Según las fases del suelo y las limitaciones de cada una de ellas, se llegan a plantear relaciones en base a su peso y volumen. Con las que se facilita conocer las propiedades índices del suelo.

Peso Total.- Es la suma de los pesos comprendidos por la parte sólida y líquida del suelo. Teniendo en cuenta que el peso de la parte gaseosa es igual a cero. Por lo tanto se tiene las relaciones que se muestran a continuación:

$$W_m = W_s + W_w + W_v \quad \text{(ecu.1)}$$

Dónde:

- Peso del agua.- Es la diferencia entre el peso total de la muestra (suelo+ agua) menos el peso de la parte sólida de la muestra (suelo) (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$W_w = W_m - W_s \quad \text{(ecu.2)}$$

- Peso de los sólidos.- Es el producto de la gravedad específica de los sólidos por el peso específico del agua. Aunque se lo puede conocer, secando el suelo, de tal forma que el contenido de humedad del suelo es CH=0 (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$W_s = g_{so} \times r_w \quad \text{(ecu.3)}$$

- Peso de los gases.- Como ya se mencionó anteriormente los gases no tiene peso, solamente es medible su volumen (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$W_v = 0 \quad \text{(ecu.4)}$$

Volumen Total.- Como su nombre lo indica es el volumen general de una muestra, es decir, es el volumen que comprende la parte sólida, líquida y gaseosa (en el caso de existir) de un suelo.

$$V_m = V_s + V_w + V_v \quad \text{(ecu.5)}$$

Dónde:

- Volumen del agua (V_w).- Es la relación entre el peso del agua y su densidad (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$V_w = \frac{W_w}{r_w} \quad \text{(ecu.6)}$$

- Volumen de los sólidos (V_s).- Parte de la relación entre el peso del sólido y su densidad seca (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$V_s = \frac{W_s}{r_s} \quad \text{(ecu.7)}$$

- Volumen de los Vacíos (V_v).- Es la diferencia entre el volumen total de muestra y el volumen de la parte sólida (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$V_v = V_m - V_s \quad \text{(ecu.8)}$$

Peso específico del suelos (Y_m).- También conocido como, peso volumétrico del suelo, por ser el producto de la relación entre peso de la muestra (suelo + agua) y el volumen de la misma (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$r_m = \frac{W_m}{V_m} \quad \text{(ecu.9)}$$

Contenido de Humedad (CH).- Es el porcentaje de agua, obtenido de la relación gravimétrica entre el peso del agua con respecto al suelo en su estado seco (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$CH = \left[\frac{W_w}{W_s} \right] \times 100 \quad \text{(ecu.10)}$$

Peso específico seco (Y_s).- Es el peso volumétrico de la parte sólida del suelo, es decir, la diferencia entre peso volumétrico del suelo por el porcentaje del volumen de la parte líquida del suelo. (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$r_s = \frac{r_m}{1 + \frac{CH}{100}} \quad \text{(ecu.11)}$$

Relación de vacíos (e).- Es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos, su valor va de 0,5 a 15. En laboratorio la relación de vacíos se la obtendrá de la ecuación de peso específico húmedo de suelo (Y_m), que está en función del contenido de humedad (CH), gravedad específica de los sólidos (G_s), peso específico del agua (Y_w) y la relación de vacíos (e).

$$r_m = \frac{(1+CH) \times G_s \times r_w}{(1+e)} \quad \text{(ecu.12)}$$

Donde valores correlacionados son conocidos y fáciles de medir, lo permite conocer la relación de vacíos, por medio de un simple despeje de la ecuación 12. (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005):

$$e = \frac{(1+CH) \times G_s \times r_w}{r_m} - 1 \quad \text{(ecu.11)}$$

Grado de saturación (S).- Es el porcentaje de agua que se encuentra dentro de los poros del suelo, es decir; es la relación entre el volumen de agua con respecto al volumen de los vacíos de un suelo (Das, 2015; Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$S_{(\%)} = \left[\frac{V_w}{V_v} \right] \times 100 = \frac{CH \times G_s}{e} \times 100 \quad \text{(ecu.13)}$$

Las distintas tipologías de suelos alcanzan la saturación en estado natural a diferentes contenidos de humedad, debido a la estructura de la masa de suelos, la composición de minerales, la permeabilidad entre otros. En la tabla 1, se muestran rangos de los contenidos de humedad y propiedades características de los suelos en estado de saturación.

Tabla 1. Relación de vacíos, contenido de humedad y peso unitario seco para suelos en estado de saturación.

Tipo de suelo	e (-)		CH (%)		Peso específico Seco (Kn/m3)	
Arena uniforme floja	0,85		32		14,3	
Arena uniforme densa	0,51		19		17,5	
Arena bien graduada floja	0,67		25		15,9	
Arena bien graduada densa	0,43		16		18,6	
Arcilla recién sedimentada	1,63	30,3	1120	60	0,86	10,3
Arcilla muy blanda	1	2,33	37	86	1,35	8,1
Arcilla blanda	0,67	2,33	25	86	8,1	16,1
Arcilla media	0,49	1,4	18	52	11,3	18,1
Arcilla firme	0,49	1,27	18	47	10,9	18,1
Arcilla muy firme	0,43	1,05	16	39	13,2	18,9
Arcilla dura	0,18	1,03	7	38	13,2	22,9
Arcilla de muy blanda a blanda, muy orgánica	1,8	3	67	110	6,8	9,7
Arcilla de muy blanda a blanda, orgánica	1	1,9	37	70	9,3	13,5

Fuente.- (Jimenez & de justo Alpañes, 1975).

Elaboración.- El autor.

1.3. Permeabilidad

Es la velocidad con la que el agua se llega a infiltrar por una masa porosa, esta depende principalmente de las características del suelo como; porosidad, densidades, estructuración de las partículas, grado de saturación, la intercepción parcial de la precipitación bruta,

existencia de agujeros, fisuras en el terreno, cobertura del suelo por material orgánico y ausencia de golpeteo directo de las gotas de lluvia en el suelo además, las raíces de los arboles forman canales que favorecen la infiltración y percolación del agua (como se citan en Stadtmüller, 1994).

Según estudios se puede decir que en las laderas o taludes conformadas por

- Taludes de suelos homogéneos con una permeabilidad ($k_s < 10^{-6}$ m/s) son más seguros ante lluvias de corta duración ($T_r < 24$ h) sin importar la intensidad de la lluvia, en cambio, esto es perjudicial en lluvias de larga duración o lluvias antecedentes (Hengxing, Chenghu, Lee, Sijing, & Faquan, 2003; Lee, Cheol Kim, Jung, & Lee, 2017; Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010).
- Taludes de suelos homogéneos con valores altos del coeficiente de permeabilidad saturado ($k_s > 10^{-5}$ m/s) la estabilidad de los taludes es fuertemente afectada por lluvias de corta duración y alta intensidad (Hengxing, Chenghu, Lee, Sijing, & Faquan, 2003; Lee, Cheol Kim, Jung, & Lee, 2017; Aristizábal, Martínez, & Vélez, 2010).

1.4. Condición de Saturación del Suelo

En la estabilidad de taludes y laderas, es muy importante conocer las condiciones de saturación en las que se encuentre el suelo, pues acorde a esto se toma las precauciones necesarias y las medidas correspondientes para su estabilización. (Fredlund, 2000), da a conocer los tipos y las condiciones de saturación en las que un suelo puede estar. Tomando como referencia a la línea del nivel freático.

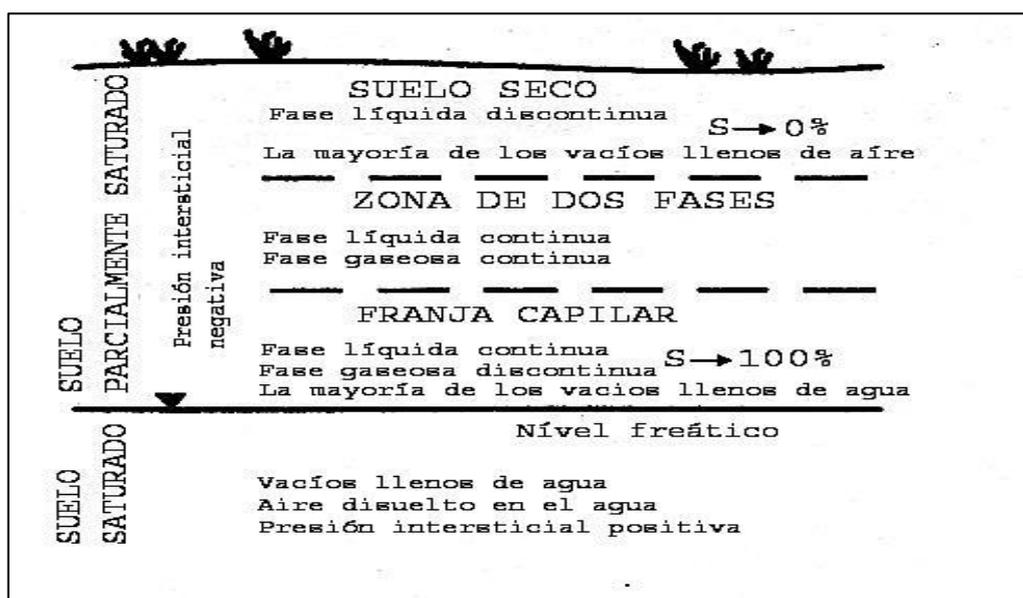


Figura 3. Límites de saturación en campo.

Fuente.- (Fredlund, 2000).

Elaboración.- (Fredlund, 2000).

1.4.1. Suelo saturado.

Como se observa en la Figura 3, el suelo en condiciones de saturación se compone de dos fases (sólida y líquida), debido a que la parte líquida ocupa todo el volumen de vacíos con agua, siendo así que su grado de saturación es del 100% (Fredlund, 2000).

1.4.2. Suelo parcialmente saturado.

A medida que el suelo se va alejando del nivel freático, se van distinguiendo tres distintas zonas en las cuales ya viene a intervenir una tercera fase gaseosa, donde el grado de saturación varía del 100% al 0% (Fredlund, 2000), con lo que se puede clasificar a un suelo parcialmente saturado en:

1.4.2.1. Fase líquida continua y fase gaseosa discontinua.

El suelo se encuentra aproximadamente cerca del nivel freático, por lo que la fase gaseosa se presenta como burbujas de aire, por lo que el alto grado de saturación que contiene, y la presión intersticial es negativa (Fredlund, 2000).

1.4.2.2. Fase líquida continua y fase gaseosa continua.

Es una zona de transición de la saturación, donde el grado de saturación puede ir de 90 a 20% y se mantiene la presión intersticial negativa (Fredlund, 2000).

1.4.2.3. Fase gaseosa continua y fase líquida discontinua.

Al no existir presión intersticial negativa, el grado de saturación del suelo es de cero, por lo que el volumen de vacíos del suelo está ocupado solo por el aire (Fredlund, 2000).

1.5. Composición mineralógica

Las arcillas, se encuentran constituidas por silicatos de aluminio hidratados presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio hierro u otros metales, también hidratados, los cuales hacen que el suelo tome distintas tonalidades con respecto a la original.

En lo referente a la estructura cristalina de los minerales, las láminas silícicas, están formadas por un átomo de silicio y 4 de oxígeno, en cambio, las láminas alúmina, están formadas por retículas de octaedros dispuestos con un átomo de aluminio al centro y seis de oxígeno alrededor. De acuerdo a la estructura reticular, los minerales de la arcilla se clasifican en tres grupos:

- Caolinita.- Estos al suelo le proporcionan un comportamiento normal, es decir, bajo los efectos del aumento de la humedad sobre las propiedades del suelo generalmente no es importante (Mitchell y Soga, 2005)

- Montmorillonita.- Los materiales poseen una alta plasticidad y baja permeabilidad. Bajo la variación de la humedad del suelo produce reducciones importantes en su resistencia al cortante (Mitchell y Soga, 2005)
- Illita.- La variación de la humedad provoca aumentos significativos en su plasticidad y reducciones en su resistencia al corte, pero a diferencia de la montmorillonita, estos no son tan nocivos como las montmorillonita (Mitchell y Soga, 2005).

1.6. Estabilidad de taludes

Los deslizamientos producen cambios en la morfología del terreno, diversos daños ambientales, daños en las obras de infraestructura, destrucción de viviendas, puentes, bloqueo de ríos, etc. Los factores que comprometen la estabilidad del talud se clasifica en (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002):

- Factores condicionantes (pasivos).- Estratigrafía y litología, estructura geológica, Condiciones hidrogeológicas y comportamiento hidrogeológico de los materiales, Propiedades físicas, resistentes y deformaciones, Tensiones naturales y estado tenso deformaciones (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).
- Factores desencadenantes (activos).- Sobrecargas estáticas, cargas dinámicas, cambios en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos, variaciones en la geometría, reducción de parámetros resistentes (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Los deslizamientos de tierra pueden catalogarse entre profundos y superficiales, de acuerdo con el espesor de la capa de meteorización involucrada en el movimiento en masa, que es la directamente afectada por la saturación de agua, la cual, a su vez, provoca disminución en la cohesión y pérdida de la cementación entre las partículas de suelo, así como incremento en las presiones de poros (Sidle y O'Loughlin, 1985; Suárez, 1998).

- **Caídas.-** Son movimientos fuertemente influenciado por la gravedad, meteorización mecánica y la presencia de agua intersticial. Que desencadenan movimientos por caída libre, abruptos de materiales como rocas y cantos rodados, por la formación de discontinuidades tales como fracturas, articulaciones y planos de cama (Varnes, 1978).
- **Vuelco.-** Se distinguen por la rotación de una unidad o unidades sobre punto de giro, por debajo o por debajo de la unidad, bajo las acciones de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes por los fluidos en las grietas (Varnes, 1978).

- **Deslizamiento de tierras.**- Son movimientos de masas, que se generan en la zona más débil del talud, produciéndose la separación de material (Varnes, 1978). Los deslizamientos se clasifican en dos tipologías que son:
 - Rotacionales.-La superficie de la ruptura es cóncava y el movimiento de deslizamiento es aproximadamente de rotación alrededor de un eje que es paralelo al suelo de la superficie.
 - Traslacionales.- El deslizamiento se mueve a lo largo de una superficie con poca rotación o i inclinación hacia atrás.
- **Flujo lateral.**- Ocurren en pendientes muy suaves o terreno plano de modo que el movimiento dominante es lateral, cuya extensión viene acompañada de fracturas por cizalladura o tracción. El fallo es causado por la licuefacción (Varnes, 1978).
- **Flujos.**- Se clasifica en cinco tipologías:
 - Flujo de escombros.- Movimiento rápido de masas en combinación de tierra suelta, roca, materia orgánica, aire y agua se movilizan como una suspensión. Causada por el flujo intenso de agua superficial, debido a fuertes precipitaciones o deshielo rápido (Varnes, 1978).
 - Avalanchas de escombros.- Se trata de una variedad de flujo de escombros muy rápido a extremadamente rápido (Varnes, 1978).
 - Los flujos terrestres tienen una forma característica de "reloj de arena". La pendiente el material se licúa y se agota, formando un recipiente o depresión en la cabeza (Varnes, 1978).
 - Flujo de lodo es un flujo de tierra consistente de material que está suficientemente húmedo para fluir rápidamente contiene al menos 50 % de arena, limo y arcilla partículas (Varnes, 1978).
 - Repteo.- Movimiento lento y constante, hacia abajo del talud. Este movimiento es causado por un esfuerzo de cizallamiento suficiente para producir deformaciones permanente, pero demasiado pequeña para producir fallos de corte (Sanchez, 2011).

A continuación en la Figura 4, se especifica la clasificación de deslizamientos en laderas, dada por Varnes, 1972.

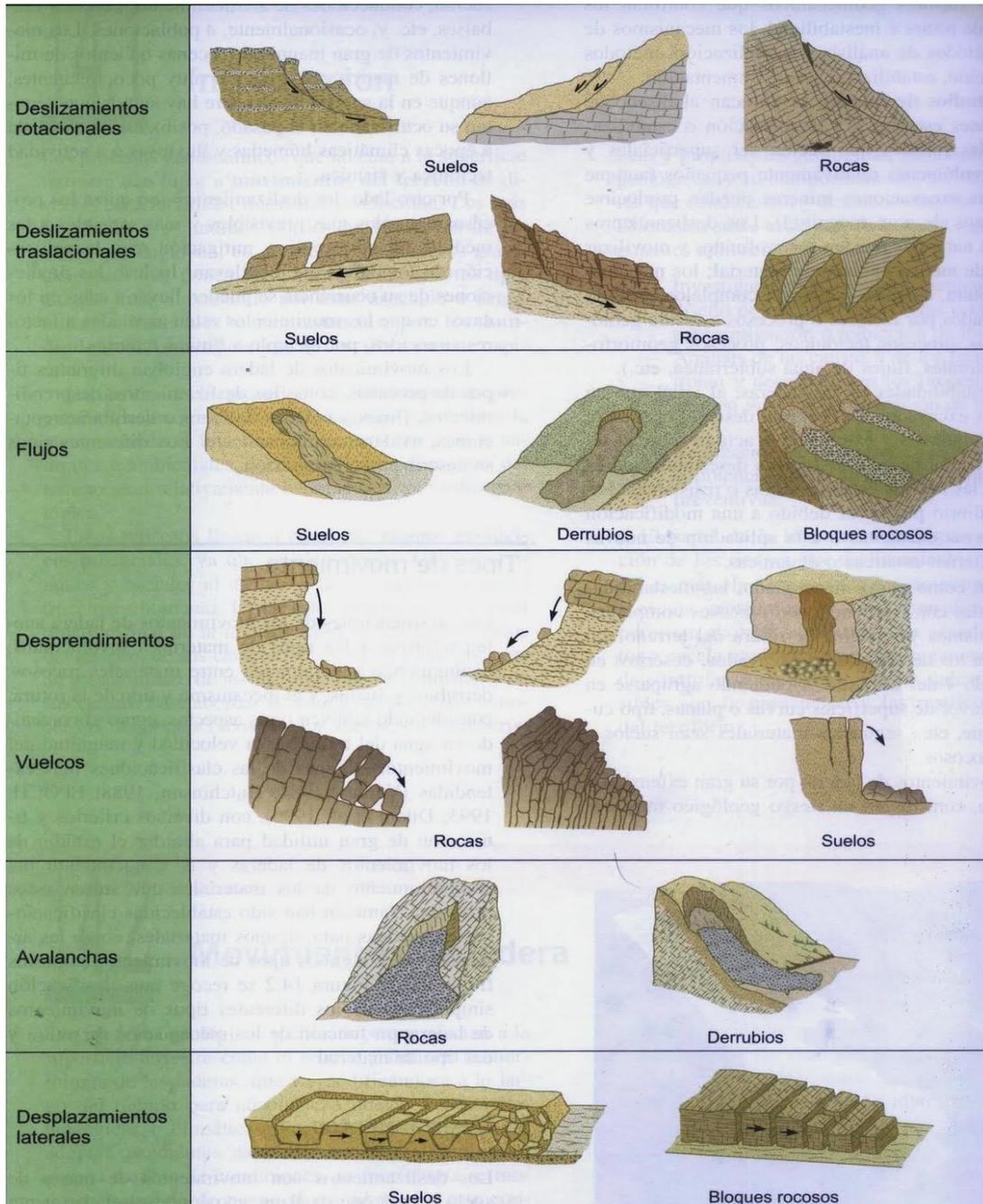


Figura 4. Clasificación general de movimientos de ladera.

Fuente.- (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Elaboración.- (Gonzalez de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

1.7. La Humedad superficial

Está definida por los porcentajes de escorrentía e infiltración y en algunas ocasiones, el comportamiento de los taludes. En términos generales, los factores ambientales y físicos que determinan el comportamiento de la infiltración dependen en buena parte de los 40 centímetros de suelo más superficial (Bilz, 1995).

La humedad superficial está controlada por: las características topográficas de la pendiente de los taludes, tipo de suelo, características climáticas, vegetación.

1.8. Secuencia hidrológica del proceso de inestabilización

Generalmente las investigaciones muestran una secuencia hidrológica para la activación de los deslizamientos, así (Dhakal y Siddle, 2004):

- Una lluvia acumulada anterior. Esta lluvia genera las condiciones propias de humedad para propiciar la formación de niveles de agua estables en sitios inestables.
- Un período prolongado de lluvia.- La lluvia en las últimas 24 horas, o menos, aumenta las presiones de poros y asciende los niveles freáticos (Figura 1).
- Un evento de alta intensidad. Se aumenta, de forma rápida, la saturación del perfil y un incremento brusco de la presión de poros, lo cual activa los deslizamientos.

1.9. Geoestadística

Es una rama de la estadística espacial, que se dedica a la predicción de variables regionalizadas, fundamentándose en la ley de Tobler (1970) que enuncia que todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una mejor correlación que las distantes. (Giraldo Henao, 2008) (Matheron, 1962). Todo análisis geoestadístico se encuentra conformado por tres fases:

1.9.1. Análisis exploratorio de datos espaciales.- Consiste en caracterizar estadísticamente la muestra (Histograma, detección de valores atípicos, varianza, desviación estándar, mínima, máxima, media, simetría curtosis, etc). Con el objetivo de: examina la distribución de los datos, detectar valores extremos locales y globales, buscar tendencias globales, examinar la autocorrelación espacial y variación direccional de los datos, entender la covariación entre múltiples variables y realizar transformaciones de los datos si son requeridos (Moreno Jiménez, 2005).

Además se podrá ver si existe ineficiencia en la etapa de la recolección de muestras ya sea por su cantidad o por su localización.

1.9.2. Análisis estructural.- Esta depende mucho del análisis exploratorio de datos, puesto que indica la correlación, forma y distribución de las variables en estudio. Ya que de esta información se toma de decisiones para el modelamiento, dando una buena confiabilidad en los resultados (Moreno Jiménez, 2005)

- **Semivariograma.-** Es una autocorrelación espacial, que asume que los valores más cercanos son más parecidos que los están más lejos. Además, se asume que el principio de estacionalidad, que consiste en en que si dos lugares están a una distancia y dirección similar tendrán similares diferencias al cuadrado de su valores (Moreno Jiménez, 2005).

Los modelos básicos que permiten explicar los diferentes comportamientos que presentan las variables regionalizada son: modelo esférico, modelo exponencial, modelo Gaussiano, modelo lineal (Giraldo Henao, 2008).

Para el modelamiento del semivariograma se debe tener presente los siguientes conceptos:

- Efecto nugget.- Es la discontinuidad puntual del semivariograma en el origen, que se acredita a posibles errores en medición de las variables o la escala de los mismo (Giraldo Henao, 2008).
- Meseta.- Es la cota superior del semivariograma, es decir, es la altura en la que el semivariograma se llega a estabilizar tendiendo al infinito (Giraldo Henao, 2008).
- Anisotropía.- Se conoce como anisotropía zonal cuando se produce variaciones en la meseta al modelar el semivariograma en distintas direcciones. En cambio, se dice que se tiene anisotropía geométrica cuando la meseta se estabiliza en distintos rangos “abscisas” (Giraldo Henao, 2008).

1.9.3. Estimaciones.- Entre las metodologías de interpolación más conocidas se tiene;

- **Distancia inversa.-** Las muestras que se encuentran más alejadas de la zona, muestra tienen poca influencia, siendo lo contrario para las muestras más cercanas. Este método no se basa en la minimización del error medio cuadrático de predicción
- **Kriging.-** Encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. Estos tipos de kriging se clasifican en tipo de predictor lineal y no lineal.
 - Lineal.- Son óptimos si hay normalidad multivariada, independiente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados. A esta clasificación pertenecen: Kriging simple, Kriging ordinario, kriging Universal.
 - No lineal.- Son predictores óptimos. A esta clasificación pertenecen: Indicador, Probabilístico, Log normal, Trans-Gaussianos, Disyuntivo.

Validación Cruzada.- Los métodos Kriging, usan esta validación para conocer que metodología de predicción mantiene una mejor correlación entre valores obtenidos por la predicción y los valores reales. Tratando de fijarnos en que la media estandarizada de los errores sea cercana a cero y el error cuadrático medio estandarizado se aproxime a 1 (Giraldo Henao, 2008; Moreno Jiménez, 2005).

CAPITULO II

MATERIALES Y METODOS

2.1. Generalidades

El presente capítulo describirá la localización y algunos factores regionales inherentes a las zona de estudio, así mismo, la metodología que se planteó para generación y lectura de las variables consideradas en el análisis del proyecto.



Figura 5. Área en estudio.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

2.2. Zona de estudio

Se encuentra ubicada en la ciudad de Loja, parroquia Carigán, en el barrio San José de Panamá, en la vía Lateral de paso entre vía a la Costa y vía Panamericana. En las coordenadas UTM (695600; 9560300).

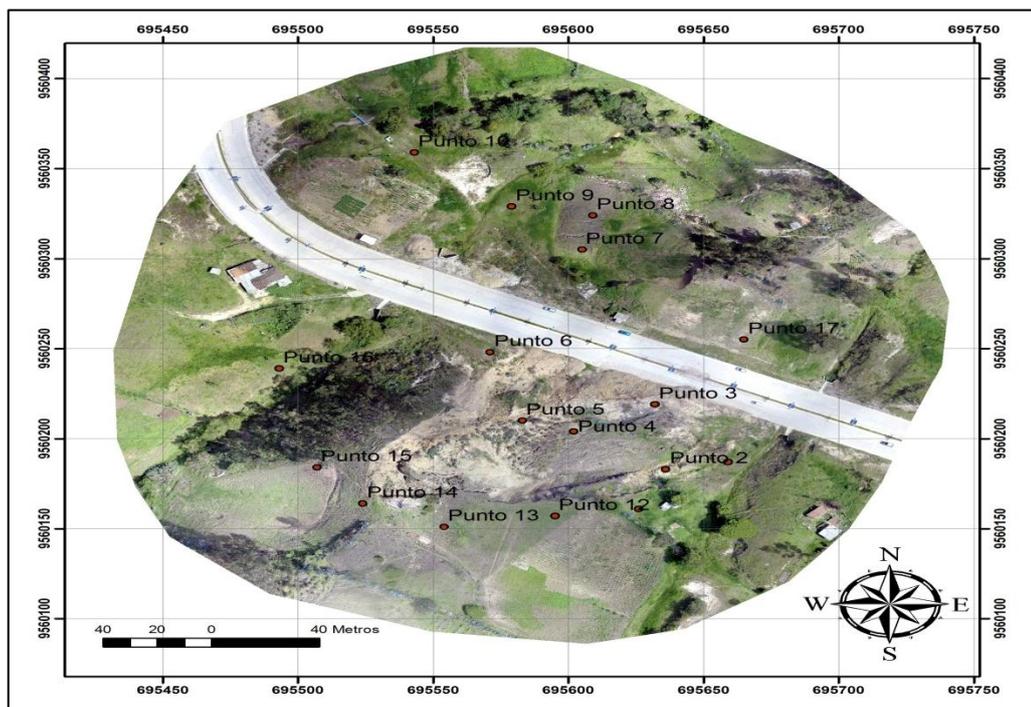


Figura 6. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

2.2.1. Sismicidad.

La ciudad de Loja según la NEC–SE–DS_2015, se encuentra localizada en la zona sísmica 2, que se caracteriza por ser de alto peligro sísmico.

2.2.2. Geología regional.

La zona de estudio se encuentra ubicada al nororiente de la cuenca de Loja, lugar donde se encuentra la Formación Belén, que posee una potencia de 300 metros se caracteriza por estar conformada por capas gruesas de areniscas de color marrón de grano granulado y muestran estratificación cruzada en escalas métricas, además contiene lentes de conglomerado horizontalmente estratificados (José Tamay, Kennerley, 1975; Kennerley & Almeida, 1975)

2.2.3. Hidrografía.

La cuenca de Loja, se encuentra ubicada en la cordillera de los Andes Oriental, presentando desniveles en su topografía que van de 2070 m a 3370 m sobre el nivel del mar. La cuenca presenta un sistema de drenaje de tipo detrítico donde las redes fluviales principales son los Ríos Zamora y Malacatos. Como redes secundarias de aportes de estos ríos se tiene la quebrada Jípiro, quebrada Namanda, quebrada Las Pavas, quebrada Yanacocha, quebrada El Salado, quebrada Potrerillos, quebrada Minas, entre otras.

2.2.4. Cobertura vegetal.

Básicamente se encuentra representada por bosque de montaña baja, que está constituido por colinas y nudos en los que se encuentran plantaciones de aliso, eucalipto, romerillo y cultivos de hortalizas, cereales, frutales principalmente; de igual forma se observa vegetación silvestre típica de la zona como chamana y chilca.

2.3. Materiales

La medición de la variación del grado de saturación de los suelos se realizó con el modelo físico experimental que consta de los siguientes materiales:

- Recipientes de un litro de capacidad con regla graduada.
- Tubería plástica de $\varnothing = 3,3$ mm.
- Válvula reguladora de flujo y llave de paso.
- Moldes de PVC (15 cm de largo y un $\varnothing = 8,2$ cm).
- Fundas plásticas (18 cm x 10 cm) y (30 cm x 20 cm).
- Alambre de cobre.
- Ligas de plástico.
- Parafina.

- Compartimiento de suspensión de los especímenes.

Además del modelo físico experimental se hizo uso de los siguientes equipos de laboratorio:

- Hojas de registro.
- Perfiladores.
- Recipientes de laboratorio.
- Calibrador.
- Balanza de 0,01g de precisión.
- Horno de 110 ± 5 °C.
- Probeta de 100ml.g
- Cronómetro.

Los datos obtenidos con del modelo físico experimental, se los proceso en los programas:

- Microsoft Word, Excel.
- Google Earth.
- ARCGIS 10.3.1 versión estudiantil.

2.4. Metodología

El proyecto desarrollado es de carácter cuantitativo, para lo cual se aplicó una metodología experimental de tipo longitudinal descriptivo y el cumplimiento de los objetivos planteados se lo dividió en tres fases en las cuales se siguió el siguiente orden cronológico:

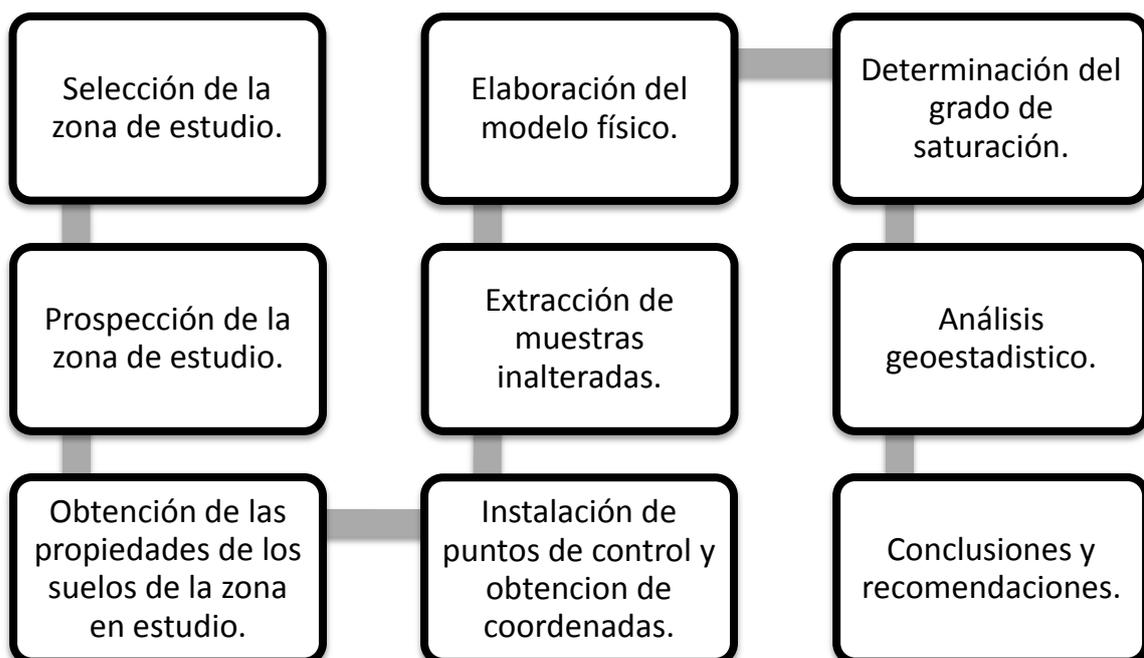


Figura 7. Cronología de la metodología aplicada.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

2.4.1. Trabajo de Campo.

2.4.1.1. Topografía.

Se realizó el levantamiento topográfico con un Dron-Phantom 2, con una resolución de 18 pixeles, el área levantada es de 7.08 ha. En base al levantamiento topográfico se conoce que es una colina alargada y que el talud analizado presenta pendientes en un rango de 10 % a 85%, con una elevación mínima de 2148 msnm y máxima de 2223,29 msnm.

2.4.1.2. Muestreo Alterado.

Siguiendo las indicaciones dadas por la normativa NTE INEN 686, se obtuvo las muestras que permitieron conocer la caracterización del suelo.

2.4.1.3. Muestreo Inalterado.

Esta extracción se la realizó siguiendo la normativa NTE INEN 687, para seguidamente de este muestreo determinar las propiedades resistentes del suelo, además de las características volumétricas y gravimétricas.



Figura 8. Muestras inalteradas.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

2.4.1.4. Puntos de control.

Mediante un muestreo estratificado aleatorio, se instaló puntos que ayudan a determinar el movimiento que existe en campo. Estos puntos de control están compuestos por perforaciones de 60 cm, en la cual se colocó varillas de acero de la misma profundidad con un recubrimiento de mortero.



Figura 9. Puntos de control en campo.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

2.4.1.5. **Monitoreo de puntos de control.**

Las mediciones de la ubicación espacial de los puntos de control se realizó con colaboración de la ingeniería en formación Valeria Stefanía Ruiz Calvache, con la ayuda de un GPS de doble frecuencia Trimble R6. Estas mediciones se las realizo desde el mes de diciembre del 2016 a junio del 2017, con una frecuencia no menor a 2 veces por mes y aumentando esta frecuencia en los meses en los que más precipitó con la finalidad de evidenciar en que tipología de suelos y con qué cantidad de precipitación estos se desestabilizan.



Figura 10. Estación base y controlador Trimble R6 en la lectura de coordenadas.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

2.4.1.6. **Precipitación.**

La estación del INAMHI, ubicada Colegio Militar de la ciudad de Loja, en las coordenadas UTM (697901; 9563240) a una elevación de 2033 msnm. Doto al proyecto de registros diarios de precipitación desde el 1 de diciembre del 2016 hasta el 24 de abril del 2017.

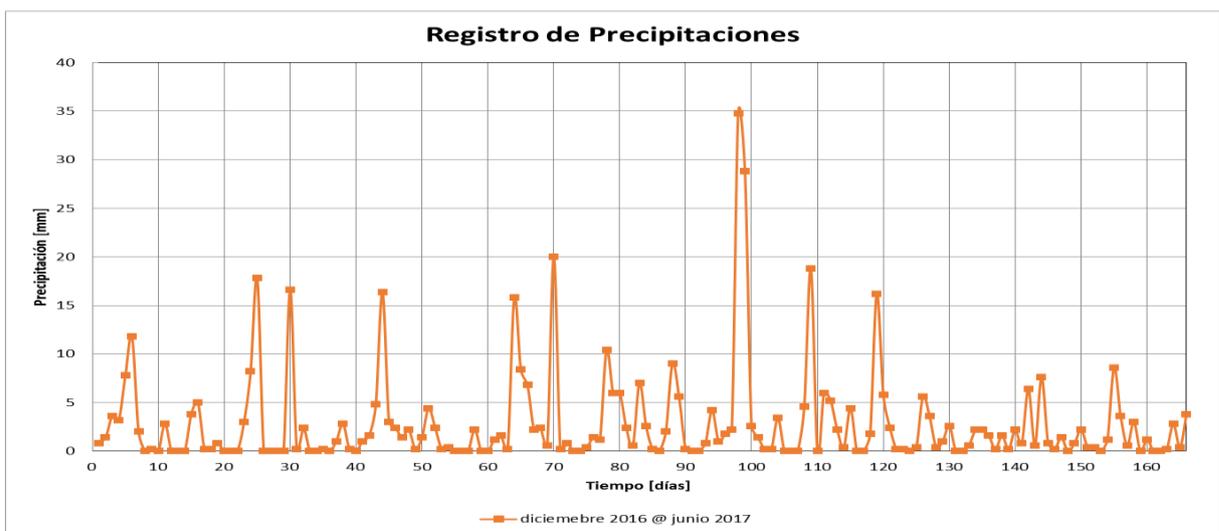


Figura 11. Registro diario de precipitaciones del 2016/12/22 @ 2017/06/05.

Fuente.-INAMHI.

Elaboración.- El autor.

2.4.2. Trabajo de Laboratorio

A través de ensayos de laboratorio se determinaron los tipos de suelo encontrados en la zona de estudio y de la misma forma se obtuvieron los diferentes parámetros que se mencionan a continuación:

- **Contenido de humedad**, El ensayo se realizó según la norma ASTM D2216.



Figura 12. Granulometría de finos.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

- **Granulometría**.- La distribución del tamaño de las partículas se lo realizó según la norma ASTM D – 422.



Figura 13. Granulometría de finos.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

- **Relaciones Gravimétricas y Volumétricas**.- Estos parámetros se obtuvieron según la norma ASTM D- 854-02, etc.



Figura 14. Granulometría de finos.

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

- **Límites de Atterberg.**- Ensayo de límite líquido, se lo realizó según la norma ASTM D-4318-84. Ensayo de límite plástico, se lo realizó según la norma ASTM D-4318-84.



Figura 15. Límite líquido y plástico.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

- **Gravedad Específica.**- El ensayo se realizó según la norma ASTM D 854.



Figura 16. Gravedad específica de los sólidos.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

- **Parámetros de resistencia.**- El ensayo de corte directo, fue el elegido para encontrar la resistencia al corte, cohesión y fricción de los suelos en estudio, estos parámetros se determinaron en base a la norma ASTM D 3080-72.



Figura 17. Ensayo de corte directo.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

- **Grado de saturación.-** Con la simulación de una precipitación gota a gota en el modelo físico experimental, se genera la variación del grado de saturación de los suelos a través del aumento del contenido de humedad del espécimen.
Teniendo como información preliminar a la simulación, la tipología y las propiedades índices de los suelos del área de estudio, se determina el grado de saturación de los suelos siguiente el siguiente proceso:
 - Perfilación y preparación de muestras (**Figura 8**).
 - Lectura de dimensiones geométricas y su respectivo peso (**Figura 18**).
 - Contenido de humedad inicial (**Figura 12**).
 - Simulación de una tormenta (**Figura 18**).
 - Lectura del contenido de humedad final (**Figura 12 y 18**).
 - Cálculo del grado de saturación con (**ecuación 13**).



Figura 18. Lectura de los datos iniciales y finales de la simulación de la precipitación.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

2.4.3. Análisis geoestadístico.

Dentro de lo que son métodos de interpolación existe el método de la distancia inversa, kriging simple, kriging ordinario, kriging lognormal. Estos análisis geoestadísticos mantienen la siguiente estructura

- **Análisis exploratorio de los datos.-** Se toma en consideración la población y las variables que fueron medias por lo que el tipo de muestreo como la distribución espacial de este muestreo como lo muestra en la Figura 19, es de tipo estratificado aleatorio por la complejidad de la zona en estudio (Moreno Jiménez, 2005).

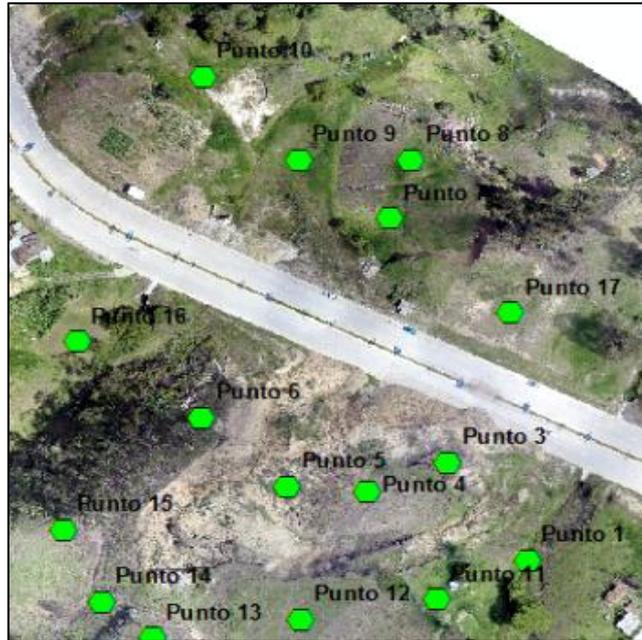


Figura 19. Distribución del muestreo aplicado.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

- **Análisis estructural.**- La comprobación del análisis exploratorio de los datos, se lo comprobó mediante la estimación del variograma experimental, y dando la posibilidad de mejorar la primera fase incrementando puntos de muestreo o cambiando el tipo de distribución que se adoptado (Moreno Jiménez, 2005).

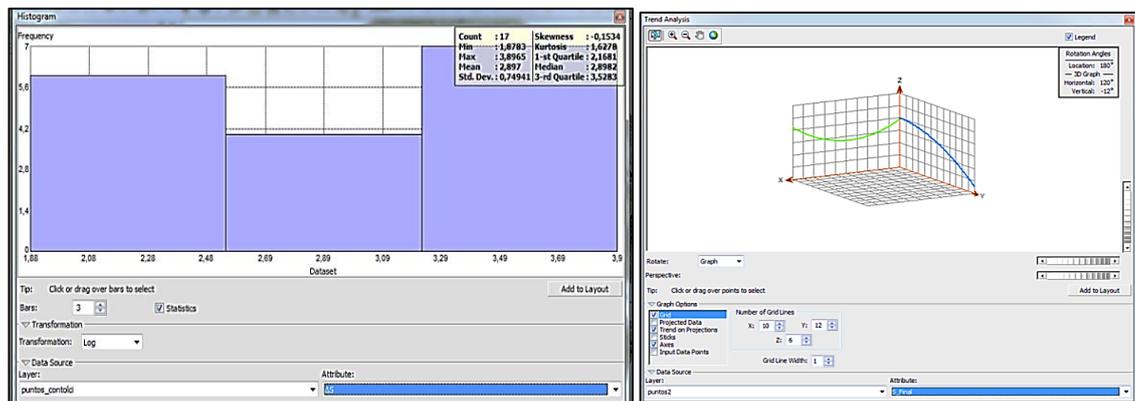


Figura 20. Pruebas de normalidad de datos.
Fuente.- El autor.
Elaboración.- El autor.

Como se observa en la (Figura 20), se hizo uso de un histograma y de un análisis de tendencia de las variables en dirección de este a oeste y de norte sur, para determinar la centralidad, dispersión y la forma de los datos. Dando a conocer la función polinómica que mejor se acopla a su tendencia espacial.

- **Estimaciones.-** El método de interpolación que se utilizó para realizar las predicciones en los puntos no experimentales fue el kriging ordinario, porque es útil para el estudio de procesos estacionarios, de esperanza constante y desconocida. Que basándose en la ubicación y estructura espacial de los datos, se centra en la minimización de la varianza entre el valor real y el valor estimado (Moreno Jiménez, 2005).

CAPITULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Generalidades

Con la metodología planteada en el capítulo anterior se expondrán los resultados obtenidos en la fase de campo y la de laboratorio, con los cuales se realizó el análisis geoestadístico del grado de saturación.

3.2. Resultados de laboratorio

En la Tabla 2, se muestra la clasificación de los suelos y sus propiedades físico-mecánicas que fueron ensayadas en el modelo físico experimental.

Tabla 2. Resultados de las propiedades mecánicas de los suelos.

Tipos de suelos	(-)	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
	S.U.S.C AASHTO	SC A-2-6 (1)	SC A-2-7 (2)	CH A-7-6 (19)	CH A-7-6 (76)
Contenido de humedad	(%)	14	20	27	37
Límite líquido	(%)	39	44	58	99
Límite plástico	(%)	25	22	20	37
Índice plástico	(%)	14	22	38	62
Gravedad específica	(-)	2,44	2,42	2,6	2,75
Cohesión	(kg/cm ²)	0,37	0,33	0,32	0,47
Fricción	(°)	31	29	19	57
Descripción	(-)	Arena arcillosa	Arena arcillosa	Arcilla inorgánica de alta comprensibilidad	Arcilla inorgánica de alta comprensibilidad

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

Suelo 1 (arena arcillosa de índice de grupo 1), es un suelo de grano grueso mal gradado, y que por su índice plástico demuestra no ser propenso al hinchamiento, en cambio su fracción de arcilla puede presentar cambios de volumen entre los estado seco y húmedo su fracción fina es plástica.

Suelo 2 (arena arcillosa de índice de grupo 2), este suelo es semejante al suelo 1 a diferencia de que este su fracción de arcilla es elástico y un bajo potencial de hinchamiento.

Suelo 3 (arcilla inorgánica de alta comprensibilidad de índice de grupo de 19), es un suelo de grano fino, que por su índice plástico demuestra ser un suelo con alto potencial de hinchamiento. Con una resistencia en seca muy alta, además de tener una tenacidad alta.

Suelo 4 (arcilla inorgánica de alta comprensibilidad de índice de grupo de 76), es un suelo propenso a experimentar cambios volumétricos extremadamente grandes con la variación de su humedad y en estado seco llegan a soportar altos esfuerzos al corte.

El mapa 1, localizado en el Anexo 1, se muestra la configuración de la columna estratigráfica sobre la cual están ubicados los puntos de control. Esto fue posible obtenerla de la cara del corte del talud.

3.2.1. Resultados del modelo físico experimental.

El modelo físico experimental trabajó por cada tipología de suelo un número de 4 especímenes de geometría cubica y cilíndrica. A continuación se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 3. Resultados de los ensayos en el modelo físico experimental del suelo 1.

SUELO 1							
Geometría	Muestra (#)	CH_Inicial (%)	CH_Final (%)	S_Inicial (%)	S_Final (%)	Precipitación Acumulada (mm)	I (mm/d)
CUBO	1	9,11	41,82	44,99	97,88	56,21	43,17
	2	16,82	40,03	64,90	96,63	40,70	42,88
	3	15,93	40,29	63,31	96,81	41,56	66,50
	4	5,75	41,37	29,88	97,57	52,57	40,12
CILINDRO	1	20,45	41,64	78,51	96,96	51,22	47,68
	2	25,47	40,54	85,84	96,99	38,36	49,74
	3	10,29	40,06	51,57	96,65	55,13	55,13
	4	16,39	39,93	63,05	96,56	46,11	45,06

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

Las muestras del suelo 1, excedieron el contenido de humedad del límite líquido para saturarse, desarrollando la pérdida de su cohesión aparente que generó la deformación de las muestras hasta que estos fluyeron por acción de su propio peso, así mismo como lo enuncia (CHAPUIS & BAASS, 1989).

La intensidad es el resultado de la relación entre el volumen del agua de la precipitación simulada, el área del espécimen y el tiempo total de la tormenta, tomando en cuenta que un 1mm de precipitación equivale a 1 L/m². Dando a conocer una intensidad media para los cubos de 42 mm/d y para los cilindros una intensidad de 47 mm/d.

Tabla 4. Resultados de los ensayos en el modelo físico experimental del suelo 2.

SUELO 2							
Geometría	Muestra (#)	CH_Inicial (%)	CH_Final (%)	S_Inicial (%)	S_Final (%)	Precipitación Acumulada (mm)	I (mm/d)
CUBO	1	15,18	45,52	46,24	94,82	47,38	43,73
	2	21,28	45,35	58,66	94,63	31,49	52,13
	3	18,80	45,00	55,75	94,24	31,72	49,75
	4	10,45	45,18	35,58	94,43	50,78	54,07
CILINDRO	1	27,42	45,47	70,83	94,76	37,40	105,10
	2	11,19	45,46	35,65	94,75	69,21	62,14
	3	21,96	45,39	58,89	94,68	49,32	75,54
	4	13,21	45,11	38,88	94,36	58,19	66,50

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

Las muestras del suelo 2 al igual que las muestras del suelo 1, se llegaron a saturarse hasta que estas fluyeron por acción de su propio peso bajo intensidades y milímetros de precipitación acumulada elevados.

Los resultados de los suelos 1 y 2, dan a conocer la existencia de una alta variación de su contenido de humedad para alcanzar su estado de saturación y en comparación con los contenidos de humedad de suelos saturados de la tabla 2, para arenas uniforme y floja alcanzan la saturación alrededor de un contenido de humedad de 32%.

Además los suelos bajo estas condiciones sufren segregación por la infiltración del agua precipitada que ayuda a las partículas más densas ganar peso y por acción de la gravedad descendan, hace que se incremente la relación de vacíos y de igual forma el contenido de humedad (CHAPUIS, R. 2004).

Tabla 5. Resultados de los ensayos en el modelo físico experimental del suelo 3.

SUELO 3							
Geometría	Muestra (#)	CH_Inicial (%)	CH_Final (%)	S_Inicial (%)	S_Final (%)	Precipitación Acumulada (mm)	I (mm/d)
CUBO	1	23,74	39,01	72,05	87,77	30,57	28,30
	2	20,41	39,18	68,12	87,88	36,24	32,07
	3	20,53	39,05	69,95	87,79	38,70	24,49
	4	17,65	39,13	64,06	87,85	43,54	18,53
CILINDRO	1	16,29	39,50	61,39	88,07	53,59	32,88
	2	21,56	39,50	69,93	88,08	41,19	36,77
	3	20,26	37,97	69,63	87,10	44,39	32,78
	4	15,43	38,39	60,07	87,38	56,01	36,61

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

El contenido de humedad final alcanzado en las muestras del suelo 3, se encuentra por debajo del contenido de humedad de su límite líquido e índice plástico, lo que a su vez dejó como resultado una media del 87% de saturación.

Tabla 6. Resultados de los ensayos en el modelo físico experimental del suelo 4.

SUELO 4							
Geometría	Muestra (#)	CH_Inicial (%)	CH_Final (%)	S_Inicial (%)	S_Final (%)	Precipitación Acumulada (mm)	I (mm/d)
CUBO	1	20,78	36,62	70,62	79,46	34,75	15,04
	2	19,95	34,78	69,55	78,75	36,60	23,92
	3	19,40	34,29	72,17	78,54	30,46	21,08
	4	17,96	34,77	68,12	78,74	32,89	24,73
CILINDRO	1	25,85	36,86	84,21	79,56	27,10	21,17
	2	19,15	37,04	69,99	79,62	45,39	34,38
	3	12,89	37,04	52,35	79,62	58,79	27,42
	4	21,38	36,03	72,70	79,24	35,68	22,87

Fuente.- Fabián Ramiro Salinas Ochoa.

Elaboración.- Fabián Ramiro Salinas Ochoa.

Las muestras de los suelo 3 y 4, se llegaron impermeabilizar bajo un grado de saturación medio de 88 % y 79% respectivamente, siendo el producto de una precipitación acumulada e intensidad de la tormenta bajos, en comparación con los del suelos 1 y 2.

Con respecto al grado de saturación, intensidad y el volumen de precipitación simulada de los cubos y los cilindros tuvieron un comportamiento muy similar dentro de cada tipología.

En la Tabla 7, se exponen los resultados de cada tipología de suelo ensayada, tomando en cuenta la eliminación de los valores que se alejaban demasiado de la media de cada tipología de suelo.

Tabla 7. Resultados de los ensayos en el modelo físico experimental.

Tipo de suelo	Saturación		Precipitación Acumulada		Intensidad	
	Cubo	Cilindro	Cubo	Cilindro	Cubo	Cilindro
	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/día]	[mm/día]
SUELO 1	97,22	96,79	47,76	47,71	48,17	49,40
SUELO 2	94,43	94,73	38,00	51,98	51,98	68,06
SUELO 3	87,84	87,52	39,50	47,19	28,29	34,76
SUELO 4	78,87	79,51	33,67	41,74	25,85	26,46

Fuente.- El autor.

Elaboración.- El autor.

3.3. Resultados de campo.

3.3.1. Monitoreo de puntos de control.

El control del comportamiento del movimiento de masas del talud en estudio fueron tomados de (Ruiz, 2017), los mismo que iniciaron el 22 de diciembre del 2016 al 4 de junio del 2017, dando un total de 8 mediciones que dio como producto la Figura 21.

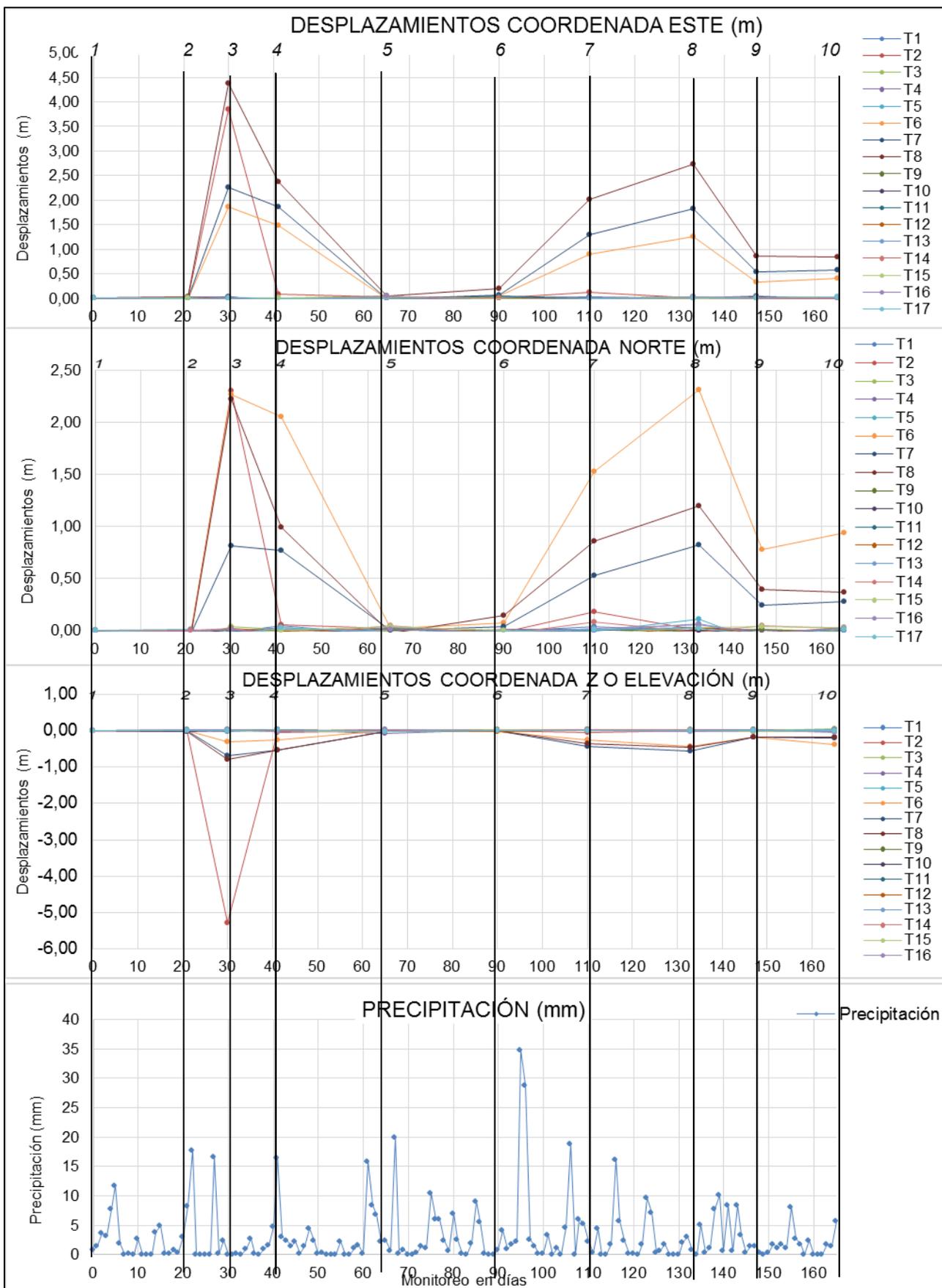


Figura 21. Desplazamientos vs precipitación.

Fuente: (Ruiz, 2017).

Elaboración: Valeria Stefania Ruiz Calvache.

La Figura 21 relaciona el desplazamiento en las coordenadas norte, este y la elevación con respecto a las precipitaciones que se generaron durante los intervalos de medición del desplazamiento de los puntos de control. Y con lo cual se evidencio una relación directamente proporcional entre volumen de agua precipitada acumulada en los rangos de las mediciones 3°, 7° y 8° con respecto al movimiento de masas

Tabla 8. Precipitaciones diarias y acumuladas generadoras de desplazamientos.

Medición (#)	Intervalo (día/mes/año)		Precipitación Acumulada (mm)
3°	13/01/2017	15/01/2017	29
		29/03/2017	34
7°		30/03/2017	28,8
	27/03/2017	31/03/2017	70,2
	29/03/2017	02/04/2017	67,78
8°	18/04/2017	22/04/2017	26,4

Fuente: INHAMI.

Elaboración: El autor.

Según el registro de precipitación en los rangos de las mediciones 3°, 7° y 8°, se generaron precipitaciones tanto diarias como acumuladas de 3 y 5 días que superaron el volumen de agua precipitado que se dio a conocer en el modelo físico experimental, como se muestra en la Tabla 8.

Relacionando la Figura 21 con las precipitaciones de la Tabla 9, estas fueron las que generaron el movimiento en los puntos 3, 4, 5 y 14, los mismos que estos están ubicados sobre los estratos superficiales de arenas arcillosas (suelos 1 y 2), pero no siendo estos los que produjeron el movimiento, sino, que los estratos de arcilla inorgánica de alta plasticidad (suelos 3 y 4), Dado que los estratos superficiales por su alta permeabilidad permiten que el agua precipitada a intensidades altas y bajas, se infiltre a grandes profundidades hasta llegar a estrato arcilloso, los cuales retienen el agua y saturándose con contenido de humedad del orden del 35% y 39%, que una vez alcanzado estos se vuelven impermeables de tal forma que se acumula el agua sobre este estrato y sumándole el peso del agua y de los estratos superficiales a este se genera su falla mecánica por la reducción a esta por los efectos que tienen las arcillas frente al aumento de la saturación de estas.

3.4. Análisis geoestadístico.

3.4.1. Análisis exploratorio.

En la Tabla 9, se exhibe la ubicación espacial y la información recopilada en el muestreo estratificado aleatorio de la Figura 19, que sirvió para el desarrollo del análisis geoestadístico.

Tabla 9. Información recolectada en el análisis exploratorio en campo.

Punto	Tipo de suelo	X (m)	Y (m)	Z (m.s.n.m)	Grado de saturación		ΔCH	
					Cilindro (%)	Cubo (%)	Cilindro (%)	Cubo (%)
1	Suelo 3	695659	9560187	2171	88,08	87,79	17,94	18,51
2	Suelo 2	695636	9560183	2176	94,68	94,43	23,44	34,73
3	Suelo 3	695632	9560219	2175	79,24	78,54	14,65	14,89
4	Suelo 1	695602	9560204	2180	96,96	97,57	21,20	35,63
5	Suelo 1	695583	9560210	2181	96,56	97,88	23,55	32,71
6	Suelo 4	695571	9560248	2168	79,24	78,54	14,65	14,89
7	Suelo 3	695605	9560305	2155	88,07	87,85	23,21	21,48
8	Suelo 3	695609	9560324	2155	88,08	87,88	17,94	18,77
9	Suelo 4	695579	9560329	2152	79,24	78,54	14,65	14,89
10	Suelo 4	695543	9560359	2149	79,62	79,46	17,89	15,83
11	Suelo 3	695626	9560161	2183	87,10	87,77	17,71	19,48
12	Suelo 1	695595	9560157	2186	96,65	96,81	29,77	24,36
13	Suelo 1	695554	9560151	2194	96,99	97,88	15,07	32,71
14	Suelo 1	695524	9560164	2195	96,56	96,63	23,55	23,21
15	Suelo 4	695507	9560184	2188	79,24	78,54	14,65	14,89
16	Suelo 1	695493	9560239	2162	100,00	97,88	28,98	35,63
17	Suelo 1	695665	9560255	2169	100,00	97,88	28,98	35,63

Fuente: Fabián Ramiro Salinas Ochoa.

Elaborado: Fabián Ramiro Salinas Ochoa.

3.4.1.1. Análisis estadístico univariante.

Por medio de estadística descriptiva se pudo determinar la centralidad, dispersión y forma que contienen los datos de la Tabla 10. Con tal información fue posible mejorar el análisis exploratorio, obteniendo una adecuada correlación y consigo buscar una confiabilidad mayor al 90% que suele ser afectada por una recolección ineficiente de datos o errores en sus mediciones.

Tabla 10. Resumen estadístico de centralidad, dispersión y forma de los datos.

Valores Estadísticos		Δ Grado de saturación		Δ Contenido de humedad	
		cilindro [%]	cubo [%]	cilindro [%]	cubo [%]
Número de muestras		17	17	17	17
Transformación	Log	x	x	x	x
	Box-Cox	-	-	-	-
Valor Mínimo		4,37	4,36	2,68	2,7
Valor Máximo		4,61	4,6	3,39	3,57
Valor Mediana		4,48	4,48	2,89	3,07
Valor Media		4,45	4,49	2,99	3,11
Curtosis		1,50	1,51	1,71	1,43
Desviación estándar		0,75	0,09	0,26	0,35
Coefficiente de asimetría		-0,28	-0,31	0,23	0,15
Media estandarizada		-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Error cuadrático medio		1,42	1,42	1,42	1,42

Fuente: El autor.

Elaborado: El autor.

- Tal como se muestra en la Tabla 10, los datos del grado de saturación se les aplicó una transformación de tipo logarítmica para que estos se ajusten a una distribución de normalidad. Donde los datos se encuentran en un rango de 4,36% a 4,60%, dejando una razón entre la media y la mediana igual a 1. Además se tiene un coeficiente de asimetría inferior a cero, lo que implica que los datos están sesgados negativamente (existencia de datos superiores a la media). El coeficiente de Curtosis es 1,51; demostrando que el grado de la concentración de los valores es plana o platocúrtica por su valor menor a 3, debido a que la distribución de frecuencias es semejante en todas.
- Así mismo la variación del contenido de humedad inicial y final de los especímenes se les aplicó una transformación de tipo logarítmica, para el cumplimiento de la estacionariedad, dando a conocer que los datos se encuentran en un rango de 2,70% a 3,57%, cumpliendo que la razón entre media y mediana es igual a 1, y se ve que existen valores que se encuentran por debajo de la media por su coeficiente de asimetría valor mayor a cero. El grado de la concentración de los valores es plana o platocúrtica por su valor menor a 3, debido a que el valor de la distribución es semejante en todas.

3.4.1.2. Análisis estadístico bivariante.

Además de conocer el comportamiento individual de las variables grado de saturación y Δ contenido de humedad es importante saber el grado de relación entre ellas. Por lo que hizo uso de una regresión lineal, con la cual se pudo determinar que $R^2 = 0,80$ y $0,81$; con lo que se puede determinar la fuerte correlación entre estas.

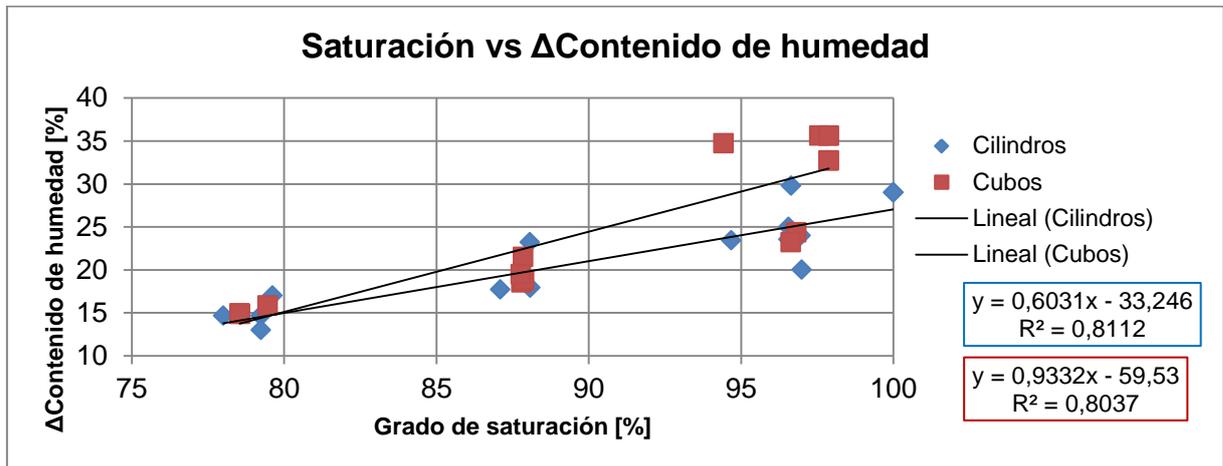


Figura 22. Desplazamientos vs precipitación coordinada Z o elevación.

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

3.4.1.3. Identificación de valores extremos.

La identificación de valores atípico, se la realizó por medio de los histogramas de la Figura 23, en los cuales se ve que tanto para el grado de saturación y de la Δ contenido de humedad para los cubos como los cilindros, sus datos están sesgados, pero esto se le atribuye a que son datos extremos de carácter global, es decir, el modelo físico experimental trabajo las muestras por cada tipología del suelo por lo que son valores reales.

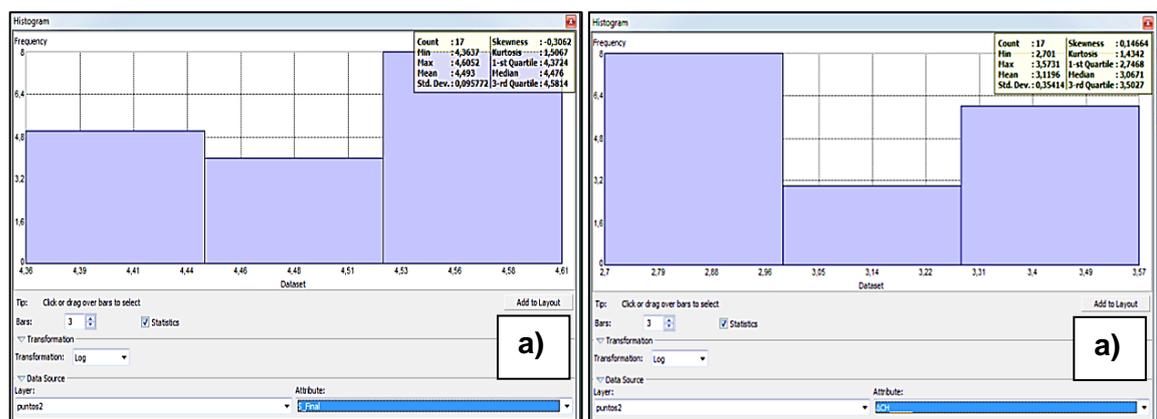


Figura 23.1. Histograma del grado de saturación y Δ CH [cubos (a) y cilindros (b)].

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

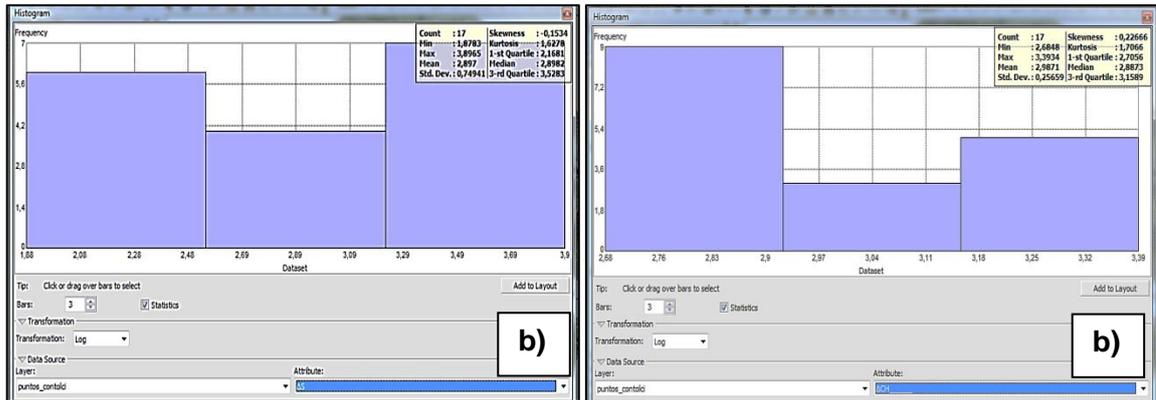


Figura 23.2. Histograma del grado de saturación y ΔCH [cubos (a) y cilindros (b)].

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

3.4.1.4. Análisis de tendencia global.

La tendencia global de los datos del grado de saturación y de la Δ contenido de humedad, tanto para los cubos como para los cilindros, en su dirección este-oeste (línea verde) y norte-sur (línea azul), la Figura 24, muestra que estas dos variables pueden ser representadas en una función polinómica de segundo grado.

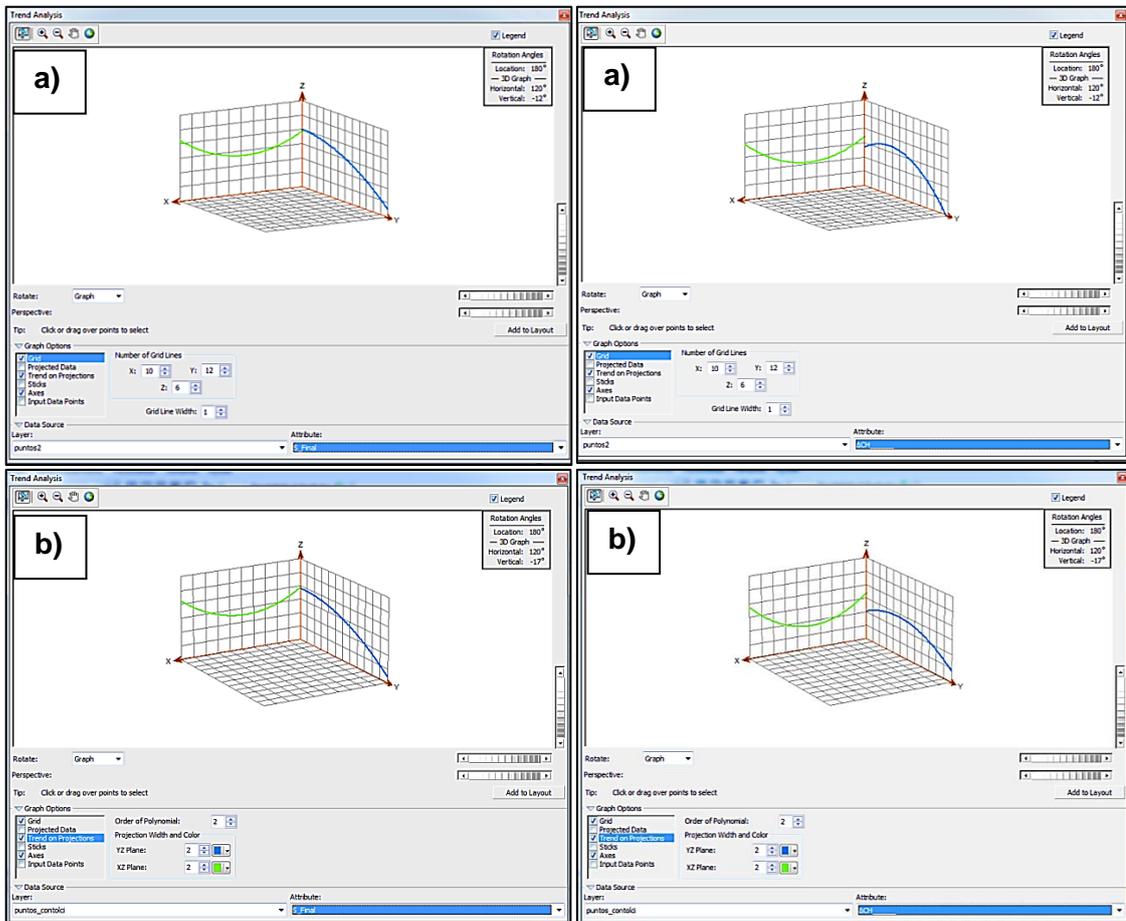


Figura 24. Gráfico de análisis de tendencia del saturación y ΔCH [cubos(a) y cilindros (b)].

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

3.4.2. Análisis estructural.

Con la información recopilada e interpretada por el análisis exploratorio se elaboró el semivariograma experimental. Esta modelación se la realizó en el programa Arcgis 10.3.1, versión estudiantil. Las variables que se utilizaron en la modelación fueron el grado de saturación final puesto que en el modelo físico experimental permitió conocer valores picos, es decir, valores máximos de saturación y contenidos de humedad máximos bajo las condiciones de saturación de un suelo en estado natural.

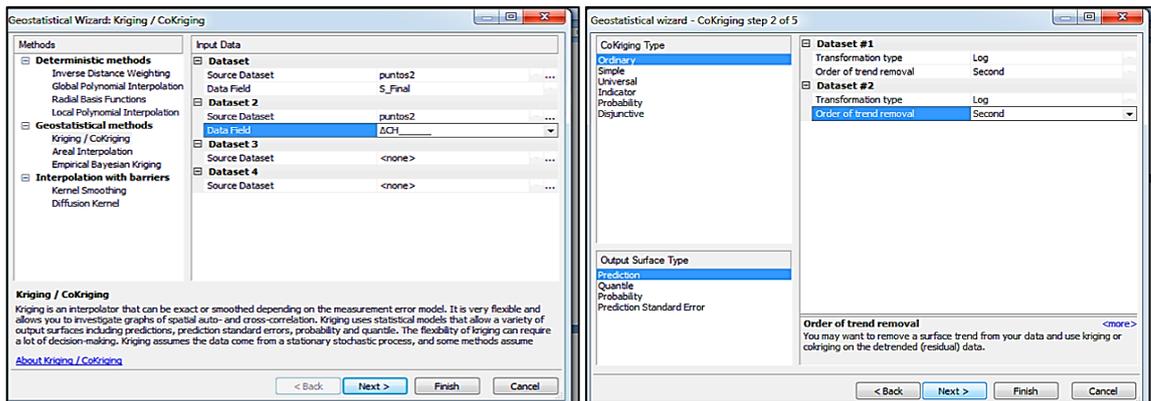


Figura 25. Selección del tipo de predicción y orden de la saturación y Δ CH (cubos y cilindro).
Fuente: El autor.
Elaboración: El autor.

Dentro de las herramientas de predicción del programa se utilizó el Cokriging, que al igual que el kriging contiene las mismas herramientas y métodos para la predicción a excepción que el Cokriging permite realizar la predicción de dos o más variables.

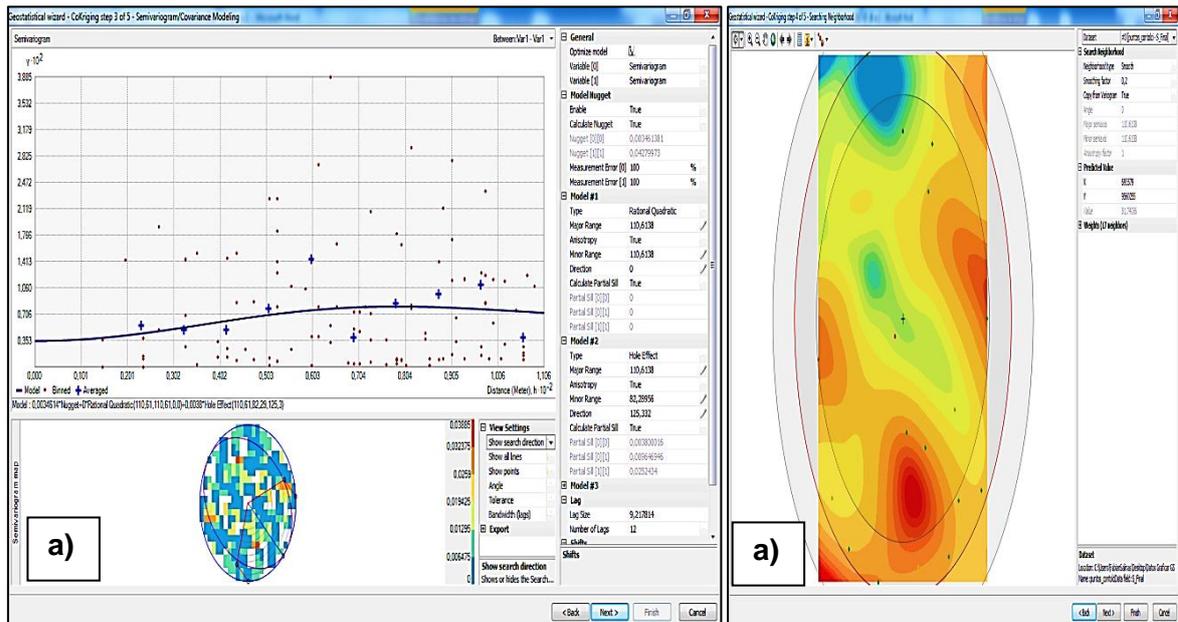


Figura 26.1. Semivariograma experimental del saturación y Δ CH [cubos (a) y cilindros (b)].
Fuente: El autor.
Elaboración: El autor.

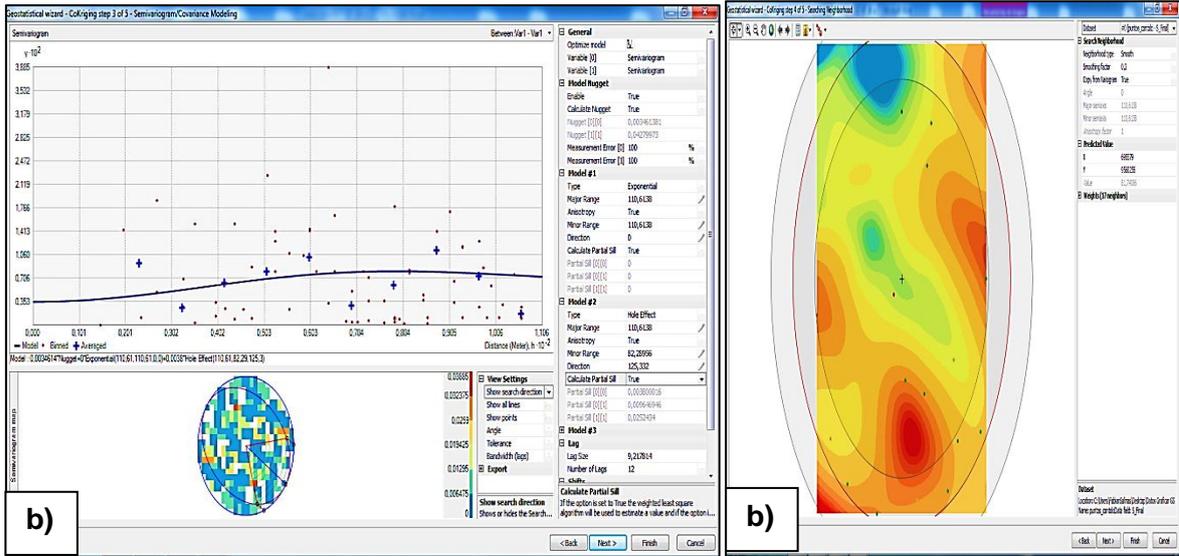


Figura 26.2. Semivariograma experimental del saturación y ΔCH [cubos (a) y cilindros (b)].
 Fuente: El autor.
 Elaboración: El autor.

En consecuencia de los pasos anteriores se obtuvo que el semivariograma experimental que más se adaptaba al estudio e interpretación del análisis experimental fue un semivariograma del tipo cuadrático racional y efecto pepita para los cubos y para los cilindros fueron lo semivariogramas del tipo exponencial y efecto pepita.

3.4.3. Estimación.

Como se puede ver en la Figura 25, se adoptó el cokriging-ordinario por las condiciones en las que se presentó la información. Además el semivariograma experimental de la figura 26, otorgó la información indispensable para la presente predicción. Dando como resultado de la predicción de los cubos y cilindros una media estandarizada de - 0,20 que se acerca mucho a cero que sería lo ideal y un error cuadrático medio de 1,42.

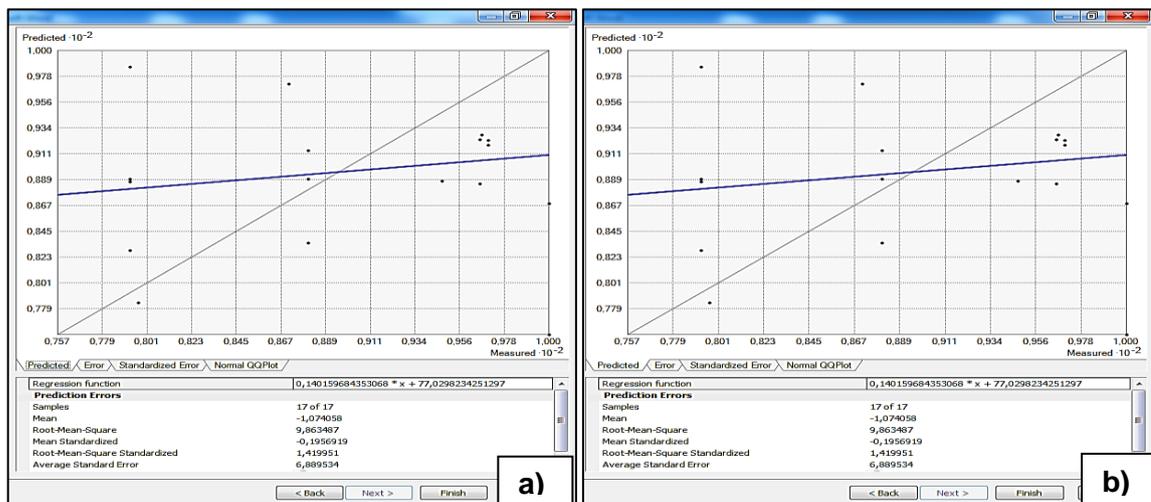


Figura 27. Gráficos de la evaluación de la calidad de la predicción [cubos (a) y cilindros (b)].
 Fuente: El autor.
 Elaboración: El autor.

En la Figura 28, se puede ver que el máximo error de la predicción es de 8,03% lo que indica que la predicción tiene una confiabilidad del 91,97%; lo cual es bueno ya que se encuentra dentro de los rangos aceptables de confiabilidad. Para observar con más detalles los mapas dirigirse al Anexo 1.

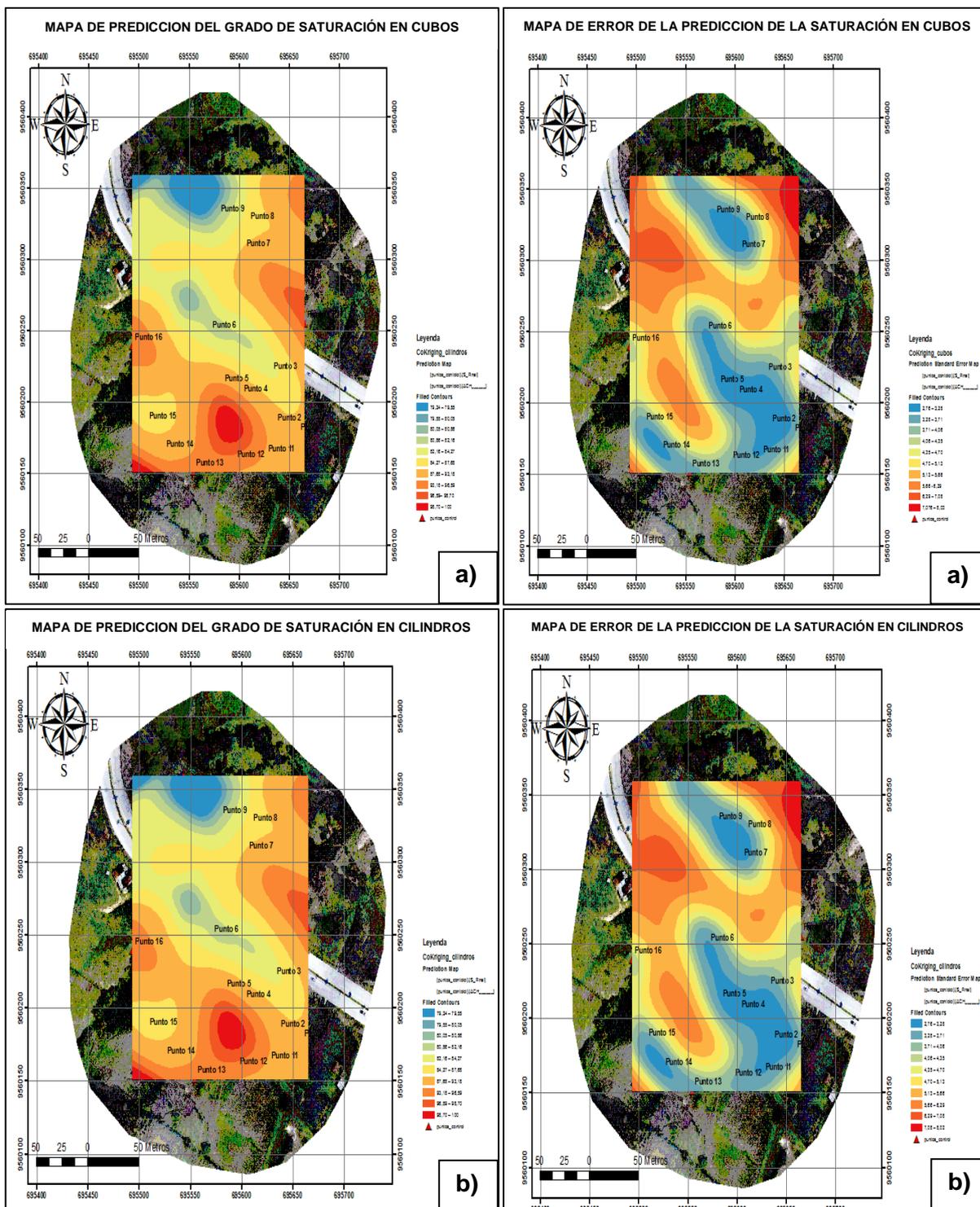


Figura 28. Mapas de predicción y de error del saturación y ΔCH [cubos (a) y cilindros (b)].

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

La predicción se realizó al nivel de las capas superficiales del área de estudio y el área de influencia del movimiento de masas se encuentra localizado en el rango de 90 a 97 % del grado de saturación que le corresponde a los suelos 1 y 2, no siendo esta la tipología que produjo el deslizamiento del talud, sino sus capas subsiguientes que son los suelos 3 y 4, los mismos que se saturaban con contenidos de humedad bajos en comparación a los suelos 1 y 2.

La falla en los estratos de los suelos 3 y 4 se le atribuye a la concavidad de la topografía del sector y a los estratos de los suelos 1 y 2 que permitían que el agua precipitada se infiltre hasta estos estratos del suelo 3 y 4, los cuales son muy sensibles a la variación del contenido de humedad, puesto que estos almacenan el agua por sus propiedades mineralógicas y por ende mecánicas se ven reducidas.

Así mismo los estratos superiores ganan peso por el agua y producen presiones intersticiales en los suelos 3 y 4 que los convierten en suelos susceptibles a la falla.

3.5. Evaluación del comportamiento de la infraestructura lineal en el periodo de análisis.



Figura 29. Secuencia del daño ocasionado por el deslizamiento al funcionamiento de la infraestructura lineal.

Fuente: El autor.

Elaboración: El autor.

Al inicio del monitoreo de los desplazamientos la vía se encontraba funcionando en óptimas condiciones, sin embargo, en el intervalo de la tercera medición de los desplazamiento de los puntos de control, se generó el primer movimiento de masas en el cual la infraestructura vial se vio afectada por la destrucción de su cuneta y berma.

En cambio los puntos de control de desplazamiento ubicados sobre la calzada no presentaron desplazamientos frente a esta actividad al igual que los puntos localizados en el terraplén y al pie del talud su desplazamiento es insignificante.

CONCLUSIONES

El talud en estudio mantiene un movimiento activo por influencia de las precipitaciones diarias y acumuladas. Además se pudo comprobar la influencia del grado de saturación en movimiento de masas ya que la superficie de falla del talud reportada en campo y los desplazamientos de los puntos de control coincide con la zona que requiere menor variación del contenido de humedad para saturarse en el análisis geoestadístico realizado.

La intersección de dos de los perfiles del talud y las lluvias de larga duración y de pequeña intensidad favorecieron a la infiltración del agua precipitada a los estratos arcillosos localizados en el pie del talud, generando la pérdida de su resistencia al corte y cohesión aparente por el aumento del grado de saturación y del peso específico de los estratos superiores por el agua absorbida, lo que desencadenó un deslizamiento profundo que se asemeja a una falla tipo cuña.

Los suelos al sufrir aumentos en su grado de saturación se vuelven más susceptibles a los cambios de su geometría debido a la pérdida de su cohesión aparente que los vuelve cuerpos deformables.

El modelo físico permitió comprobar que los suelos 1 y 2 (arenas arcillosas), requieren de cortas precipitaciones y de gran intensidad para que se lleguen a saturar, siendo lo opuesto para conseguir la saturación de suelos 3 y 4 (arcillas inorgánicas de alta plasticidad). Dejando en función la intensidad de la precipitación y la permeabilidad del suelo si el deslizamiento de un talud será profundo o superficial.

Con ayuda de los resultados obtenidos del monitoreo de los puntos de control y el registro de precipitaciones de la Tabla 9, se corroboró los resultados obtenidos en el modelo físico experimental ya que los puntos 3, 4, 5 y 14, que son los que presentaron mayor movimiento en campo tenían como capa superficial a los suelos 1 y 2 (arenas arcillosas), pero siendo el suelo 3 y 4 (arcillas inorgánicas de alta plasticidad), los generadores del movimiento de masas, al ser los estratos subsiguientes a los estratos superficiales. Dado a que las precipitaciones acumuladas del 13 al 15 de enero, como del 27 al 31 de marzo y 29 de marzo al 2 de abril, generaron que se desestabilice el talud, puesto que los estratos superficiales por su alta permeabilidad permiten que el agua precipitada se infiltre a grandes profundidades hasta llegar a estrato de los suelos 3 y 4 (arcillas inorgánicas de alta plasticidad), los cuales retienen una cierta cantidad de agua, lo que al poco tiempo las vuelve impermeables. Generando la acumulación de agua sobre este estrato y sumándole el peso del agua y de los estratos superficiales a este se genera su falla mecánica por la

reducción a esta por los efectos que tienen las arcillas frente al aumento de la saturación de estas.

Al producirse intensidades altas de precipitación, los suelos se llegan a saturar los estratos superficiales, generando que estos se lleguen a impermeabilizar, debido a que la permeabilidad de los suelos es inferior a la intensidad de la tormenta. Por lo que este tipo de tormentas generan fallas superficiales en taludes y laderas.

La relación de vacíos de los suelos en estado natural se encuentra en función del contenido de humedad, puesto que el agua ayuda a ganar peso a las partículas más densas de una masa de suelo, lo que provoca, que estos por acción de la gravedad desciendan y la relación de vacíos incremente al igual que el contenido de humedad. Estos incrementos producen una pequeña variabilidad espacial de las propiedades índices (límite líquido y plásticos) de los suelos.

El análisis geoestadístico a pesar de tener una confiabilidad aceptable, su error cuadrático medio fue superior a 1 lo que indica que la diferencia entre el estimador y lo que se estima es relativamente amplia, dado a la existencia de múltiples áreas de difícil acceso que imposibilitaron hacer mediciones y la toma de muestras.

RECOMENDACIONES

Los resultados de laboratorio y la confiabilidad de la investigación se encuentran en función de la calidad del muestreo en campo, por lo que se recomienda tener cuidado y un mayor control en la en la calidad de las muestras.

Para una mejor correlación de datos se recomienda tomar muestras del mismo volumen ya que la intensidad de las precipitaciones simuladas está en función de su volumen de la muestra y en consecuencia el tiempo de saturación como el volumen agua adoptado para la simulación.

Realizar un control continuo en la intensidad de la precipitación simulada, puesto que las muestras su permeabilidad va disminuyendo con el aumento del contenido de humedad y al mantener una intensidad de precipitación superior a la intensidad de infiltración del suelo se llega a saturara e impermeabilizar superficialmente.

Para realizar predicciones de calidad por métodos geoestadísticos, se debe trabajar el análisis exploratorio conjuntamente con el análisis estructural, para detectar anomalías en los datos o en el peor de los casos disminuir el tamaño del mallado muestral para que el análisis estructural sea lo más representativo posible.

Se recomienda sembrar árboles y plantas de raíces largas para que estas sirvan como anclaje a la zona estable del talud, y además evitar la infiltración del agua precipitada a los estratos menos favorables.

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, E., Martínez, H., & Vélez, J. I. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masas detonado por lluvia. *Revista Académica Colombiana.Ciencia.Edición* 34, 209-227.
- Bonnard, C., & Noverraz, F. (2001). Influence of climate change on large landslides: assesment of long term movements and treds. *Proc of the international conference on landslides: causes impact and countermeasures, gluckaut, Essen*, 121-138.
- CHAPUIS, R., & BAASS, K. (1989). Granular soils in rigid-wall permeameters: method for determining the degree of saturation. *Can. Geotech Journal*, 71-79.
- Coronimas, J. (2000). Landslides and climate. In Bromhead, EN. (Ed). *VII Internacional Symposion on Landslides, Cardiff UK Keynote lectures*, CD_RM.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México D.F: Ceage Learning.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada la Iguaná de la ciudad de Medellín a partir de la interacción lluvia-pendiente-formación geológica. *Dyna*, vol 71, número 142, 33-45.
- Fredlund, D. (2000). Implementación de la mecánica del suelo parcialmente saturado en la praática de la ingeniería geotécnica. *National Research Councili of Canada*.
- Gerscovich, D. M. (2012). *Estabilidad de Taludes*. Sao Paulo : Lemoine .
- Giraldo Henao, R. (2008). *Introducción a la Geoestadística, teoría y aplicación*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia, departamento de estadística.
- Gonzalez de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hengxing, L., Chenghu, Z., Lee, C., Sijing, W., & Faquan, W. (2003). Rain fall- induced landslide stability analysis in response to transient pore pressure- a case study of natural terrain landslide in Hong Kong. *Science in China, Vol 46.Supp*, 52-68.
- Holtz, R., & Kovacs, W. (1981). *AN INTRODUCTION TO GEOTECHNICAL ENGINEERING*. New Jersey: PRETICE HALL, Englewood Cliffs.
- Jimenez, J., & de justo Alpañes, J. L. (1975). *GEOTECNICIA Y CIMENTOS I, Propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid: Editorial Rueda.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelos*. México D.F.: Limusa.

Kennerley, J., & Almeida, L. (1975). Mapa geológico del Ecuador, hoja de Loja(56), escala 1:100 000. *Instituto Geográfico Militar (IGM), Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos (MRNE), Dirección General de Geología y Minas (DGGM), and Institute of Geological Sciences London (IGS)*, 23-24.

Lee, S., Cheol Kim, J., Jung, H.-S., & Lee, S. (2017). Spatial prediction of flood susceptibility using random forest and boosted-tree models in Seoul metropolitan city, Korea. *Geomatics, Natural Hazard and Risk*.

Matheron, G. (1962). *Tomo1, Traite de Geostatistique Appliquee bureau de Recherches Geologiques et Minières, N24*. Paris: Editions Bureau de Recherche.

Mora, R., & Rojas, E. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. *Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XIII, Núm. 1*, 55-68.

Moreno Jiménez. (2005). *Sistemas y análisis de la información geográfica-Manual de autoaprendizaje con ArcGis*. Madrid: Editorial RA-MA.

Moreno, H., Velez, M., Montoya, J., & Rhodals, R. (2006). LA LLUVIA Y LOS DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN ANTIOQUIA: ANÁLISIS DE SU OCURRENCIA EN LAS ESCALAS INTERANUAL, INTRAANUAL Y DIARIA. *Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín. Número 5*, 59-69.

R.S., M.-O., & E., R.-G. (2012). Efecto de la saturación en el deslizamiento de talud en la comunidad San Juan de Grijalva, Chiapas. *Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XIII, Núm. 1*, 55-68.

Rahardjo, H., X, W., Toll, D., & Leong, E. (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 371-399.

Ramos, A., Trujillo, M., & Prada, L. (2015). RAINFALL THRESHOLDS FOR THE INITIATION OF LANDSLIDES.A CRITICAL REVIEW. *CIENCIA E INGENIERIA NEOGRADINA. vol 25-2*, 61-80.

Ruiz, V. (2017). *Uso de técnicas de sistemas de posicionamiento de movimiento de laderas*. Loja: UTPL.

Sanchez, D. (2011). Precipitación extremas y sus i plicaciones en procesos de remoción en masas en la planificación urbana de Tampico, México. *Cuadernos Gráficos Universidad de Granada*, 135-149.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In report 176: Landslides: Analysis and control(Eds: Schuster, R. L. y Krizek, R. J). *Transportation and road research board, National academy of Sciencie, Washington D.C.*, 11-33.

Normas:

NTE INEN 0686. (1987). Mecánica de suelos. Toma de muestras alteradas.

NTE INEN 0687. (1982). Mecánica de suelos. Toma de muestras inalteradas.

ASTM D 422-63. (2008). Estándar Test Method for Particle- Size Analysis of Soils. ASTM INTERNATIONAL.

ASTM D 4318. (2005). Límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.

ASTM D 2216. (1998). Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de humedad de suelos y rocas por masa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689-1699.

ASTM D 854-92. Standard Test Method for Specific Gravity of Soils.

ASTM D 854-01. Standard test Method

ASTM D 3080-72. Standard Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions

ANEXOS