

Análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud

ENRIQUE ALONSO VALVERDE RUIZ

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Abstract

Rain causes a change in soil moisture which in turn generates a change in the shear strength, including suction stress, also in soil's parameters such as unit weight. These changes directly affect the stability of the slope.

Information obtained in situ by instrumenting the slope was used in this study. Simultaneously, shear strength test were conducted to obtain analysis parameters. A rain forecast model used to evaluate the soil moisture change and their effect in the strength parameters was used. With this information, the analyses of stability using Fellenius and Bishop methods were made, considering a surcharge in the slope. Also, a probability of failure by using the Rosenblueth method was calculated.

The influence of the precipitation has a direct impact on soil moisture. An increase in rain results in a decrease in suction stress which leads to a decrease in the slope safety factor and an increase in the probability of failure. The suction loss, which is not considered in conventional analysis, decreases approximately 8% the safety factor.

Key words: precipitation forecast, suction, stability, slopes, probability of failure, unsaturated soils

Resumen

La lluvia provoca una modificación en la humedad del suelo lo que a su vez genera un cambio en los parámetros de resistencia, entre ellos, el esfuerzo de succión, así como también en parámetros del suelo tales como el peso específico. Estas modificaciones afectan de forma directa la estabilidad del talud.

Se hizo uso de información in situ obtenida de la instrumentación del talud. Simultáneamente se realizaron ensayos de exploración, clasificación y de resistencia del suelo. Junto a esto se utilizaron modelos de pronóstico de lluvia, transformación de la misma en humedad en el suelo y la afectación de esta en los parámetros de resistencia. Se realiza con esta información un análisis de estabilidad mediante el método de Fellenius y de Bishop sometiendo el talud a una sobrecarga, además, se obtiene una probabilidad de falla haciendo uso del método probabilístico de Rosenblueth.

La influencia de la precipitación tiene un impacto directo en la humedad del suelo, por lo que un aumento de lluvia genera una disminución en el esfuerzo de succión, lo que provoca una disminución en el factor de seguridad del talud y un aumento en la probabilidad de falla. La succión, al no ser considerada en análisis convencionales, disminuye aproximadamente 8% el factor de seguridad.

Palabras clave: Precipitación, pronóstico, succión, estabilidad, taludes, probabilidad de falla, suelo no saturado.

Contenido

Prefacio	7
Resumen ejecutivo.....	8
Introducción.....	12
Marco teórico.....	14
Metodología.....	34
Resultados.....	50
Análisis de resultados	69
Conclusiones	77
Recomendaciones.....	79
Anexos.....	81
Referencias.....	82
Referencias de imágenes	84

Índice de cuadros

CUADRO 1. CANTIDADES NECESARIAS DE SUELO PARA REALIZAR LOS DIFERENTES ENSAYOS	8
CUADRO 2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PROBABILÍSTICO USANDO EL MÉTODO DE ROSENBLUETH PARA EL TALUD EN ESTUDIO.....	10
CUADRO 3. INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL TALUD EN EL AÑO 2010	11
CUADRO 4. HISTORIA DE LOS SUELOS NO SATURADOS TOMADO DE BARRERA (2002).	14
CUADRO 5. TÉCNICAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN (TOMADO DE LU Y LIKOS, 2004).....	17
CUADRO 6. FACTORES QUE GENERAN LA EXPANSIÓN	22
CUADRO 7. FACTORES DESENCADENANTES DE INESTABILIDAD EN TALUDES (RAMIREZ, 2007)	25
CUADRO 8. PRINCIPALES TIPOS DE MUROS DE CONTENCIÓN	29
(RAMÍREZ, 2007) Y (BRAJA, 2001)	29
CUADRO 9. CANTIDADES NECESARIAS DE SUELO PARA REALIZAR LOS DIFERENTES ENSAYOS	36
CUADRO 10. MALLAS USADAS EN LA GRANULOMETRIA Y SU RESPECTIVA ABERTURA	37
CUADRO 11. CANTIDADES DE GOLPES NECESARIOS PARA FORMAR LA CURVA PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO.....	38
CUADRO 12. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA	48
(BALTODANO, 2009)	48
CUADRO 13. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS ESTRATOS PRESENTADOS EN EL MODELO GEOTÉCNICO. (GEOAM, 2010)	50
CUADRO 14. COMPOSICION GRANULOMETRICA	51
CUADRO 15. DETERMINACION DEL LÍMITE LÍQUIDO.....	52
CUADRO 16. LÍMITES DE ATTERBERG.....	52
CUADRO 17. PESO SECO MAXIMO Y HUMEDAD OPTIMA	53
CUADRO 18. GRAVEDAD ESPECIFICA.....	53
CUADRO 19. GEOMETRÍA DEL TALUD	55
CUADRO 20. PARAMETROS DE DISEÑO	55
CUADRO 21. DIMENSIONES PERFORACIONES	56
CUADRO 22. REGISTRO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN DE LA ESTACIÓN METEREOLÓGICA UBICADA EN LAS NUBES (IMN, 2010)	57
CUADRO 23. PRONÓSTICO PARA EL AÑO 2010 USANDO EL MÉTODO DE ÍNDICES DE ESTACIONALIDAD.	59
CUADRO 24. EFECTO DE LA CALIBRACIÓN EN EL PRONÓSTICO SEMANAL USANDO EL MÉTODO DE ÍNDICES DE ESTACIONALIDAD.	59
CUADRO 25. PRONÓSTICO SEMANAL USANDO EL MÉTODO DE MEDIA MOVIL	60
CUADRO 26. CÁLCULO DE HUMEDAD A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN PRONOSTICADA USANDO EL MODELO PROPUESTO SCHOSINSKY (2007)	63
CUADRO 28. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PROBABILÍSTICO.....	68

Índice de figuras

FIGURA 1. PERFIL DEL TERRENO EN LAS NUBES.	9
FIGURA 2. FASES DE UN SUELO NO SATURADO (TOMADO DE YOSHIMI & OSTERBERG, 1963)	15
FIGURA 3. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS NO SATURADOS (WROTH & HOULBY, 1985).....	15
FIGURA 4. ZONAS DE UNA CURVA CARACTERÍSTICA SUELO-AGUA. (PÉREZ,2008)	18
FIGURA 5. CURVAS SUELO – AGUA PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELOS (LU Y LIKOS, 2004)	18
FIGURA 6. SUPERFICIES DE ESTADO PARA LA POROSIDAD Y EL GRADO DE SATURACIÓN. (MATYAS Y RHADAKRSIHNA, 1968).....	19
FIGURA 7. PLANO DE FALLA EN UN SUELO NO SATURADO (FREDLUND, 1993)	20
FIGURA 8. PARTES DE UN TALUD ARTIFICIAL (REF. RAMÍREZ, 2007)	23
FIGURA 9. ELEMENTOS DE UNA LADERA (REF.BALTODANO, 2009).....	23
FIGURA 10. TALUD DE CORTE (REF. INTERNET 2)	23
FIGURA 11. TALUD DE RELLENO (REF. INTERNET 3).....	24
FIGURA 12. MÉTODO DE LAS CUÑAS (REF. RAMÍREZ, 2007).....	25
FIGURA 13. CÍRCULO DE FALLA EN EL ANÁLISIS DE UN TALUD(REF. RAMÍREZ, 2007).....	25
FIGURA 14. DIAGRAMA DE FUERZAS EN EL MÉTODO JANBÚ SIMPLIFICADO. (POBLETE, 2006).....	26
FIGURA 15. SUPERFICIES DE FALLA PARA LOS DIFERENTES CÁLCULOS DE ESTABILIDAD (REF. RAMÍREZ, 2007)	26
FIGURA 16. MODIFICACIÓN GEOMÉTRICA DEL TALUD. (REF. INTERNET 4).....	27
FIGURA 17. PARTES DE UN ANCLAJE. (REF. INTERNET 5)	28
FIGURA 18. DIAGRAMA DE FUERZAS EN UN MURO	29
FIGURA 19. REFUERZO DE UN TALUD CARRETERO CON VETIVER. (REF. INTERNET # 6)	30
FIGURA 20. ESQUEMA DEL MONITOREO DE UN TALUD (SUAREZ, 2009)	31
FIGURA 21. ESQUEMA DEL TUBO COLOCADO EN SITIO (SUAREZ, 2009).....	31
FIGURA 22. ESQUEMA DE UN INCLINÓMETRO COLOCADO EN SITIO (SUAREZ, 2009)	32
FIGURA 23. ESQUEMA DE UN TENSIÓMETRO (GOYAL, 2007)	32
FIGURA 24. FOTOGRAFÍA DEL TERRENO SELECCIONADO EN LAS NUBES DE CORONADO. (FUENTE: ARQ. FAUSTO CALDERÓN)	35
FIGURA 25. MODELO GEOTÉCNICO PARA EL TALUD UBICADO EN LAS NUBES DE CORONADO.	50
FIGURA 26. COMPOSICIÓN DEL SUELO	51
FIGURA 27. CURVA GRANULOMÉTRICA DEL SUELO	51
FIGURA 28. DETERMINACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN SUCS USANDO LA CARTA DE PLASTICIDAD.	52
FIGURA 29. PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN REALIZADA AL SUELO EN ESTUDIO.	53
FIGURA 30. COMPORTAMIENTO DEL SUELO EN PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN.....	53
FIGURA 31. CURVA DE COMPACTACIÓN USANDO EL MÉTODO DE PROCTOR MODIFICADO.....	53
FIGURA 32. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CORTE DIRECTO.	54
FIGURA 33. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DEL TALUD.....	55
FIGURA 34. FACTORES DE SEGURIDAD OBTENIDOS USANDO DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISIS	55
FIGURA 35. DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE FALLA Y DE LA PROFUNDIDAD DE PERFORACIÓN EN EL TALUD EN ESTUDIO.	56
FIGURA 36. REGISTRO DE LA PRECIPITACIÓN OCURRIDA EN EL TALUD EN EL PERIODO 27 DE OCTUBRE 2009 – 22 DE MARZO 2010.....	58

FIGURA 37. UBICACIÓN DEL PRONÓSTICO DE PRECIPITACIÓN EN LA METODOLOGÍA DE ESCENARIOS DEL IMN.....	61
FIGURA 38. CURVA TEÓRICA CARACTERÍSTICA SUELO – AGUA PARA UN SUELO NO PLÁSTICO.	61
FIGURA 39. CURVA CARACTERÍSTICA SUELO – AGUA TEÓRICA PARA LOS PRIMEROS ESTRATOS DEL TALUD.....	62
FIGURA 40. CURVA CARACTERÍSTICA SUELO – AGUA EXPERIMENTAL OBTENIDA USANDO UN TENSÍOMETRO	62
FIGURA 41. RELACIÓN ENTRE EL PESO ESPECÍFICO Y LA HUMEDAD	64
FIGURA 42. PRECIPITACIÓN PRONOSTICADA PARA EL AÑO 2010	65
FIGURA 43. COMPORTAMIENTO DE LA HUMEDAD PRONOSTICADA EN EL AÑO 2010.	65
FIGURA 44. COMPORTAMIENTO PRONOSTICADO DE LA SUCCIÓN EN EL 2010 A PARTIR DE LA CURVA DE SUCCIÓN MEDIDA CON EL TENSÍOMETRO.....	65
FIGURA 45. COMPORTAMIENTO DEL PESO ESPECÍFICO EN EL AÑO 2010	66
FIGURA 46. VARIACIÓN EN EL FACTOR DE SEGURIDAD DEBIDO A LA PRECIPITACIÓN.....	66
FIGURA 47. EFECTO DE LA SUCCIÓN EN EL FACTOR DE SEGURIDAD	67

Prefacio

El análisis de estabilidad utilizando la teoría de los suelos no saturados es un área poco desarrollada en la mecánica de suelos, debido a que todos los análisis se realizan considerando la condición más crítica, que es la de saturación completa. En el diseño de taludes se cuenta con una mayor incertidumbre acerca de los parámetros de resistencia así como del perfil de humedad del suelo, por lo que el efecto del esfuerzo de succión no es considerado en los cálculos.

El papel de la succión en la estabilidad de taludes es importante debido a que contribuye directamente con las fuerzas estabilizadoras. La precipitación se encuentra relacionada directamente con la humedad del suelo que, al producirse un cambio en las lluvias, a su vez se reflejará en la resistencia del suelo. Por lo que un diseño de taludes que considere el aporte del esfuerzo de succión haría que el análisis del mismo, mediante un método probabilístico, disminuyera la incertidumbre de los parámetros utilizados.

Este trabajo tiene la finalidad de determinar la influencia de la precipitación en el esfuerzo succión en el marco de la estabilidad de taludes. Para ello se debe de instrumentar el talud y con esta información encontrar la relación existente entre la precipitación, el esfuerzo de succión y la estabilidad.

Agradezco a Dios por permitirme terminar este trabajo, a mi familia por darme apoyo en cada momento y por sus palabras de motivación, al Ing. Rafael Baltodano por los consejos y la guía brindada a lo largo de todo el proyecto, a la familia Osorio por permitirme desarrollar el proyecto en su terreno y por toda la colaboración dada para llevar a cabo esta investigación, a mis amigos por acompañarme en todo el proceso, a los asistentes y personeros del laboratorio de materiales del Civco, al Instituto Meteorológico Nacional, a la Escuela de Ingeniería Agrícola, en especial al Ing. Adrián Chavarría por la cooperación y ayuda brindada y a todas aquellas personas que participaron de una u otra forma les agradezco haber sido parte de esto, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible finalizar el presente trabajo.

Resumen ejecutivo

La estabilidad de taludes tiene gran importancia en la ingeniería civil, debido a que en nuestro país, por su carácter montañoso, se realizan construcciones en laderas, así como de vías de comunicación que cruzan estas montañas, generando taludes de corte y de relleno debido a la irregularidad del terreno, por lo que el análisis de los factores desencadenantes de inestabilidad se convierte en un tema interesante de estudio. La presente investigación analiza el impacto de la precipitación en la estabilidad de taludes. Este estudio examina uno de los factores desencadenantes de inestabilidad, la precipitación, reconocido por todos como uno de los más importantes responsables de deslizamientos en el país. Además, al estudiar el esfuerzo de succión, se trabaja en la rama de los suelos no saturados, la cual no se utiliza regularmente para el diseño de obras geotécnicas, entre ellas, el diseño y análisis de estabilidad de taludes, debido a la complejidad de sus formulaciones.

El proyecto de investigación fue realizado en la provincia de San José, en el cantón de Vásquez de Coronado, específicamente en el poblado de Las Nubes. Allí se encuentra un talud de 28 metros de altura con una pendiente pronunciada y variable. La corona mide 21 metros aproximadamente y la cara de la ladera mide 62 metros de longitud. Este se encuentra recubierto por pasto en toda su extensión. El objetivo del trabajo es analizar la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y en la estabilidad de taludes.

Para llevar a cabo este trabajo se debió instrumentar el talud y realizar pruebas de exploración, clasificación y de resistencia del suelo. Además, se debió realizar un estudio de la precipitación y su influencia en los parámetros que determinan la estabilidad de la masa de

suelo. Por lo que para desarrollar la investigación se tuvo que instalar en la ladera un pluviómetro, el cual se utilizó para registrar la precipitación en un lapso establecido, que va desde octubre del 2009 a marzo del 2010. El pluviómetro es de fabricación casera, un recipiente de paredes rectas y planas que cuenta con un dispositivo para contrarrestar la evaporación. Además de este instrumento se tuvo que hacer uso del tensiómetro, instrumento capaz de medir la succión en el terreno, y de un inclinómetro, con el fin de medir el desplazamiento horizontal del terreno.

Para el desarrollo y creación del modelo geotécnico se tuvo la necesidad de realizar pruebas, tanto de exploración, como de clasificación y resistencia. Primeramente se obtuvo la clasificación del suelo. Como primer paso se realizó un muestreo a un metro de profundidad, con el fin de obtener la cantidad necesaria de material para la realización de las pruebas de clasificación. La cantidad extraída fue de aproximadamente 50 kg. En el siguiente cuadro se obtiene la cantidad necesaria para cada uno de los ensayos por realizar. Para llegar a estas cantidades se realizó un cuarteo para tomar de forma representativa la muestra.

CUADRO 1. CANTIDADES NECESARIAS DE SUELO PARA REALIZAR LOS DIFERENTES ENSAYOS

Granulometría	500 gramos
Límites de Atterberg	2000 gramos
Sedimentación	500 gramos
Proctor Modificado	20000 gramos

Granulométricamente, el suelo es clasificado como arena limosa (SM), según SUCS. Presenta un alto contenido de limos, aproximadamente 47%. El material es no plástico y su límite líquido, obtenido por el método de un único punto, es de 42. Se caracterizó además realizando la prueba Proctor modificado y se obtuvo para una humedad de 32,5%, una densidad de 1275 kg/m³ y gravedad específica de 2,65.

La prueba de exploración utilizada fue el SPT. Se realizaron dos perforaciones de seis y ocho metros de profundidad, las cuales fueron estimadas haciendo uso del software slope/w® de la compañía Geoslope®. Para la determinación de la superficie de falla se usaron parámetros, obtenidos de tablas, basados en la clasificación preliminar del suelo. Se obtuvo el perfil, con el cual se trabajó para realizar el análisis de estabilidad.

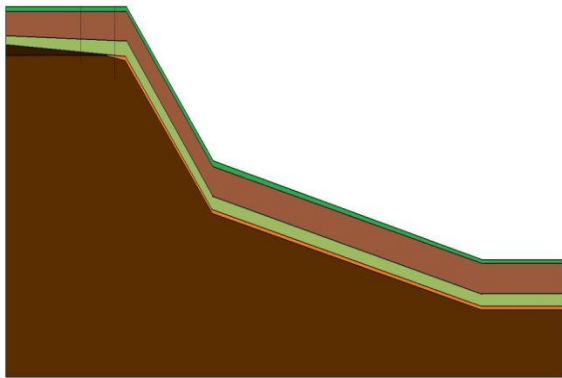


Figura 1. Perfil del terreno en Las Nubes.

Mediante la instalación de un pluviómetro en el talud se registró la precipitación en el periodo octubre del 2009 a marzo 2010, con el fin de tomar medidas y obtener el comportamiento de la misma y su influencia en el suelo. Debido al corto periodo de estudio, se utilizaron registros de precipitación, provistos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para el poblado de Las Nubes. Estos registros no tienen vigencia, ya que la estación de la cual fueron tomados no se encuentra en uso actualmente, por lo que se consultaron los registros de las estaciones ubicadas en Coronado y Cascajal, que se encuentran en la misma condición. Además, se consultaron las estaciones ubicadas en San Josecito de Heredia y Rancho Redondo, las

cuales se encuentran vigentes. Para el análisis del comportamiento de la lluvia se hace uso de técnicas estadísticas, las cuales determinan el comportamiento de los datos mediante una distribución de frecuencias y la agrupación de los datos en tres posibles escenarios. Estos escenarios son el seco, el lluvioso y el normal. (Villalobos et al, 1997)

Se tomó el registro de precipitación del talud y, mediante la comparación de dos técnicas de pronóstico: media móvil e índice de estacionalidad, se obtuvo la precipitación para el año 2010, con la cual se trabajó el análisis de estabilidad. El método que presentó mejores resultados y pronósticos más certeros fue el del índice de estacionalidad, por lo que se siguen usando estas predicciones para el resto de los cálculos.

Es conocido que la precipitación provoca cambios en el suelo, principalmente en el contenido de agua del mismo, por lo que en época lluviosa se habla de la saturación de los suelos. Para determinar el contenido de humedad de un suelo debido a una precipitación, se tuvo que hacer uso de un modelo realizado por Schosinsky (2007), el cual realiza un balance hídrico en el que calcula la cantidad de lluvia que se retiene por el follaje, la que por efecto de la escorrentía no se infiltra, la que se infiltra y la precipitación que es evapotranspirada por las plantas. Introduciendo la precipitación mensual pronosticada en dicho modelo, se obtuvo la humedad a final de mes, con lo que se tiene a lo largo del año la variación de la humedad.

Además se hace un modelo del esfuerzo de succión del terreno haciendo uso de un tensiómetro. Para realizar este modelo se toma una muestra inalterada del suelo del talud; dicha muestra se introduce en un recipiente de fondo poroso con el fin de simular las condiciones de campo. Esta muestra se satura y se coloca el tensiómetro. Posteriormente, se toman lecturas de succión y de humedad con el fin de obtener la curva característica suelo – agua y se compara con la curva característica suelo – agua teórica.

Con la modificación de la humedad se modifican parámetros de resistencia, tales como el peso específico total y la succión. Usando

estos parámetros variables y otros constantes, tales como la geometría, estratigrafía y sobrecarga, se realiza un análisis de estabilidad determinístico. Se utiliza el método de Fellenius y de Bishop para la determinación del factor de seguridad.

Además del análisis determinístico realizado, se trabajó con el método probabilístico. En este se tomaron la succión y el peso específico como variables, al igual que en el método convencional. Este análisis de estabilidad generó un índice de confiabilidad, el cual está asociado a una probabilidad de falla y, a su vez, a un nivel de desempeño.

CUADRO 2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PROBABILÍSTICO USANDO EL MÉTODO DE ROSENBLUETH PARA EL TALUD EN ESTUDIO		
Número de variables	2	
Variable	Promedio	Desviación
Peso Especifico (kg/m3)	1600	100
Succión (kPa)	70	10
Índice de confiabilidad	6,9	
Probabilidad de falla	2,871 X 10 ⁻⁷	
Nivel de desempeño	Alto	

La precipitación es un fenómeno climatológico que afecta directamente la estabilidad de los taludes. Es uno de los factores desestabilizantes debido a que aumenta el peso de la masa de suelo y reduce la resistencia al cortante. Su influencia en el esfuerzo de succión es considerable, ya que al aumentar la lluvia, aumenta el contenido de agua en los poros. El esfuerzo que se ve afectado es el de succión. Este es un esfuerzo que en los cálculos convencionales no es tomado en cuenta debido a lo complicado de las ecuaciones y el suelo se supone completamente saturado, ya que es la condición más crítica.

Sin embargo, la condición de suelo saturado no se mantiene por tiempo prolongado, lo que hace que la mayor parte del tiempo, el talud se encuentre en la condición no saturada.

Las implicaciones de un análisis que contemple el esfuerzo de succión se ven reflejadas, en un análisis determinístico, en el factor de seguridad, el cual se reduce cuando existe una reducción en la succión, y en un análisis probabilístico en la reducción de la incertidumbre de los parámetros empleados, lo que optimiza el diseño del talud. La precipitación modifica el contenido de agua del suelo, es decir, un aumento de lluvia genera un aumento de humedad, lo que modifica directamente los parámetros de resistencia. A mayor precipitación se genera mayor humedad que implica menor resistencia. Esta resistencia se ve modificada, ya que el esfuerzo de succión disminuye al aumentar la humedad, puesto que los vacíos que generan la succión se rellenan de agua. (Barrera et al, 2002)

El impacto de la succión en la estabilidad de los taludes es importante, ya que al no considerarla disminuye hasta un 8% el factor de seguridad. Es importante destacar que, para efectos de cálculo en el análisis de estabilidad, la succión se adiciona a la cohesión. Este método es conocido como cohesión total. Además cabe destacar que la cohesión debida a la succión dependerá del ϕ^b , ángulo de fricción en relación con la succión matricial. (Fredlund, 1993)

Conclusiones

La succión es un esfuerzo que aporta resistencia al cortante. Este es medido con un tensiómetro que es instalado en el talud. Este esfuerzo se ve afectado por el contenido de agua en el suelo, que aumenta debido a la precipitación. A mayor contenido de agua se va a obtener menor succión, lo que implica menor resistencia.

Bajo condiciones controladas, tales como la geometría, sobrecargas y condiciones de drenaje, se determina la influencia de la lluvia en la estabilidad. Este análisis muestra que el factor de seguridad efectivamente disminuye con el aumento de la precipitación. Debido a la variabilidad de las propiedades de los suelos y de su estratigrafía, el análisis probabilístico desarrolla índices de confiabilidad a partir del

promedio y desviación estándar de las variables estudiadas. El índice se asocia a una probabilidad de falla γ , al mismo tiempo un nivel de desempeño con el cual se valora el talud. Al comparar esta metodología con un análisis determinístico, en el cual se determina un factor de seguridad a partir de datos puntuales, se obtuvo que el análisis probabilístico, que incluye la succión, logra disminuir la incertidumbre de los parámetros empleados y por consiguiente diseños más certeros y apegados a la realidad.

La influencia de la succión en la estabilidad es importante ya que genera un aumento en el factor de seguridad de aproximadamente ocho por ciento.

CUADRO 3. INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL TALUD EN EL AÑO 2010

Periodo	PRONOSTICO I SEMESTRE 2010					
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Precipitación (mm)	243,00	83,00	170,00	210,01	222,79	235,57
Humedad	31%	22%	18%	18%	18%	19%
γ (kg/m ³)	1670,25	1555,29	1506,99	1503,85	1502,40	1520,42
γ (KN/M ³)	16,39	15,26	14,78	14,75	14,74	14,92
Succión (kPa)	73,5	83,0	86,9	86,9	86,9	85,9
FS Fellenius	2,06	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
FS Bishop	2,25	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26
Periodo	PRONOSTICO II SEMESTRE 2010					
Mes	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Precipitación (mm)	248,34	261,12	273,90	286,68	299,46	312,24
Humedad	21%	25%	30%	31%	31%	31%
γ (kg/m ³)	1545,05	1587,50	1656,24	1670,25	1670,25	1670,25
γ (KN/M ³)	15,16	15,57	16,25	16,39	16,39	16,39
Succión (kPa)	84,0	79,9	74,6	73,5	73,5	73,5
FS Fellenius	2,08	2,07	2,06	2,06	2,06	2,06
FS Bishop	2,26	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25

Introducción

El presente trabajo consiste en el análisis de la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y la estabilidad de un talud. El objetivo general del mismo consiste en evaluar la relación entre la precipitación, el esfuerzo de succión y el movimiento de un talud mediante su instrumentación. Para el cumplimiento del mismo se desarrollan los siguientes objetivos específicos:

1. Instalar pluviómetros, tensiómetros e instrumentos capaces de medir el desplazamiento en el talud en estudio para determinar una potencial superficie de falla
2. Estimar los parámetros de resistencia cortante de la masa de suelo mediante pruebas de resistencia cortante.
3. Determinar la Curva Característica Suelo-Agua para la masa de suelo del talud en estudio
4. Realizar recomendaciones para la reducción de la amenaza de inestabilidad del talud mediante metodologías que consideren la influencia del esfuerzo de succión

Para realizar dicho estudio se debe de hacer la selección del mismo. El talud seleccionado se encuentra en la provincia de San José, en el cantón de Vásquez de Coronado, en el distrito de San Rafael, específicamente en el poblado de Las Nubes. Este es de carácter natural, el cual no ha sido alterado por el hombre; es propiedad de la familia Osorio. En el terreno se desea construir una casa de habitación de aproximadamente 100 m². Se realiza la instrumentación del talud. Para ello, se realizaron perforaciones de seis y ocho metros de profundidad, determinadas con un cálculo de la superficie de falla para la masa de suelo en estudio. En estas perforaciones se pretende medir el movimiento del suelo haciendo uso de un inclinómetro. Además con ellas se va a obtener el perfil estratigráfico del terreno. Junto al inclinómetro se va a hacer uso de un tensiómetro con el fin de determinar el esfuerzo de succión. Con pluviómetros se hará la medición de la precipitación, de manera que se establezca una relación entre esta y el esfuerzo de succión y con

el movimiento del terreno. Determinando estas relaciones se podrán realizar las recomendaciones necesarias para realizar la estabilización.

Los estudios realizados pertenecen a la rama de los suelos no saturados. Estos no han sido estudiados de la misma forma que los suelos completamente saturados, por lo tanto existe una carencia de información sobre el tema. Partiendo del hecho que la condición de suelo saturado no es una condición permanente, se hace necesario conocer el comportamiento de estos debido a que experimentan variaciones de humedad que conllevan a cambios volumétricos y cambios en la resistencia cortante. (Barrera, 2002). En suelos no saturados, se produce un esfuerzo llamado de succión. Cuando la saturación disminuye, la tendencia de la succión es a aumentar. El diseño de las obras geotécnicas se realiza usando la condición de saturación total. Esto simplifica los cálculos, pero deja de lado los cambios volumétricos debidos a la precipitación, que pueden llegar a afectar la condición de servicio de las obras civiles. (Barrera, 2002).

La mecánica de suelos no saturados no ha sido estudiada con profundidad en el país debido a que se utiliza el modelo de saturación total, el cual es un método que simplifica y reduce la complejidad de los cálculos. Usar este modelo es una manera de diseño conservadora pero que deja de lado el efecto de la succión, cambios de humedad y de volumen, que se dan en condiciones no saturadas. A nivel mundial se ha despertado un interés por esta condición que ha generado una serie de estudios en el tema, así como en el país se han comenzado a realizar estudios sobre la materia. Entre los estudios se encuentran:

1. Schiava y Etse (2004), estudiantes argentinos, realizan una simulación de ensayos empleando un programa computacional y lo documentan en "Simulación de ensayos empleando el modelo mrs lade extendido para suelos parcialmente saturados" en el cual logran simular los contenidos de humedad y la carga mediante la emulación de ensayos

edométricos y de compresión triaxial con succión controlada. Esta es una simulación computacional, lo que difiere de este trabajo, en el cual se van a realizar únicamente ensayos de laboratorio y no se van a realizar modelos computacionales.

2. En México se han realizado más estudios en el tema y ya cuentan con documentación oficial. Se han publicado varios libros, los cuales se enfocan en las vías terrestres. De ahí se tiene "Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres", Instituto Mexicano del Transporte (IMT) 2002, en el que Barrera explica los conceptos fundamentales de los suelos no saturados y explica su aplicación a las diferentes estructuras que se dan en la construcción de carreteras, tales como taludes, estructuras de pavimentos, entre otras. En el presente trabajo se van a tomar los resultados específicos para

el talud y se realizarán las recomendaciones para la estabilización del mismo, por lo que las demás estructuras quedan fuera del alcance del trabajo.

3. Los efectos de tensión y cortante para arenas no saturadas son estudiadas por Baltodano (2006) en su disertación para el doctorado
4. Bogantes (2003) estudia los efectos de la lluvia en la estabilidad de taludes en suelos no saturados. Dicho estudio se realiza en el cerro Tapezco. Este proyecto a pesar de ser similar a este trabajo, difiere debido a las pruebas utilizadas y los objetivos específicos planteados, dado que Roy Bogantes hace uso de pruebas in situ para la determinación de la resistencia al cortante, mientras que en el presente estudio se utilizan tensiómetros para determinar la succión de forma directa. y el movimiento del talud se determina también de forma directa mediante el uso del inclinómetro.

Marco teórico

Suelos no saturados

Un suelo no saturado es aquel en el cual sus poros se encuentran llenos de líquido y de gas. Estos se pueden encontrar de forma natural, sin alteración del hombre, o pueden presentarse artificialmente, en forma de rellenos de suelo compactado por el ser humano. El origen de estos suelos puede ser sedimentario o residual. Además estos suelos dependen del comportamiento volumétrico, sea expansible o colapsable, grado de saturación y estado de esfuerzos. Las características principales de un suelo no saturado tienen que ver con sus cambios volumétricos, expansión y contracción, al variar el grado de saturación, por lo que pueden sufrir cambios considerables en su estado de esfuerzos.

Historia

CUADRO 4. HISTORIA DE LOS SUELOS NO SATURADOS TOMADO DE BARRERA (2002).	
Primera Etapa (Hasta 1965)	Verificación de los conceptos de esfuerzos efectivos en los suelos no saturados. Destacan los trabajos realizados por Bishop (1959) y Aitchison (1960).
Segunda Etapa (1965 – 1987)	Se introduce una variable en el estado de esfuerzos denominada esfuerzo neto y esfuerzo de succión. Se trabajó por separado los cambios

	volumétricos y en la resistencia a cortante. Son de interés los trabajos de Fredlund (1979) y Radhakrishna (1968).
Tercera Etapa (1987 – Actualidad)	Estudios sobre el límite elástico de los suelos no saturados sometidos a ciclos de carga, además de la búsqueda del enlace entre la resistencia al cortante y los cambios volumétricos. Destaca el trabajo de Alonso et al (1990).

Composición

La composición de un suelo no saturado consta de tres fases. Estas son la sólida (partículas de suelo), líquida (agua) y gases (aire). Fredlund y Morgenstern (1977) mencionados por Fredlund y Rahardjo (1993) proponen una cuarta fase independiente, que considera el espacio entre el aire y el agua libre y tiene un comportamiento diferente a la del agua y del aire por separado, como lo menciona Barrera (2002).

A continuación se va a explicar cada una de las fases con el fin de entender mejor la composición del suelo no saturado.

Fase sólida

Esta fase está conformada por las partículas minerales del suelo. Tiene la función de resistir parte de las cargas. Presenta propiedades variables, ya que depende del tipo de suelo, granulometría, porosidad, entre otras.

Fase líquida

Compuesta por el agua almacenada en los poros. Químicamente esta agua se puede clasificar en tres tipos: el agua higroscópica, adsorbida en la partícula o formando parte de la capa doble difusa, que no puede ser separada por acciones hidrodinámicas; el agua capilar, condicionada por las fuerzas capilares del suelo; y el agua gravitacional, que puede ser separada en condiciones de drenaje libre por gravedad (Barrera et al., 2002)

Fase gaseosa

Compuesta por aire, donde la compresibilidad es una de las características más importantes de esta fase. Según Barrow (1961) mencionado por Barrera et al. (2002), para intervalos pequeños y niveles bajos de presión se aproxima a la ley general de gases perfectos conocida como ley de Fick.

Estudios han demostrados que existen interacciones entre las fases líquidas y gaseosas, donde se relacionan la presión de vapor y la presión del líquido en estado de equilibrio. Ver figura 2.

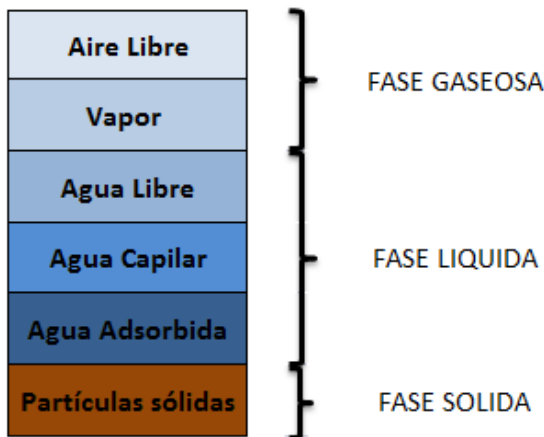


Figura 2. Fases de un suelo no saturado (tomado de Yoshimi & Osterberg, 1963)

Clasificación

La estructura y comportamiento del suelo va a cambiar según el proceso que haya tenido para llegar a la condición de no saturado. En la figura 3 Wroth y Houlby (1985) propusieron la siguiente clasificación de los suelos no saturados:

- Fase de aire discontinua y fase de agua continua. Se presenta en suelos con alto grado de saturación. El aire se presenta en forma de burbujas.
- Fases continuas de aire y agua. Es un grado intermedio de saturación. Se presenta en rellenos compactados de limos y arcillas y en una zona de transición en un suelo natural.
- Fase de aire continua y fase de agua discontinua. Presenta grados de saturación bajos. Se da en suelos naturales superficiales y algunos rellenos compactados de materiales gruesos.

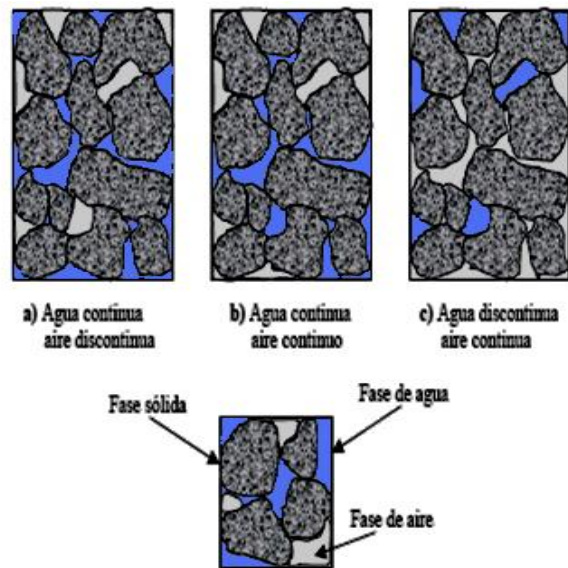


Figura 3. Clasificación de los suelos no saturados (Wroth & Houlby, 1985)

Estructura

La estructura interna de un suelo se divide en los siguientes componentes: partículas elementales (se consideran partículas de arcilla), agregados de partículas (partículas de arena) y los poros (espacios entre partículas). Se pueden dar

diferentes combinaciones de modo que entre los agregados se forme una matriz de partículas elementales que unidas entre sí unen los agregados. Los poros que existen en este tipo de formación se dan entre las partículas elementales.

Las restantes combinaciones de partículas dependen de la cantidad de partículas elementales que haya entre los agregados, de modo de que si aumentan las partículas elementales, los poros disminuyen, mas si éstas disminuyen, los poros aumentan.

Este comportamiento está condicionado por la succión matricial que actúa de dos modos: la componente capilar, asociada al agua entre agregados, aumenta la rigidez de la estructura cuando la succión es elevada; mientras que la componente de adsorción, en las partículas de arcilla, mantiene una baja compresibilidad de dichas partículas (Barrera et al., 2002)

Se pueden presentar dos alternativas, las cuales dependen de la succión y de su comportamiento. Si ésta disminuye al aumentar la saturación en la estructura, la resistencia de los contactos entre agregados también disminuye, generando un colapso general de la estructura. Esta condición se genera principalmente en estructuras de agregados de partículas.

Ahora, si por el contrario, la succión aumenta, se va a producir una reducción de volumen en la estructura matricial de partículas de arcilla provocando una reducción de volumen. Si esta condición se genera en una estructura de agregados, lo que se va a producir es un aumento en la resistencia de los contactos entre agregados, mas la estructura no sufre cambios considerables en su volumen.

Cada una de las fases tiene participación en la resistencia de las cargas aplicadas. La fase sólida es la que se encarga de la transmisión de las fuerzas, ya sea normal o tangente, entre las partículas. La fase líquida y la gaseosa son las que tienen la presión en cada uno de los puntos.

Succión

Se define la succión como la habilidad de un suelo no saturado para atraer o retener agua en términos de presión. En caso de que la gravedad, temperatura y la inercia no sean suficientes, los mecanismos responsables para la atracción son la capilaridad, mecanismos de

hidratación de corto alcance y mecanismos osmóticos. Estos dos últimos ocurren tanto en suelos saturados como en los no saturados. La capilaridad es un fenómeno propio de los suelos no saturados. (Baltodano, 2006). Otra forma de definir la succión es como el potencial termodinámico del agua de los poros del suelo relativa al potencial de referencia del agua libre. El agua libre se define como el agua que no contiene solutos disueltos y que no experimenta interacciones con otras fases que producen curvatura en la interfase aire-agua. (Baltodano, 2006).

La succión se puede desglosar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S = S_m + S_o \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde S es la succión, S_m es la succión matricial y S_o es la succión osmótica. (Likos, 1994)

Según citan diferentes autores entre ellos Zamora (2008) la succión puede verse como un potencial el cual se encuentra conformado por diferentes potenciales entre los que destaca el potencial matricial y el potencial osmótico. Además está el potencial gravitacional, que es el trabajo que se ocupa hacer para desplazar el agua de un punto a otro usando las fuerzas gravitatorias.

El potencial matricial está asociado con las fuerzas capilares que obran entre el agua y la matriz del suelo. Se mide como la presión negativa, relativa a la presión del gas del suelo y la presión del gas externo al suelo (Barrera et al., 2002).

La succión matricial está compuesta por dos mecanismos de interacción principales, llamados adsorción y capilaridad. La adsorción, es un fenómeno originado por fuerzas eléctricas. Induce la formación de películas hidratadas alrededor de las partículas del suelo, de forma que las moléculas de agua adsorbidas pueden interactuar con la estructura del suelo, ya que están unidas a las partículas del suelo. La capilaridad es generada por efectos superficiales debido a las fuerzas de atracción intermoleculares. Induce diferencias de presión de poro en las fases fluidas de las cuales depende del intercambio que exista en la fase líquida y la estructura del suelo. En los suelos ambos mecanismos son importantes debido a la presencia de capas difusoras dobles y en la intensidad del intercambio iónico que se da entre

los minerales y la presión de poro, junto con las dimensiones reducidas de los poros capilares. Estos poros se modelan de forma que se consideran como una serie de tubos interconectados de diferente diámetro. (Tedesco, 2006).

Según Barrera y Garnica (2002) en la publicación técnica 198 del Instituto Mexicano del Transporte, el potencial osmótico es la presión negativa de agua pura a la que habría que someter una masa de agua con la misma composición que la intersticial para estar en equilibrio a través de una membrana semipermeable.

De los trabajos de Wood (1979) se obtiene que la succión esté relacionada directamente con la granulometría. El estudio realizado por Wood muestra que en suelos uniformes la variación de la humedad es grande con cambios pequeños en succión, mientras que en suelos con una granulometría balanceada existe una variación gradual entre la humedad y la succión. Ensayos realizados por diversos autores demuestran que la succión matricial es la que logra responder a la deformación y resistencia del suelo, pero la influencia de la succión osmótica en los parámetros de deformación y resistencia no es completamente conocida. Dada esta condición Fredlund (1979) y Alonso et al. (1987) establecen que la diferencia de presiones de agua y de aire puede ser equivalente a la succión matricial únicamente (Barrera, 2002)

La succión matricial es la responsable de explicar los fenómenos de deformación y esfuerzos del suelo, además de que la rigidez está asociada a esta variable. Por lo que desde ahora, se entenderá como succión matricial únicamente como succión.

La medición de la succión se puede clasificar en métodos de campo y de laboratorio. Las mediciones en el laboratorio requieren que las muestras sean inalteradas debido a la sensibilidad de la succión. A continuación se toma de Baltodano (2006), el cual toma de Lu y Likos (2004), el siguiente cuadro que muestra las diferentes técnicas para la medición de la succión y los rangos de succión alcanzables.

CUADRO 5. TÉCNICAS DE LABORATORIO Y DE CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUCCIÓN (TOMADO DE LU Y LIKOS, 2004)			
Succión a medir	Técnica/Sensor	Rango Succión Práctica (kPa)	Lab/Campo
Succión matricial	Tensiómetro	0 – 100	Lab y Campo
	Ejes trasladados	0 – 1.500	Lab
	Sensores de conductividad térmica y eléctrica	0 – 400	Lab y Campo
	Papel filtro de contacto	0 – 1.000.000	Lab y Campo
Succión Total	Psicómetro	100 – 8.000	Lab y campo
	Higrómetros	1.000 – 450.000	Lab
	Sensores de capacitancia	0 – 1.000.000	Lab
	Control de humedad Isopiéstica	10.000-600.000	Lab
	Control de humedad a dos presiones	10.000-600.000	Lab
	Papel filtro sin contacto	1.000 – 500.000	Lab y Campo

Curva característica suelo – agua

La curva suelo-agua característica o curva de retención de agua describe la relación entre la succión del suelo y el contenido suelo-agua del suelo. Además indica el potencial termodinámico del agua capilar relacionado con el del agua libre como una función del agua absorbida por el sistema. Relativamente a menores contenidos de agua o grados de saturación, el potencial del agua capilar es reducida en comparación a la libre, lo que genera una alta succión. En contenidos de agua altos, la diferencia entre el potencial del agua capilar y el potencial del agua libre disminuye por lo que la succión también disminuye. Cuando estas dos aguas son iguales la succión es igual a cero. Esto sucede al alcanzar la saturación. (Baltodano, 2006)

La forma de la curva depende directamente de la granulometría y de la estructura del suelo, por lo que variará la forma en que los suelos se desaturan; por ejemplo, el caso de los suelos finos que realizan este proceso de forma gradual, mientras que en los suelos gruesos la pérdida de agua es rápida. La curva se compone de tres zonas: la capilar, la de desaturación y la residual. La zona capilar es aquella en la que el suelo se mantiene en un estado de saturación y termina en el valor de entrada de aire, es decir el valor que debe exceder la succión matricial antes de que el aire entre en los macroporos del suelo (Fredlund (1999), mencionado por Pérez (2008). En la zona de desaturación, el agua es desplazada por el aire, por lo que la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. Al final de esta zona, el agua se encuentra en un estado discontinuo y la permeabilidad se reduce considerablemente. La última zona es la residual, donde un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la que es escasa, ya que no fluye entre los poros y la remoción de ésta solo se da por evaporación (Pérez, 2008), lo cual es difícil de lograr, ya que requiere de gran cantidad de energía. Ver figura 4.

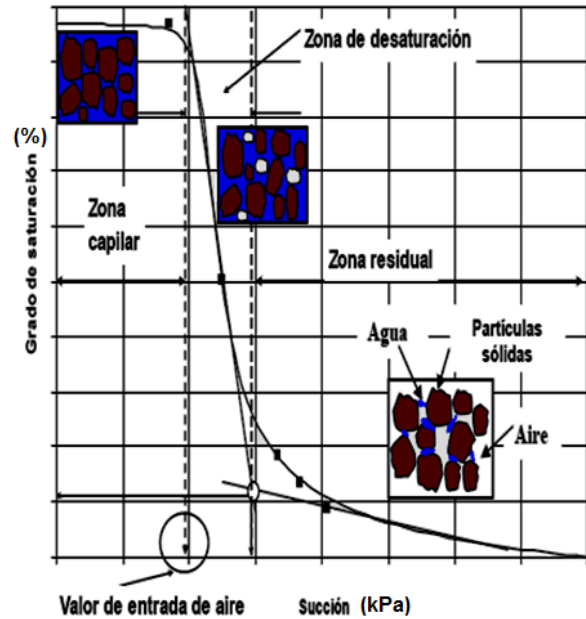


Figura 4. Zonas de una curva característica suelo-agua. (Pérez,2008)

La figura 5 se presentan las diferentes curvas suelo - agua para los distintos tipos de suelos.

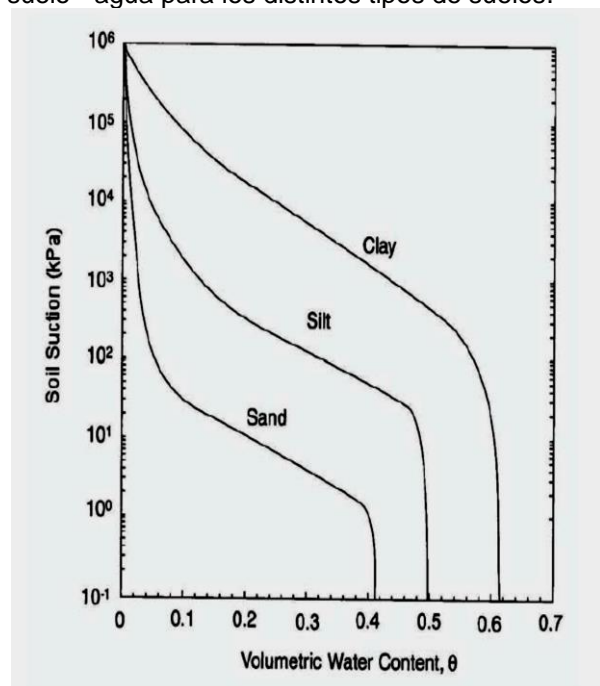


Figura 5. Curvas suelo – agua para diferentes tipos de suelos (Lu y Likos, 2004)

Estado de esfuerzos

Como todo material, el suelo debe contar con una curva de esfuerzo contra deformación, con el fin de verificar si el material, en este caso suelo, es capaz de responder a las solicitaciones impuestas.

Para poder entender el estado de esfuerzos de un suelo no saturado se debe entender la teoría básica de suelos saturados, la cual fue desarrollada por Terzaghi, y es la teoría más usada, debido a que simplifica los cálculos, ya que no toma en cuenta el aporte de la succión. (Barrera, 2002).

Dos aspectos fundamentales y de gran importancia de la formulación de Terzaghi, es que la presión de poro del agua actúa tanto en el agua como en el sólido, y el otro aspecto es que los cambios en el esfuerzo efectivo son los que explican los cambios en el estado del suelo. El esfuerzo efectivo se define como el esfuerzo total menos el esfuerzo de la presión de poro. Este se puede apreciar en la siguiente ecuación:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde σ' es el esfuerzo efectivo, σ es el esfuerzo total y μ es la presión de poro.

Además, la resistencia al corte se puede relacionar con el esfuerzo efectivo normal, a través del criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad \text{Ecuación (3)}$$

Para los suelos no saturados se ha intentado usar la misma ideología, que el esfuerzo efectivo sea el que controle el comportamiento, tanto en la deformación como en la resistencia al corte.

Ha existido una evolución de las formulaciones para encontrar una ecuación que haga que el esfuerzo efectivo sea el que domine el comportamiento del suelo mediante pruebas de laboratorio. Desde los trabajos de Bishop y Donald en 1961, donde proponen que el esfuerzo efectivo sea el esfuerzo total menos la presión de poro más un factor χ que relaciona la succión y las presiones de aire, hasta los trabajos de Fredlung en 1993, donde propone diferentes combinaciones de variables de estados de esfuerzos usando diferentes presiones de

referencia, tanto del aire, del agua y el esfuerzo total.

Estudios de Josa (1988) y de Matyas y Rhadakrishna (1968), respectivamente, proponen las funciones de estado que permiten relacionar los diferentes parámetros que afectan el estado de esfuerzos para un suelo específico. Los segundos proponen una función de estado para suelos saturados que relacionan el esfuerzo efectivo y el índice de poros, pero para el caso de suelos no saturados se deben proponer dos funciones: una para el índice de poros y otra para el grado de saturación (Barrera et al, 2002). Ver figura 6. Al graficar estas funciones, se presentan en un espacio tridimensional las variaciones de la succión ($U_a - U_w$) y de la carga y la respuesta del suelo ante los cambios en estas variables; además permiten relacionar, de forma sencilla, los esfuerzos efectivos con todos los demás parámetros que afectan a los suelos no saturados.

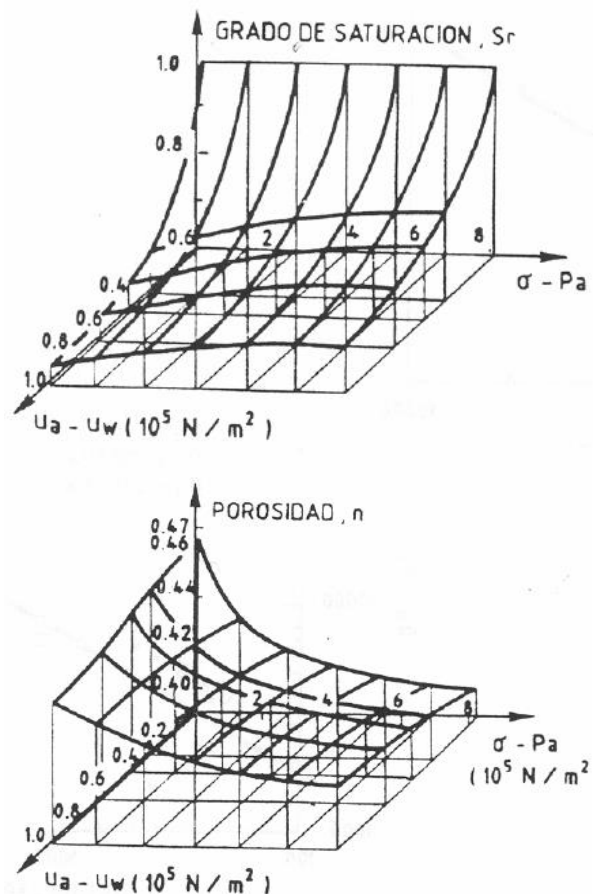


Figura 6. Superficies de estado para la porosidad y el grado de saturación. (Matyas y Rhadakrishna, 1968)

Resistencia

La resistencia al corte del suelo saturado es la resistencia mínima del suelo saturado, la condición más desfavorable del suelo con la saturación completa. Teniendo en cuenta los amplios grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, el conocimiento de la variación de la resistencia asociado a los cambios del contenido de agua conducirá al conocimiento más completo de su comportamiento (Barrera et al, 2002).

Según los trabajos realizados por Fredlund, Morgenstern y Widger (1978) se tiene la siguiente ecuación para la resistencia al corte en suelos no saturados:

$$\tau = c + (\sigma' - \mu_a) \tan \phi + (\mu_a - \mu_w) \tan \phi^b$$

Ecuación (4)

Donde c es la cohesión, ϕ es el ángulo de fricción interna con respecto al esfuerzo efectivo y ϕ^b el ángulo de fricción interna respecto a la succión. Ver figura 7.

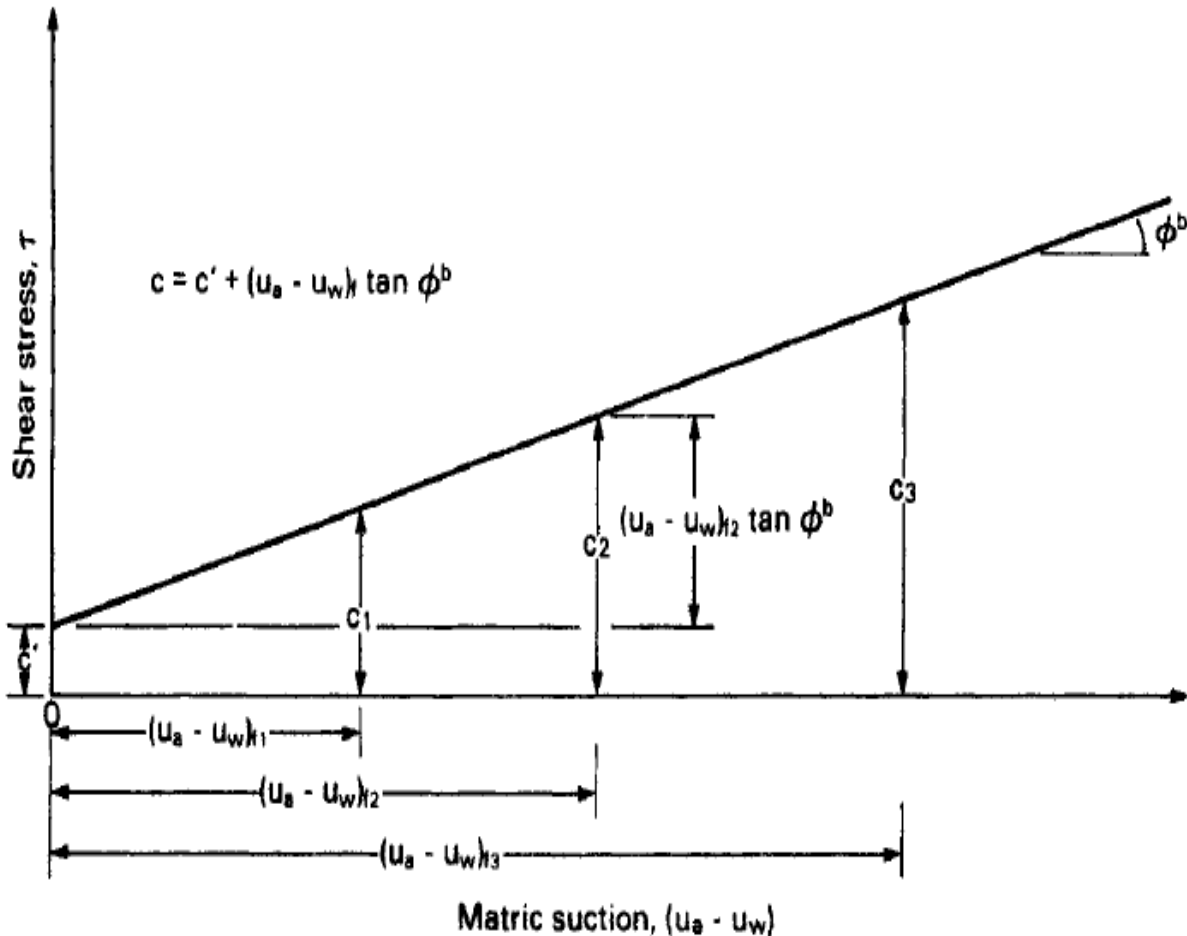


Figura 7. Plano de falla en un suelo no saturado (Fredlund, 1993)

La ecuación ha sido cuestionada por Fredlund (1978) y por Escario y Saez (1986) debido a que puede no ser reproducida con iguales resultados en todos los tipos de suelos, además depende de los rangos de succión utilizados y del mismo tipo de suelo. Esta es una

área que se encuentra todavía en estudio, ya que la misma disciplina es reciente comparada con la de los suelos saturados, por lo que cada aporte es de carácter experimental.

Colapso y expansión

El comportamiento de un suelo no saturado está completamente ligado al grado de saturación con que éste cuente. Los cambios volumétricos que se pueden dar son considerados positivos en caso de colapso y negativos en caso de una expansión.

Colapso

Se considera colapso a la reducción de volumen de forma irrecuperable producido por un aumento en la saturación del suelo, manteniéndose constante el estado de esfuerzo exterior. (Barrera et al, 2002). Este es un fenómeno que ocurre en suelos no saturados. Los requisitos que se deben tener para que ocurra un colapso de un suelo se pueden distinguir claramente: una estructura abierta, la cual sea capaz de reducir su volumen si se da una disminución del volumen de poros, que reaccione violentamente con un cambio de estados de esfuerzos y que los enlaces entre partículas sean débiles en presencia de agua, son los principales causantes de que se presente el colapso. Se pueden generar combinaciones que hagan que una estructura no tan abierta colapse con cargas muy grandes o que se genere un efecto inverso.

Este fenómeno aparece cuando los enlaces, ya sean capilares, por puentes de partículas arcillosas o enlaces por cementación, pierden su solidez en presencia de agua.

En arenas y limos se da la formación entre partículas de enlaces capilares y éstos son suelos sensibles a aumentos de humedad, donde el colapso se da si las fuerzas exteriores son considerables. Al mismo tiempo, estos suelos pueden presentar partículas de arcilla que, con cierto grado de saturación favorecen a la rigidez del suelo, mas al aumentar la saturación colapsan. De igual forma sucede con partículas que sirven como cementantes, ya que si estos son proclives a disolverse o lavarse, de alguna forma se puede dar una pérdida de los enlaces. De todos estos enlaces, los de partículas cementantes es en los que ocurre de forma más lenta la pérdida.

Una vez ocurrido un colapso, la nueva estructura del suelo queda estable, a menos que se vuelva a cambiar el estado de esfuerzos y el grado de saturación.

Expansión

La expansión en un suelo no saturado se genera cuando el suelo se humedece, por lo que sus partículas absorben agua y aumentan de volumen debido a la relajación de los esfuerzos inter granulares, siempre bajo un mismo estado de esfuerzos externos. Este es un fenómeno que generalmente se da en terrenos donde existen arcillas.

El fenómeno mecánico se debe a una disminución de la succión al aumentar la humedad reduciendo la intensidad de las fuerzas de contacto entre las partículas. Si la estructura es potencialmente inestable se producirá un colapso, pero si la estructura es suficientemente compacta se ocasionará una relajación inter granular (Barrera & Garnica, 2002).

La expansión está relacionada directamente con las propiedades de la arcilla. Las cargas eléctricas en este fenómeno tienen un papel determinante debido a que por la polaridad del agua y de las partículas de arcilla, existen fuerzas de absorción. Estas funcionan de manera que se adhieren a la partícula de arcilla y atraen a otras moléculas de agua de forma que se van formando capas. La fuerza de absorción disminuye a medida que va aumentando el número de capas. Esta capa de agua hidrata a la partícula y es la responsable de la expansión. Esta hidratación puede darse también en los cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Al^{+++} y Fe^{+++}) bajo un mecanismo similar.

Además de la hidratación de las partículas de arcilla y de los cationes, está la repulsión osmótica, en la cual, según cita Barrera y Garnica (2002), la concentración en la capa doble difusa puede provocar una absorción de moléculas de agua por ósmosis si se pone en contacto con agua pura o con agua con menor concentración de cationes. La ósmosis es la que produce que las moléculas de agua migren hacia el interior de la doble capa para igualar la concentración de cationes, generando el hinchamiento.

La expansión está determinada principalmente por tres factores: cargas electroestáticas netas, características propias de las partículas, como forma, tamaño, estructura, densidad, entre otras, y la capacidad de intercambio catiónico. Se asocia a las partículas de arcilla la capacidad de expansión de un suelo. Se conocen tres minerales de arcilla básicos, los cuales son: esmectita, illita y caolinita. Dependiendo de cual partícula abunde más en el suelo puede tener mayor o menor potencial para la expansión, siendo la esmectita la partícula con mayor capacidad de expansión y presente en la mayoría de los suelos que presentan este fenómeno.

Estas partículas provienen tanto de rocas ígneas como de sedimentarias. La gran diferencia entre las partículas, aunque pueden provenir de una misma roca, es el medio en el que se desarrollan. Un medio más alcalino generará una montmorillonita. Según Barrera y Garnica (2002), que cita a Josa (1988), la montmorillonita se genera habitualmente en zonas áridas con poco drenaje y, en consecuencia, con alta concentración de cationes y minerales, mientras que la caolinita se produce en zonas más drenadas y con menores concentraciones, en áreas de pH más bajos. La illita se forma en zonas de pH ligeramente alcalino.

	partículas influyen en la expansión, ya que según ésta, sea panaloide, floculenta, dispersa u otra, va a incidir en que el potencial de expansión sea mayor.
Tiempo	Dependiendo de la permeabilidad del suelo y de las características del sitio, las deformaciones volumétricas pueden durar inclusive hasta años.
Fluidos intersticiales	La influencia del agua intersticial y el comportamiento del agua con las partículas de arcilla son componente importante en la expansión de un suelo.
Humedad	A menor humedad mayor es el potencial de expansión, por cuanto el suelo es capaz de absorber mayor cantidad de agua

CUADRO 6. FACTORES QUE GENERAN LA EXPANSIÓN (BARRERA & GARNICA, 2002)	
Tipo de minerales y cantidad	Según el tipo de partículas de arcilla que contenga y la cantidad de éstas en relación con las demás partículas del suelo, mayor puede ser la expansión.
Densidad Seca	A mayor densidad seca de un suelo mayor potencial de expansión.
Estado de esfuerzo	A mayor esfuerzo menor expansión; más bien puede desencadenar un colapso.
Estructura del suelo	La estructura del suelo y el acomodo de sus

Taludes

Un talud es la inclinación del terreno. Esta inclinación puede ser natural o artificial. En el trazo de una carretera a través de zonas montañosas es necesario realizar cortes y rellenos, por consiguiente se conforman taludes. Las partes de un talud artificial son: pie, cabecera y bermas, además de los componentes que forman parte del sistema de drenaje, como contra cunetas, drenes horizontales y verticales. Ver figura 8.

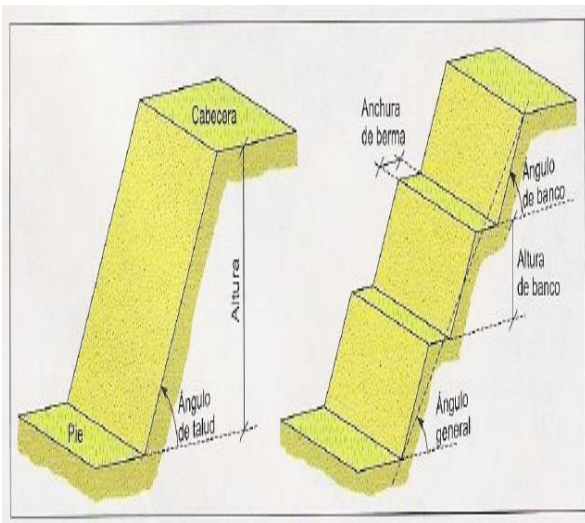


Figura 8. Partes de un talud artificial (Ref. Ramírez, 2007)

Tipos de taludes

Existen diferentes tipos de taludes. Cada uno de ellos tiene características distintas entre sí. Se tiene el talud natural, el cual no ha sido afectado por la mano del hombre, es decir, su densidad, geometría, materiales no han sido modificados. En él se pueden identificar tres partes principales: la superior o somital, que es convexa, y se caracteriza por la pérdida de sólidos o fluidos; la media o central, que es rectilínea o lineal, y en ella predomina la transferencia de sólidos o fluidos; y la basal o distal, que es cóncava, y en ella se deposita el material coluvial y llegan los iones transportados por el agua. La forma dependerá de la zona climática, lo que condiciona el mayor desarrollo de unas partes o de otras. (Porta Casanellas et al, 2005). Otros autores como Baltodano (2009) propone la siguiente

composición: plataforma superior, escarpe superior, cara, pendiente dominante y pie de ladera. En la figura 9 se muestra un talud natural.

Laderas

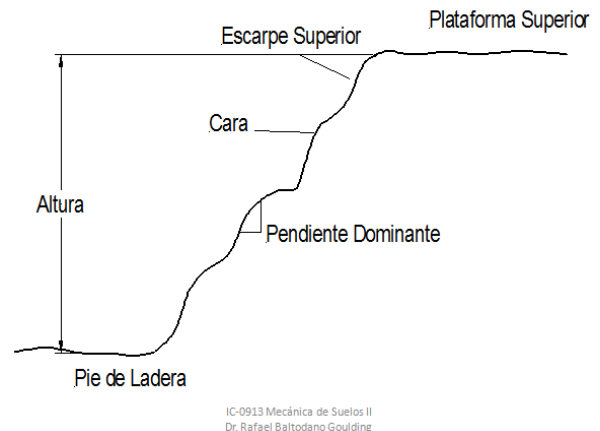


Figura 9. Elementos de una ladera (Ref. Baltodano, 2009)

Los taludes de corte son aquellos en los que el ser humano ha modificado su geometría mediante la utilización de equipos mecánicos, los cuales realizan cortes en el terreno, buscando la estabilidad del mismo, tal como se aprecia en la figura 10.



Figura 10. Talud de corte (Ref. Internet 1)

Los taludes de relleno son aquellos en los que el ser humano puede controlar de forma estricta la densidad, el material y la geometría, basándose en los fundamentos de la geotecnia y en los estándares internacionales para cada uno de los componentes, para hacer una estructura estable y, por ende, segura. En la figura 11 se parecía un talud en construcción.



Figura 11. Talud de relleno (Ref. Internet 2)

Estudios geotécnicos

Al iniciar un proyecto en un talud, se deben realizar estudios previos con el fin de obtener toda la información necesaria para realizar los análisis de estabilidad correspondientes, de manera que se pueda obtener el diseño del talud o las medidas necesarias para asegurar la estabilización.

Entre los estudios que se deben realizar se encuentran los que tienen que ver con el dimensionamiento y geometría del talud. Las dimensiones principales que se buscan son la profundidad y la longitud. Estas medidas son necesarias ya que para realizar el correcto análisis se debe modelar el terreno con sus dimensiones.

La posición del nivel freático y las condiciones hidrogeológicas son importantes conocerlas debido a que inciden directamente en la resistencia del suelo, lo cual compromete la estabilidad del talud.

De igual manera, se debe conocer la litología y la estructura geológica y conocer las sollicitaciones para las cuales el talud va a estar sometido. Para ello, se deben tomar muestras de suelo con el fin de obtener en el laboratorio la caracterización del suelo y los parámetros de resistencia, para realizar el análisis de estabilidad y brindar las adecuadas soluciones para la estabilización.

Estabilidad de un talud

La estabilidad de un talud es una condición que, dependiendo de ciertos factores, puede verse en riesgo. Debido a su naturaleza, un talud puede estar condicionado por factores geológicos, tales como la litología y la estratigrafía, al ser el suelo un conjunto de estratos en los que cada uno de ellos presenta características y comportamientos diferentes ante las cargas impuestas. Complementando este factor, las discontinuidades y estructuras geológicas combinadas con la geometría del talud, condicionan su estabilidad, ya que pueden existir planos de debilidad, los cuales requieren un tratamiento particular, de forma que no se comprometa la estabilidad del talud.

Adicionalmente, el agua modifica e influye en la resistencia de forma negativa, ya que disminuye la capacidad y aumenta el peso de la masa de suelo. Además, ejerce una presión sobre las grietas de tracción, que pueden desencadenar deslizamientos. La presencia de agua en el talud causa erosión, tanto en la cara exterior de la masa de suelo, como en la parte interna debido a la infiltración, lo cual acelera los procesos de meteorización. Esto constituye un cambio en la composición de los materiales, que puede comprometer la estabilidad del talud. (Ramírez, 2007)

Estos factores pueden considerarse como pasivos, ya que pueden estar presentes mas no son causantes de la inestabilidad; requieren de otros factores para que sus efectos se hagan presentes.

Los factores que afectan de manera directa la estabilidad del suelo son conocidos como factores desencadenantes. La sola presencia de estos pueden generar la falla del talud. (Ramírez, 2007). Ver cuadro 7.

CUADRO 7. FACTORES DESENCADENANTES DE INESTABILIDAD EN TALUDES (RAMIREZ, 2007)	
Sobrecargas Estáticas	Son todos aquellos pesos de edificios, rellenos y vehículos. que inciden en un aumento en el peso de la cabecera del talud.
Cargas Dinámicas	Movimientos sísmicos, naturales o inducidos y vibraciones producto de voladuras cercanas
Cambios en las condiciones hidrogeológicas	Un aumento en las precipitaciones causa un aumento en la cantidad de agua en el suelo, provocando un aumento en la saturación, lo que hace disminuir la resistencia.
Variaciones en la geometría	Si se realizan modificaciones, como disminución de peso en el pie del talud, o un aumento en la cabecera, generaría la falla del talud.
Reducción de parámetros resistentes	La meteorización disminuye las propiedades de resistencia.

Métodos de análisis

El fin principal del análisis de estabilidad es determinar el factor de seguridad con el que cuenta el talud, y a partir de éste, tomar las medidas necesarias para incrementar ese parámetro, en caso de que no cumpla con lo especificado. El factor de seguridad mínimo usualmente para taludes permanentes es de 1,5 y puede llegar a 2 dependiendo de la seguridad exigida.

Existen diferentes métodos para analizar la estabilidad en suelos; los siguientes son los

métodos frecuentemente usados para realizar dichas estimaciones:

- a) Talud infinito: Se basa en la hipótesis de que la longitud de una rotura plana superficial paralela al talud se puede considerar infinita con respecto al espesor deslizado (Ramírez, 2007)
- b) Método de las cuñas: La superficie de falla poligonal se divide en áreas geométricamente conocidas y se calculan los factores de seguridad. El método se explica gráficamente en la figura 12.

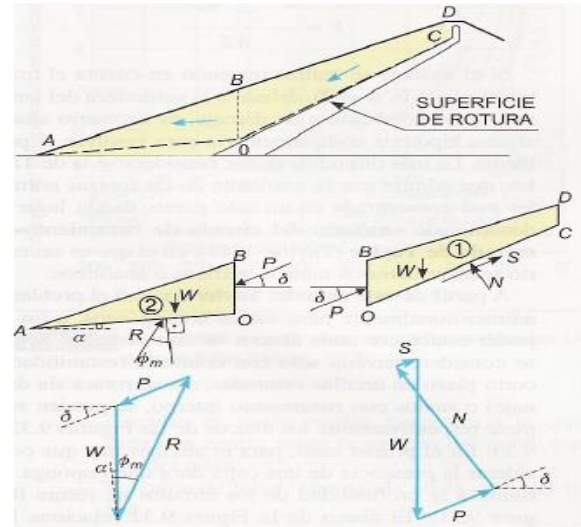


Figura 12. Método de las cuñas (Ref. Ramírez, 2007)

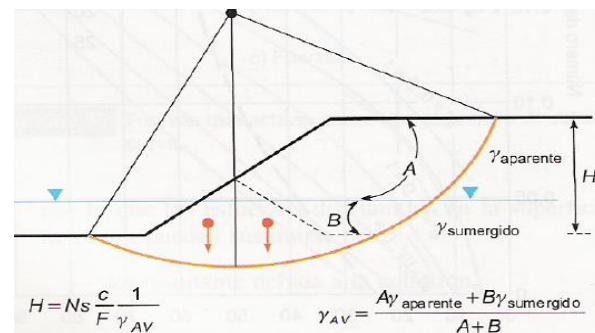


Figura 13. Círculo de falla en el análisis de un talud (Ref. Ramírez, 2007)

- c) Ábacos de Hoek y Bray: Permiten el cálculo del factor de seguridad de taludes en suelos con rotura circular por el pie del talud, de forma rápida y sencilla, a partir de los datos geométricos del talud y de los parámetros resistentes del suelo. Ver figura 13. Para ello se realizan ciertas

suposiciones, entre ellas que el material es homogéneo, se considera la existencia de una grieta de tracción y la tensión normal se concentra en un solo punto de la superficie de rotura. (Ramírez, 2007)

- d) Método ordinario o de Fellenius: Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface el equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales, sin embargo, es un método muy utilizado por su simple procedimiento. Es muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Brinda factores de seguridad bajos y se aplica para las superficies de falla circulares. (Poblete, 2006). Ver figura 14.
- e) Método de Janbú Simplificado: Satisface el equilibrio de fuerzas mas no el de momentos. El método asume que las fuerzas interdovelas son horizontales. Los factores de seguridad que brinda son poco conservadores. Aplica para cualquier forma de superficie de falla. (Poblete, 2006)

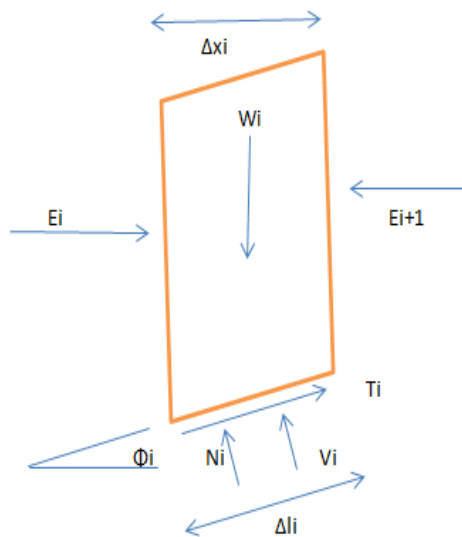


Figura 14. Diagrama de fuerzas en el método Janbú Simplificado. (Poblete, 2006)

- f) Método Morgenstern – Price: Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método tiene la particularidad de que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se

asume que varía de acuerdo con una función arbitraria. (Poblete, 2006)

- g) Método de Bishop: En este método se realizan una serie de suposiciones, entre ellas que se da una superficie de rotura circular. Posteriormente, la masa deslizada se divide en “n” rebanadas y se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo, de la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen fuerzas de contacto que no influyen por estar equilibradas. De esta manera, se obtiene la expresión para el factor de seguridad de la superficie considerada. (Ramírez, 2007). En la figura 15 se aprecia un cálculo de estabilidad usando diferentes superficies de falla.

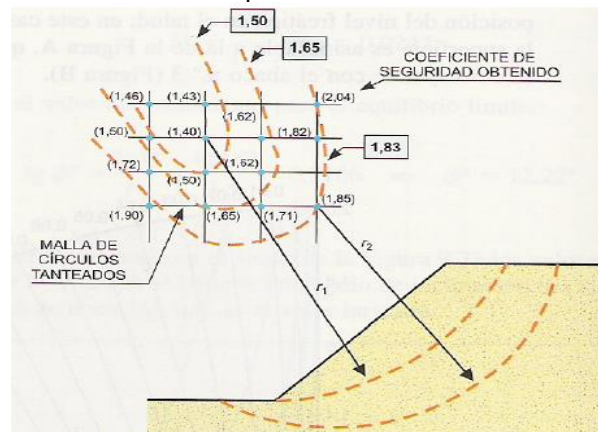


Figura 15. Superficies de falla para los diferentes cálculos de estabilidad (Ref. Ramírez, 2007)

Métodos de estabilización

Una vez obtenido el análisis de estabilidad por alguno de los métodos descritos en la sección anterior, se deben de tomar las medidas necesarias para que el talud quede estable en caso de presentar inestabilidad. Las medidas comprenden desde la modificación de la geometría, condiciones de drenaje, entre otras que se detallan a continuación:

Modificación geométrica

Cuando se requiere dar estabilidad a un talud, una de las opciones que se toman en cuenta es la realización de cortes en el terreno. Estos cortes buscan la disminución del peso en la cabecera, una mejor conformación de la pared del talud, la disminución de la pendiente de la misma y la división del talud en partes mediante el uso de bermas.

Estos cambios en la geometría del talud se elaboran con maquinaria pesada y son una opción válida cuando las condiciones geométricas del talud son las que impiden la estabilización del mismo. Por lo general esta es una medida que se complementa con otras, con el fin de dar un mejor funcionamiento, entre las cuales se pueden mencionar: creación o mejoramiento de drenajes, recubrimiento de la pared del talud con concreto lanzado, uso de geotextiles, entre otros.



Figura 16. Modificación geométrica del talud. (Ref. Internet 3)

Anclajes

Una de las técnicas frecuentemente utilizadas en la estabilización de taludes es el método de los anclajes. Este método consiste en la introducción en el suelo de elementos metálicos, los cuales van a aumentar la resistencia al corte.

Los anclajes activos serán aquellos a los que se les aplicará tensión hasta llegar a su carga admisible. Los anclajes pasivos son aquellos que no se tensan, sino que simplemente se dejan en el suelo y funcionarán cuando se produzca una deformación del suelo.

Los anclajes se componen de tres partes: la zona de anclaje, la parte solidaria del terreno encargada de transferir los esfuerzos al suelo; una zona libre, donde el tirante puede alargarse bajo efecto de la tracción; y la cabeza de anclaje, la cual constituye la zona de unión entre la armadura y la placa de apoyo. (Ucar, 2005). Ver figura 17.

Según Ucar (2005) existe una clasificación de los anclajes según el tiempo en el que vayan a funcionar. El autor los clasifica en provisionales y permanentes. Los primeros tienen la función de auxiliar y proporcionan las condiciones de estabilidad a la estructura durante el tiempo necesario para disponer otros elementos resistentes que los sustituyan. Se considera la vida útil de estos elementos en un periodo no mayor a 18 meses. Los anclajes permanentes son aquellos que se instalan de forma definitiva. La diferencia entre estos anclajes y los provisionales son los coeficientes de seguridad, que en los de carácter definitivo son mayores y están protegidos de los efectos de la corrosión.

Para realizar el diseño, se debe determinar la longitud del anclaje y el aporte a la resistencia que debe tener el anclaje. Con estos criterios se utiliza la siguiente metodología descrita por Ucar (2005) para el diseño de los anclajes.

La carga admisible de una armadura es igual al producto de la sección de acero por su límite elástico, multiplicado por un coeficiente de seguridad (0,6 para anclajes permanentes y 0,75 para anclajes provisionales). Al utilizar anclajes permanentes la carga o tracción máxima admisible corresponde a:

$$T_a \leq 0,6T_g \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

T_g: es la carga que representa el límite elástico considerando el 0,1% de la deformación en el diagrama de esfuerzos para barras o cables de alta resistencia y 0,2% para aceros normales.

En resumen y en forma aproximada: se considera que T_g es aproximadamente un 85%

de la carga última (Ucar, 2005). Durante la fase de tensado, es importante llevar a cabo la tracción de prueba T_p , la cual está limitada por la tracción admisible y por la tracción correspondiente al límite elástico.

La tracción de prueba se mantiene durante cierta cantidad de tiempo. Al fijar la armadura a la estructura se produce un desplazamiento de la misma y la correspondiente pérdida de tensión, además de las producidas por el sistema de anclaje a gato y penetración de cuñas (aproximadamente un 3% de la carga), hasta llegar a la tensión real al final del bloqueo T_b , debido a que la tracción en el tirante decrece con el tiempo por pérdidas por relajación del acero y a deformaciones que sufre el terreno:

$$T_b = T_a + \text{pérdidas de tensión} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Las pérdidas iniciales por la puesta de tensión en el sistema de anclaje a través del gato, penetración de cuñas y rozamiento en la entubación, es de 6 mm, y las pérdidas diferidas a través del tiempo, por relajación del acero y deformaciones del suelo, han sido estimadas en un 8% de la carga de diseño. (Ucar, 2005)

Para realizar el cálculo de la deformación ΔL , considerando el tiempo de vida del anclaje, se utiliza la siguiente formulación:

$$(\Delta L) = 1,08 \times \left(\frac{T_a \times L}{AE} \right) + 6mm \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde T_a es tensión activa, L es la longitud de viga, A el área y E el módulo de elasticidad.

El proceso constructivo de los anclajes consiste en la perforación de un barreno con o sin revestimiento de un diámetro que oscila entre 75 y 150 mm. Una vez realizada dicha perforación se produce la extracción de las barras de perforación y se introduce el anclaje. Posteriormente se hace una lechada de cemento en toda la longitud del elemento tensor. Luego de una semana, se realiza una verificación del anclaje y, finalmente, si es un anclaje activo, se realiza la tensión deseada. (Ucar, 2005)

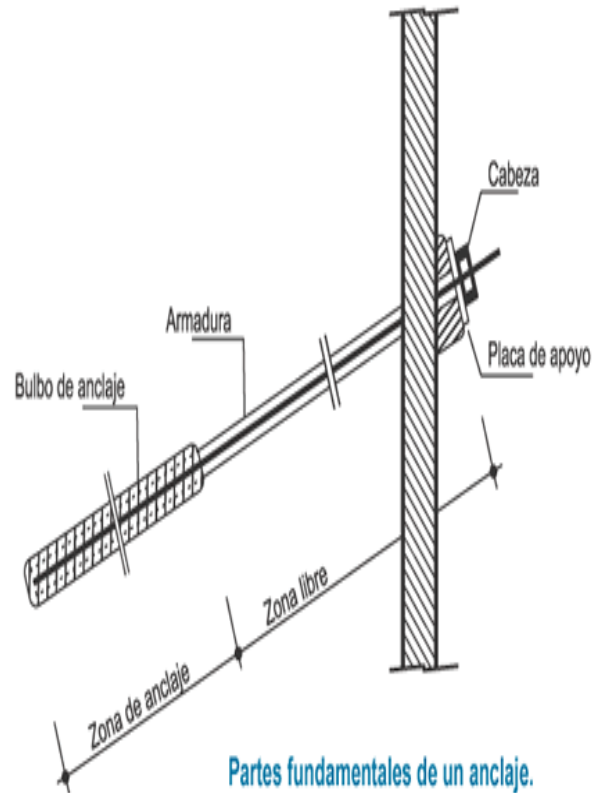


Figura 17. Partes de un anclaje. (Ref. Internet 4)

Muros de contención

Los muros de contención son estructuras destinadas a sostener masas de tierra cuando las diferentes condiciones, ya sean geológicas, hidrológicas, entre otras, no permitan que se asuman los cambios de elevación. Existen diferentes tipos de muros de contención, los cuales varían de acuerdo con su comportamiento a la hora de resistir las cargas impuestas. Dependiendo de las condiciones de sitio que se tengan, los materiales disponibles, el equipo y el presupuesto, se debe elegir el tipo de muro de contención que mejor se adecúe a las necesidades.

La clasificación de los muros de contención, y sus principales características acerca de su funcionamiento, se detallan en el cuadro 8.

CUADRO 8. PRINCIPALES TIPOS DE MUROS DE CONTENCIÓN (RAMÍREZ, 2007) Y (BRAJA, 2001)	
Muros de Gravedad	Son aquellos que con su propio peso resisten las cargas. Debido al gran peso de éstas se contrarresta el empuje del terreno, reduciendo los esfuerzos flectores, esta condición permite no tener que reforzar estas estructuras con acero. Algunos ejemplos de este tipo de muros son: los de concreto masivo, gaviones, prefabricados, entre otros.
Muros Estructurales	Muros de concreto reforzado. Su funcionamiento en voladizo y el empuje del suelo generan esfuerzos de flexión lo que obliga a reforzar la estructura con acero. Además presentan un puntal, que evita el deslizamiento del muro, y un talón sobre el cual se apoya parte del terreno, de manera que el suelo y el muro trabajen complementándose entre sí.
Muros de tierra armada y de suelo reforzado	Un muro de tierra armada es aquel en donde se realizan capas de material compactado y se introducen armaduras metálicas con el fin de resistir los esfuerzos de tensión. En lugar de las armaduras metálicas se pueden utilizar geotextiles, lo que disminuirá la resistencia, mas es

una opción económica. Estos muros se pueden recubrir con losetas de concreto o con geotextil, el cual va a servir para estimular la vegetación del talud.

Para realizar el cálculo de cualquiera de dichos muros, se deben tener en cuenta las fuerzas que actúan en la estructura. En la figura 18 se aprecian las diferentes cargas.

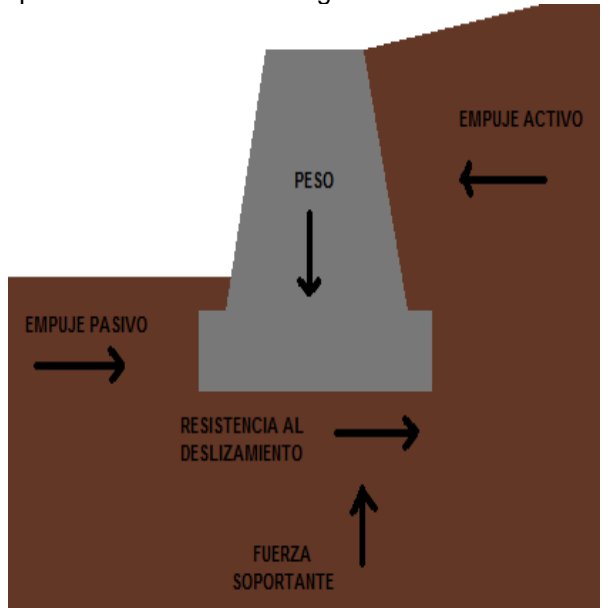


Figura 18. Diagrama de fuerzas en un muro

Una vez conocido el diagrama de fuerzas en la posible estructura, se deben realizar las correspondientes revisiones de los posibles escenarios:

- a) Deslizamiento: se verifica que la componente horizontal del suelo, que realiza el empuje activo, no supere la suma del empuje pasivo y la fricción que se opone al deslizamiento. El factor de seguridad contra el deslizamiento debe ser mayor a 1.5

$$\frac{F_{resistente}}{F_{horizontal}} > 1,5 \quad \text{Ecuación (8)}$$

- b) Vuelco: se verifica que el momento producido por las fuerzas que tienden a volcar el muro no superen a las que tienden a estabilizar el muro. El factor de

seguridad para esta condición debe ser mayor o igual a 1,5.

$$\frac{Mestabilizante}{Mvolcamiento} > 1,5 \quad \text{Ecuación (9)}$$

- c) Capacidad Soportante: Se verifica que el peso de la estructura y del suelo encima de la misma no sobrepasen la capacidad soportante del suelo. Para ello, el factor de seguridad mínimo debe ser de 3.

$$\frac{Capacidad\ soportante}{Peso\ de\ la\ estructura} > 3 \quad \text{Ecuación (10)}$$

- d) Estabilidad global: Se verifica que globalmente la estructura pueda contener una masa de suelo con cierta pendiente con un factor de seguridad de 1,5.
- e) Asentamientos: El Código de Cimentaciones de Costa Rica recomienda el uso de muros flexibles, pero en caso contrario se debe realizar el cálculo de las deformaciones, con el fin de asegurar que las estructuras rígidas no sufran daños. (CCCR, 2003).

Otras alternativas

Además de los métodos convencionales de estabilidad de taludes, se encuentran métodos alternativos los cuales buscan, mediante la utilización de metodologías novedosas, la estabilidad de las masas de suelo.

Dentro de estas nuevas alternativas se encuentra el uso del zacate vetiver. Ver figura 19. Este tipo de vegetación es oriunda de la India, pertenece a la familia gramínea y tiene la particularidad de que sus raíces alcanzan cuatro metros de longitud de forma vertical, lo cual emula a los anclajes. (Banco Mundial, 1990).

Según el Banco Mundial (1990), entre las ventajas del uso del vetiver se encuentran:

- 1) Forma un cerco espeso y permanente.
- 2) Requiere un mantenimiento mínimo y es perenne.
- 3) Es una planta prácticamente estéril, por lo que no se convierte en maleza.
- 4) Su corona se halla bajo la superficie, por lo que la protege del fuego y del exceso de pastoreo.
- 5) Sus hojas son afiladas y sus raíces aromáticas, lo que hace que se repelan

las plagas como roedores, serpientes, entre otras.

- 6) Crece en cualquier tipo de suelo.
- 7) Es fácil de eliminar en caso de que se requiera.
- 8) No genera competencia con otro tipo de plantas.
- 9) Crece en amplia variedad de climas.



Figura 19. Refuerzo de un talud carretero con vetiver. (Ref. Internet # 5)

Además de esta opción, también se encuentra el uso de cualquier otro tipo de vegetación, realizando una modificación en la forma de sembrar las plantas, en la distribución de las mismas. Además de usar materiales vivos en la estabilización, hay soluciones amigas con el ambiente en las que se utilizan ramas de manera que se forman bloques de madera con estructuras en concreto. Esta solución es para condiciones particulares en donde se pueda aplicar este concepto innovador y ecológico, el cual requiere de ciertas condiciones para poder desarrollar todo su potencial.

Instrumentación

Es importante instrumentar un talud, debido a que se puede establecer un seguimiento de los factores que controlan la estabilidad. El monitoreo promueve la toma a tiempo de decisiones con el fin de evitar o reducir el impacto de

deslizamientos, tanto en el ámbito económico como el social.

Existen diferentes maneras de llevar a cabo este control, entre ellas se encuentra el control topográfico, además del uso de extensómetros y de inclinómetros, con el fin de detectar el

movimiento horizontal del suelo. A estas técnicas e instrumentos se puede añadir el uso de GPS diferencial, reflectometría, piezómetros, entre otros, tal como se muestra en la figura 20.

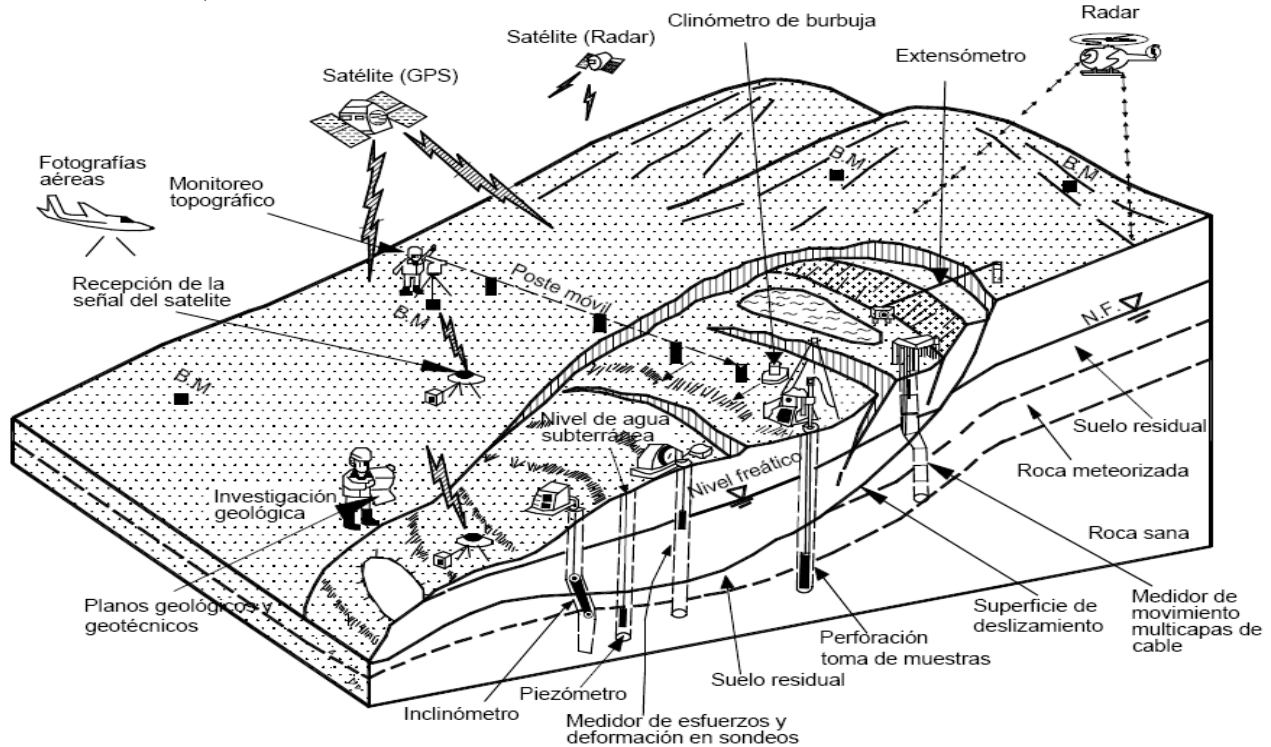


Figura 20. Esquema del monitoreo de un talud (Suarez, 2009).

A continuación se detalla el uso de inclinómetros, tensiómetros y el pluviómetro, que son los instrumentos instalados en el talud en estudio.

Inclinómetros

Un inclinómetro mide el cambio de inclinación de un tubo que se coloca en una perforación dentro del talud y de esta manera se calcula la distribución de los movimientos laterales. De esta manera se puede determinar la profundidad de la superficie de falla y la dirección de los desplazamientos. Un sistema de inclinómetro consiste en un tubo guía de plástico instalado dentro de la perforación; este tiene unas guías longitudinales para orientar la unidad sensora, un sensor portátil montado sobre un sistema de ruedas, un cable de control que baja y sube el

sensor y un equipo de lectura en la superficie que recibe las señales eléctricas y presenta las lecturas (Suarez, 2009). Ver figura 21.

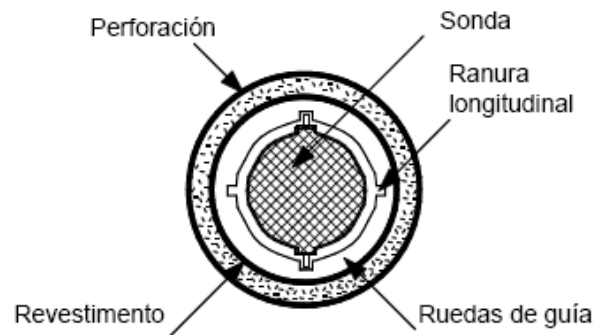


Figura 21. Esquema del tubo colocado en sitio (Suarez, 2009)

El funcionamiento del inclinómetro consiste en que el sensor baja por el tubo guía, usando unas ruedas adheridas al sensor, el cual se baja haciendo uso de un cable graduado, de manera que se tiene una noción de la profundidad a la cual se toma la medida. Este dispositivo emite unas señales eléctricas que viajan a través del cable y llegan hasta el equipo de lectura donde se transforman dichas señales en deformación. Ver figura 22.

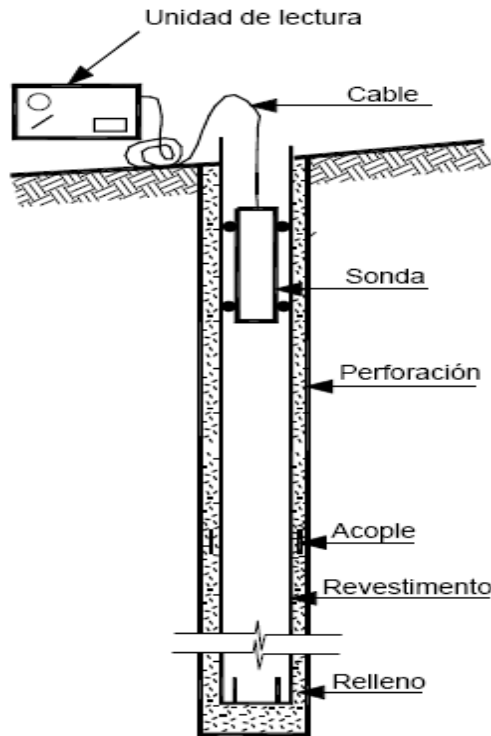


Figura 22. Esquema de un inclinómetro colocado en sitio (Suarez, 2009)

Según Suarez (2009), los inclinómetros son los instrumentos más útiles en el análisis de deslizamientos ya que permiten determinar la profundidad de los movimientos del deslizamiento, la localización y forma de la superficie de falla, el espesor de la zona de corte, la cantidad de desplazamiento con una precisión aceptable, así como la velocidad de deslizamiento y la dirección de este.

A la hora del análisis de los datos obtenidos de las lecturas del inclinómetro, se deben de tener en cuenta ciertos detalles, entre ellos los errores más frecuentes, como los de escala exagerada, los errores de sesgo debido a la vida útil del equipo, error de rotación, el cual se

da cuando existe una rotación en el tubo guía hacia el plano inclinado, y el error de posicionamiento de la profundidad, el cual se origina por la colocación del sensor a diferentes niveles de profundidad de la medición inicial. Este error puede ser causado por compresión o asentamiento del tubo, cambio del cable o por error humano, y es muy difícil de corregir. (Suarez, 2009)

Tensiómetros

Un tensiómetro es un instrumento que indica la tensión con que el agua está adherida a las partículas del suelo. (Goyal et al, 2007). Los componentes principales del tensiómetro son: cerámica porosa, tubo plástico, tanque de reserva, vacuómetro o indicador de succión. Ver figura 23.

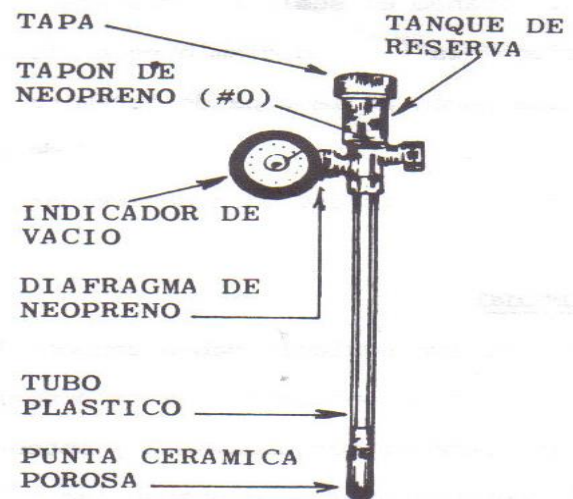


Figura 23. Esquema de un tensiómetro (Goyal, 2007)

El funcionamiento del tensiómetro radica principalmente en una de sus partes, la punta de cerámica porosa. Esta va a servir como el escenario para el intercambio de fluidos entre el tensiómetro y el suelo. A medida que el suelo pierde humedad, absorbe más agua del tensiómetro por lo que genera una succión. Esta succión es medida por el vacuómetro. Esta medida de succión tiene ciertas particularidades, ya que depende de varios factores, entre ellos: a) aspecto climático, influye en la velocidad de pérdida de humedad del suelo; b) tipo de suelo, varía entre ellos la capacidad de absorción y

retención del agua; y c) el contenido de agua, ya que si el suelo se encuentra saturado o inundado, necesitará de más días para tomar lecturas (Goyal et al, 2007).

Entre las limitaciones con que cuenta el equipo están el rango de operación, el cual es de 80 Kpa, además de que depende de las propiedades del agua con la que se llena y que para lecturas menores a 10 Kpa se debe tomar en cuenta que, debido a problemas asociados con la construcción del indicador de vacío, la posición de cero del puntero no representa cero verdaderamente, por lo tanto la posición de cero representa una lectura de 2 Kpa. (Goyal et al, 2007).

Pluviómetros

Un pluviómetro es un instrumento que se emplea para la medición de la precipitación. Este consiste en un recipiente que se encarga de la recolección de la lluvia. En la parte superior de éste debe existir un embudo el cual se encarga de conducir las aguas al recipiente y evitar que se pierda precipitación por evaporación. Es importante destacar que el recipiente que contiene el agua debe de tener paredes rectas. Para la toma de medidas existen dos formas: una leyendo directamente del recipiente que previamente se ha graduado utilizando una regla graduada. Se debe de recordar que un 1mm medido en el pluviómetro corresponde a un litro por metro cuadrado.

Metodología

Este proyecto de investigación, que evalúa la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión en la estabilidad de taludes, se dividió en etapas, de manera que se da una evolución lógica en la que primero se selecciona el sitio de estudio para el posterior registro de precipitación. Obtenida ésta, se convierte en humedad en el suelo, la cual va a afectar los parámetros de resistencia, tales como el peso específico total y el esfuerzo de succión, lo que va a tener repercusiones en el factor de seguridad, y si el análisis de estabilidad es realizado utilizando probabilidades, se obtiene una probabilidad de falla asociada a un índice de confiabilidad.

Selección del sitio

Para poder realizar el proyecto se debe seleccionar el terreno. Este debe cumplir con ciertos aspectos básicos, de tal forma que el proyecto de investigación pueda ser realizable.

El proceso de selección comienza con el levantamiento de los requisitos del terreno, los cuales son:

- 1) Debe poseer un talud.
- 2) De preferencia no debe estar estabilizado mediante alguno de los métodos conocidos de estabilización.
- 3) El talud debe ser de suelo.
- 4) Debe ser cercano al Valle Central, de forma que se puedan realizar mediciones periódicas.
- 5) El dueño debe aprobar la realización de perforaciones en el terreno, toma de muestras de laboratorio y demás pruebas que sean consideradas pertinentes.
- 6) De preferencia debe estar localizado en una zona lluviosa.

Posterior a la realización de dicha lista, se emprendió una búsqueda de terrenos que coincidan con las características descritas anteriormente. Esta búsqueda se realizó por las

zonas del Valle de Orosí y en las laderas colindantes con la carretera hacia el Volcán Irazú en la provincia de Cartago. También se buscaron taludes en la provincia de Heredia, específicamente en San Pablo de Heredia, en una urbanización que por su topografía presentaba un talud colindante con un río. Finalmente en la provincia de San José, donde se revisaron las condiciones de unos taludes ubicados en Alajuelita y en la carretera hacia Puriscal.

El terreno seleccionado finalmente se localiza en la zona de Coronado, específicamente en Las Nubes. Dicha propiedad es de la familia Osorio, quienes requieren realizar un estudio de análisis de estabilidad debido a que estudian la posibilidad de construir una casa de habitación en dicha locación.

El terreno es de topografía quebrada y presenta un talud de 28 metros de altura y una pendiente de 27 grados. Este talud es de carácter natural, ya que no ha sido alterado por el hombre y se encuentre cubierto de vegetación. Además, la zona en la que se encuentra ubicado el terreno, es lluviosa, en la que la precipitación promedio alcanza 2669,6 mm de lluvia por año, siendo el mes de octubre el más lluvioso y la zona de Las Nubes, la de mayor precipitación durante ese mes, con un promedio de 398 mm de lluvia. Los datos son tomados de la estación meteorológica ubicada en Rancho Redondo publicados en la página de internet de la Municipalidad de Coronado.



Figura 24. Fotografía del terreno seleccionado en las Nubes de Coronado. (Fuente: Arq. Fausto Calderón)

Modelo geotécnico

Para la realización del modelo geotécnico se debe caracterizar el suelo, además de obtener la estratigrafía y la geometría del talud. Estos requerimientos se logran satisfacer mediante pruebas de laboratorio, perforaciones SPT para la exploración del suelo en la profundidad y mediciones topográficas para el dimensionamiento del talud. A continuación se presentan las pruebas de laboratorio necesarias para la caracterización del suelo.

Caracterización del suelo

Parte del proyecto de investigación requiere la realización de pruebas de laboratorio, en las cuales se van a medir la capacidad del suelo de tomar las cargas y resistirlas adecuadamente, como los ensayos destinados a la identificación del mismo suelo. Las pruebas realizadas se clasifican basadas en estas dos actividades.

Muestreo en el campo

Para realizar las pruebas de laboratorio se debe seleccionar una sección del talud y efectuar un muestreo. El propósito de este muestreo es obtener una muestra representativa de la cual se puedan realizar las diferentes pruebas de suelos.

Cabe destacar que, debido a que el terreno se encuentra aún con su capa vegetal, la muestra no se pudo obtener de forma superficial, por lo que se quitó la capa vegetal de la superficie, y a partir de este punto se realizó una excavación de aproximadamente un metro de profundidad y 80 cm de diámetro. Esto para que el suelo no se viera afectado por materia orgánica y que no haya sido modificado recientemente con algún material de relleno, que se apreciaba en la entrada a la propiedad. La toma de suelo se realizó de forma manual y la cantidad extraída fue aproximadamente 50 kilogramos.

Preparación del suelo

Antes de efectuar los respectivos ensayos de caracterización, se preparó de forma adecuada el suelo. Debido a que este cuenta con humedad natural se secó al aire. Este procedimiento se efectuó siempre, ya que es la única forma de tener en completo control la cantidad de agua presente en el suelo. La forma correcta de cumplir con el objetivo del mismo, fue esparcir las muestras de suelo obtenidas sobre una lona y dejar el material secando en algún lugar donde el viento y el sol puedan ejercer su efecto. Para asegurarse el secado total se revolvió el suelo de forma periódica.

En caso de que el suelo no pueda secarse por completo, se colocó reflectores, los cuales realizan la misma función. Cabe destacar que este procedimiento se aplicó únicamente cuando hace falta poca cantidad por secar o el clima impide la realización de dicho secado al aire.

Muestreo en el laboratorio

Terminado el secado del suelo se preparó las muestras para los distintos ensayos por realizar. Dadas las características que presenta el suelo obtenido del campo, se realizó una separación del material con la malla # 4. Terminado el tamizado en la malla # 4 se pesó los dos componentes del suelo. En el caso del suelo en estudio, no hubo retenido en la malla, lo que indica que el suelo cuenta en su totalidad con partículas menores a 4,75 mm.

Una vez separado el suelo, se procedió a fraccionarlo con un separador mecánico, partiendo del peso obtenido en la sección anterior. A partir de este peso se tomó las cantidades necesarias para cada uno de los ensayos.

El procedimiento seguido para realizar esta separación, fue esparcir el material de manera que el separador divida en dos partes iguales el suelo que ha pasado por él, en este caso el peso inicial de la muestra. Una de las mitades continúa en este procedimiento y la otra se guardó en un saco. La mitad que continúa, que se llamó material uno, se procesa de la misma forma, y se dividirá en dos partes iguales. El procedimiento se terminó hasta obtener las cantidades necesarias para cada ensayo. Lo guardado en el saco servirá en caso de requerir repetir alguna prueba. En el cuadro 9 se muestran las cantidades usadas para cada uno de los ensayos realizados.

CUADRO 9. CANTIDADES NECESARIAS DE SUELO PARA REALIZAR LOS DIFERENTES ENSAYOS	
Granulometría	500 gramos
Límites de Atterberg	2000 gramos
Sedimentación	500 gramos
Proctor Modificado	20000 gramos

Pruebas de identificación

Parte importante de un estudio de suelos fue la identificación del mismo según los sistemas internacionales de clasificación, de manera que se pudo conocer las propiedades de estos en diferentes condiciones ya estudiadas con mayor detenimiento, y a partir de esta información, se tomó en cuenta para los análisis respectivos.

Para la realización de este proyecto se decidió identificar el suelo haciendo uso de la granulometría, límites y de la sedimentación del suelo. A continuación se presentan los procedimientos realizados para efectuar cada una

de estas pruebas basándose en la metodología propuesta por la ASTM.

Granulometría (ASTM D 422 y ASTM D 1140)

Al efectuar la preparación de la cantidad de material para realizar este ensayo se conoció que el suelo es una mezcla de arena y partículas finas. Con esta información se descartó los ensayos que se deben realizar para el análisis de gravas, pues la existencia de estos en el material obtenido del talud fue nula.

Para realizar la granulometría se tomó 500 gramos de suelo previamente tamizados por la malla # 4. A continuación, este material se colocó en una bandeja. Esta se pesó previamente. El suelo cuenta con cierto grado de humedad en esta etapa, por lo que se colocó en el horno a 110 grados Celsius durante 24 horas.

Finalizado el lapso destinado al secado de la muestra se sacó del horno y dejar que el suelo se enfríe. Esto debido a que, si se pesa aún caliente, se van a producir variaciones en el peso seco de la muestra que van a afectar el ensayo. Una vez pesada la muestra seca, se determinó su peso seco sin bandeja. Concluido el pesaje de la muestra, esta se saturó y se dejó en este proceso durante 24 horas.

Pasadas las 24 horas, luego de la saturación completa de la muestra, se realizó el lavado en la malla # 200. Esta es una de las mallas que cuenta con aberturas muy pequeñas. La abertura de esta malla es de 75 micrómetros.

El procedimiento de lavado consiste en colocar en un recipiente profundo el suelo y agitarlo varias veces con la mano, de forma que las partículas menores queden en suspensión y luego de pasar por la malla # 200 se descarten para el siguiente lavado. Este procedimiento se realizó hasta que no haya partículas pasando por la malla # 200, lo cual se apreció una vez realizado el lavado o en la claridad del agua. Aproximadamente en este procedimiento duró una hora y media hasta lograr el punto adecuado de limpieza del suelo.

Una vez lavado el suelo se colocó al horno, a 110 grados Celsius, durante 24 horas. Concluido el tiempo de secado se pesó el suelo ya lavado y seco. A partir de este peso se realizó la separación del suelo por las diferentes mallas. Las mallas que se usaron para realizar este

fraccionamiento son las que se encuentran en el cuadro 10.

CUADRO 10. MALLAS USADAS EN LA GRANULOMETRIA Y SU RESPECTIVA ABERTURA	
Malla # 10	2,000 mm
Malla # 20	0,840 mm
Malla # 40	0,420 mm
Malla # 100	0,149 mm

Realizado el fraccionamiento por las diferentes mallas, se sumó cada uno de los componentes con el fin de comparar con el peso seco lavado obtenido previamente. El porcentaje de error permitido es de 1% como máximo.

A partir de esta información se pudo realizar una curva granulométrica, la cual contará en el eje de las abscisas el tamaño de partícula en escala logarítmica, en milímetros, y en el eje de las ordenadas el porcentaje pasando por cada una de las distintas mallas.

La identificación del suelo con base en este método consistió en la determinación de los porcentajes de partículas del suelo y compararlo con los tamaños considerados estándar para cada uno de los tipos de suelo. El mayor porcentaje retenido será el que dictará la clasificación.

Límites de Atterberg (ASTM D 4318)

Cada uno de los suelos cuenta con límites de consistencia. Existen tres límites, límite líquido, límite de contracción y límite plástico. Cada uno de estos determina la cantidad de agua que necesita un suelo para pasar a comportarse como un líquido, en el caso del límite líquido, o de forma plástica como en el límite plástico.

Las pruebas de límites de Atterberg se limitan a determinar el límite plástico y el límite líquido. Para la realización de ambos ensayos se realizó una preparación previa de la muestra, por lo que se deben tomar los 2000 gramos obtenidos del procedimiento anterior de fraccionamiento,

molerlos mediante un pisón de hule y procesarlos por la malla # 40 hasta obtener 500 gramos de suelo. Los ensayos se trabajaron con el material pasando dicha malla.

De los 500 gramos se tomó 150 gramos para realizar las pruebas. El material se encuentra seco, por lo que hay que adicionar 10 cc de agua potable, medidos en una probeta, y realizar una homogenización del suelo. Posteriormente se agregó agua hasta que el suelo tenga cierto grado de consistencia en el que pueda “amarrar”, es decir, tener la suficiente cantidad de agua para que las partículas presenten cierta cohesión. Una forma de conocer que se ha alcanzado dicho punto fue colocando el suelo en la copa de Casagrande y obtener aproximadamente 50 golpes para cerrar la ranura.

Alcanzado este punto, se separó 50 gramos de suelo y se realizó la prueba de los bastones. Esta prueba consistió en formar bastones de 3mm de diámetro. En caso de que no se puedan formar dichos bastones, el suelo se declaró como no plástico y, por ende, su límite plástico fue igual a 0. En caso de que se puedan formar bastones, los 50 gramos se dividieron en tres grupos y se formaron bastones de tres milímetros de diámetro y de un centímetro de largo como máximo. Se sabe que se ha alcanzado el límite plástico cuando los bastones por sí solos se resquebrajan o agrietan y los bastones formados tienen las dimensiones dichas previamente. Seguidamente se tomó el peso húmedo de las tres muestras y luego secarlas en el horno a 110 grados Celsius por 24 horas. En el caso del suelo en estudio, se determinó mediante varios intentos que el suelo es no plástico.

Alcanzado el punto descrito anteriormente, se calculó el límite líquido siguiendo cualquiera de las siguientes metodologías: multipunto o un punto. A continuación se va a describir la metodología usando el multipunto.

El método multipunto hace uso de la copa de Casagrande, la cual es un dispositivo que genera golpes al suelo con el fin de hacer colapsar los taludes formados con un ranurador de dimensiones preestablecidas. El suelo se moldeó en la copa de Casagrande y se realizó un corte en el suelo moldeado con el ranurador, de manera que se pueda ver el fondo de bronce de la copa. Se produjeron los golpes a la copa hasta que la grieta se cierra. Posteriormente se tomó el suelo donde se juntó la grieta, aproximadamente

13 mm, para realizar el cálculo de humedad. Se forman tres secciones, de estas se debe de tomar la sección central, la cual es donde se cerró la ranura, para la determinación de la humedad. La prueba se repite a diferentes grados de humedad y de golpes con el fin de obtener una curva, donde se grafican el logaritmo del número de golpes en las abscisas y el contenido de humedad en las ordenadas. En 25 golpes se lee el contenido de humedad; este es el límite líquido.

CUADRO 11. CANTIDADES DE GOLPES NECESARIOS PARA FORMAR LA CURVA PARA DETERMINAR EL LÍMITE LÍQUIDO	
Punto 1	40 – 30 Golpes
Punto 2	30 – 25 Golpes
Punto 3	25 – 20 Golpes
Punto 4	20 – 15 Golpes

Usando el método de un solo punto, la metodología es similar a la anterior con respecto al uso de la copa de Casagrande, solo que en este método se toma un solo punto, de manera que la cantidad de golpes con la copa debe de estar entre 30 y 20. De igual forma se toma la muestra para determinar la humedad, tomando 13 mm de donde se cerró la ranura únicamente. El dato de humedad y el número de golpes se introducen en una ecuación y el resultado de ésta es el límite líquido.

$$LL = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Sedimentación (ASTM D 422)

La prueba de sedimentación consiste en tomar 200 gramos de suelo, sea o no procesado, e introducirlo en una probeta de 1000 ml. Posteriormente se debe llenar con agua hasta alcanzar 400 ml de agua. Se tapa la probeta y se agita bien y se deja reposar por un lapso considerable. Esta prueba consiste en determinar, mediante el uso del concepto de la sedimentación y de la densidad de las partículas una clasificación del suelo. El fundamento teórico

de la prueba dice que las partículas con mayor tamaño son las primeras en sedimentar, y así hasta llegar a las más pequeñas, que son las que van a durar más.. Una vez pasado el tiempo establecido como de reposo se pueden observar las diferentes capas con los distintos tamaños ordenados.

La prueba realizada se dejó reposar durante cuatro horas, y ésta no ofreció mayor información a la ya obtenida, ya que mostró la masa de suelo de forma uniforme: no se aprecian los diferentes tamaños, lo cual indica que el suelo tiene una misma graduación de material fino.

Pruebas de resistencia

Prueba Proctor (AASHTO T-180)

La prueba Proctor es la que determina la humedad óptima y el máximo peso específico seco que se pueden alcanzar en un proceso de compactación. Para obtener estos resultados se pueden utilizar diferentes métodos, entre ellos los de la ASTM o los de la AASHTO. Además, existen para esta prueba dos tipos: el Proctor estándar y el modificado. La diferencia entre los dos métodos consiste en el número de golpes, número de capas, composición del suelo, altura de caída del pisón y tamaño del molde. En resultados, se observó que el Proctor modificado alcanza mayores valores de peso específico seco que el procedimiento estándar, y menores valores de humedad óptima también, por lo que el método que se va a presentar a continuación es el método de Proctor Modificado.

El procedimiento usado fue el Proctor Modificado de la AASHTO. Este consistió en realizar cinco puntos, uno con la humedad cercana a la óptima, dos puntos en la rama seca de la curva y dos puntos en la rama húmeda. Para ello se usó un molde de cuatro pulgadas de diámetro. Se compactó cinco capas con 56 golpes cada una para cada una de las cinco muestras. Además se contó con una probeta de 1000 ml con la cual medir la cantidad de agua. Antes de realizar cualquier prueba se pesó el molde sin el collar y los recipientes en los cuales se determinaron las humedades.

El primer punto de la curva de compactación fue el de la humedad óptima. Para alcanzar este punto se roció agua, ya sea con un rociador o manualmente, hasta lograr formar un

terron con la mano. Inmediatamente, al alcanzar esta condición de humedad, se tapó con un plástico y se dejó reposar por 10 min. Pasado el tiempo, se tomó la muestra para determinar la humedad y pesarla en la balanza. Seguidamente se realizó la compactación de las capas. Los golpes del pisón deben ser distribuidos por todo el espacio disponible. Se calculó que la última capa quedó la mitad debajo del collar y la otra mitad en el collar.

Una vez finalizado el proceso de compactación, se quitó el collar y se enrasó con regla metálica. La superficie quedó completamente plana, sin hundimientos o espacios vacíos; en caso de que sucediera, se tomó suelo con la misma humedad y compactó con la regla y enrasó hasta que la superficie quede apta. Posteriormente se pesó en la balanza y se quitó el suelo del molde, de forma que pueda ser reutilizado para el siguiente punto.

El contenido de humedad para los siguientes puntos, tanto de la rama seca como de la rama húmeda, se calculó usando un porcentaje sobre el peso seco del punto. Cada uno de los puntos pesó 3000 gramos, por lo que se multiplicó por un porcentaje que varía entre 1,5% y 2% para obtener la cantidad de agua que se le debe sumar o restar al contenido de humedad tomado como óptimo.

Con los datos obtenidos de la prueba, tales como el volumen del molde, el cual ya fue dado, y el peso total, se pudo determinar cuál fue el peso específico masivo.

$$\gamma_t = \frac{W_t}{V} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Posteriormente, con el valor calculado con la ecuación anterior y el contenido de humedad, se determinó el peso específico seco.

$$\gamma_s = \frac{\gamma_t}{(1+w)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Estos cálculos se realizaron para cada uno de los puntos y se trazó la curva. El punto máximo de dicha curva es el compuesto por el peso específico seco más alto y la humedad considerada como óptima. Aparte de este gráfico, se trazó la curva de saturación total, la cual debe ser paralela a la rama húmeda de la curva de compactación.

Determinación de la gravedad específica

El método siguiente es el aplicado a suelos. Se realiza este procedimiento debido a la cantidad considerable de suelo fino que contiene la arena en estudio.

La muestra, ya sea húmeda o seca, se tamizó por la malla N° 4. Las cantidades están normadas por ASTM D 854. Realizado esto, se determinó el contenido de humedad de una porción de la muestra. Usando este valor, se calculó la masa seca por utilizarse en el ensayo de acuerdo con el cuadro estipulado por la norma.

Se mezcló el suelo con aproximadamente 100 ml de agua. Esta mezcla se vertió en el picnómetro de manera que no haya ninguna partícula en las paredes del instrumento. Se agregó agua hasta que el nivel se encuentre entre 1/3 y 1/2 de la profundidad del picnómetro. Se agitó hasta que se forme una mezcla y se enjuagó cualquier partícula adherida. Se dejó saturando mínimo 16 horas.

Se hizo la remoción del aire atrapado haciendo uso de agua hirviendo durante dos horas. Posteriormente se bajó la temperatura usando agua fría sumergiendo el picnómetro en ésta. La temperatura se comprobó usando un termómetro. Se llenó el picnómetro con agua hasta que el nivel del agua coincida con la marca de calibración.

Se determinó la temperatura y se registró la masa del picnómetro más el suelo y el agua en una balanza. Esta mezcla se trasladó a un recipiente y se secó al horno a temperatura constante y se tomó el peso seco de la muestra.

Corte directo (ASTM D 3080)

La prueba de corte directo se puede clasificar en corto y largo plazo. La diferencia entre ambos métodos consiste en las condiciones de drenaje: a corto plazo hay ausencia de drenaje, mientras que a largo es fundamental la presencia de éste.

Se debe tomar una muestra inalterada del suelo y a partir de esta muestra se debe tallar una placa de 50 mm de diámetro y 20 mm de espesor. Para realizar este tallado se debe usar un anillo, que tiene las dimensiones requeridas, el cual se introduce a presión en la muestra. Además, se deben tomar tres muestras de

aproximadamente 20 g para tomar la humedad inicial.

Posteriormente se debe consolidar dicha placa en condiciones saturadas. Como resultado de la consolidación se obtiene la curva de consolidación, de la cual se obtiene el t_{50} y el t_{90} . Con estos valores se calcula el tiempo total transferido en minutos, con el cual se calcula la tasa de desplazamiento al dividir el desplazamiento horizontal entre este tiempo.

$$Dr = \frac{Df}{Tf} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde $Tf = 50 \cdot t_f$ y Df es el desplazamiento horizontal.

Este valor es la velocidad de corte. Seguidamente se procede a cortar la muestra en dos, por lo que se toman medidas en los deformímetros encargados de la deformación horizontal, vertical, además del tiempo y de la fuerza cortante. Cada medición debe realizarse en intervalos de desplazamiento de 2% con respecto al diámetro de la muestra. Seguidamente se calcula la humedad y se obtienen el gráfico de esfuerzo cortante contra deformación. El ángulo de inclinación de esta curva y la horizontal forman el ángulo de fricción.

Posteriormente se determinan las características geométricas haciendo uso de la topografía.

Características geométricas

La otra parte del proyecto consistió en pruebas realizadas en el campo, las cuales midieron de forma directa las variables de este estudio, tales como el movimiento, mediante el uso de un inclinómetro, el esfuerzo de succión, haciendo uso de tensiómetros, y la precipitación, mediante pluviómetros. Además de estas labores, previamente se debió realizar un estudio topográfico del terreno, con el fin de dimensionar el talud, así como las perforaciones SPT, con las cuales se realiza el estudio estratigráfico del terreno, se obtiene la capacidad soportante, y al mismo tiempo permiten la colocación del inclinómetro.

Topografía

La topografía fue importante para el proyecto debido a que con ésta se logra armar un modelo del terreno. La propiedad solo cuenta con un plano catastro, por lo que se debió realizar un levantamiento altimétrico. A continuación se describe el procedimiento para la obtención de dicho levantamiento.

Para comenzar a realizar las mediciones se colocaron los dos bancos de niveles, uno en la corona del talud y el otro en el pie. Estos bancos de nivel deben estar referenciados con respecto a algún sitio conocido, sea una calle, postes de luz, entre otros. En este caso se referenció con el poste de alumbrado eléctrico más cercano a la propiedad. Al banco de nivel se le otorgó una elevación 1000 m.

Referenciados estos puntos se procedió a tomar las medidas. Se niveló el teodolito de forma que quede nivelado en las tres direcciones. Posteriormente a esta nivelación se colocó la estadia de forma que con el teodolito se puedan ver de forma simple las medidas. Se tomó esta medida, la cual se anotó en el registro como una medida positiva; posteriormente esta distancia se suma a la elevación y esta distancia es la altura del instrumento.

El teodolito se cambió de posición, ahora se posicionó más abajo de la estadia, de manera que se pueda tomar alguna lectura en la misma. Esta medida se tomó como negativa y se restó a la altura del instrumento y se anotó como elevación. El procedimiento se continuó de la misma forma hasta alcanzar el banco de nivel del pie del talud. La altura determinada fue la resta de alturas de los bancos de nivel y la misma fue usada para la realización del modelo en el software de estabilidad de taludes.

Además de la altura del talud, se debió realizar las curvas de nivel del terreno. Estas se realizaron siguiendo la misma metodología, la única variación fue la distancia a la cual se colocó la estadia. Esta distancia debe ser conocida y, por lo tanto, medida. Para lograr formar la curva se debió tomar más puntos, por lo que se tomó tres columnas de mediciones con el fin de tener un control específico de la colocación de los instrumentos y de las perforaciones.

Finalmente, para terminar de elaborar el modelo geotécnico se realizaron perforaciones de exploración con el fin de determinar espesores de estrato y tipos de suelos existentes en el talud.

Estratigrafía

Cálculo de las perforaciones

El cálculo de las perforaciones se realizó usando el software de análisis de estabilidad de taludes llamado Slope/w® desarrollado por la empresa Geoslope®. Este programa se utilizó usando la licencia estudiantil.

En dicho programa, se realizó el modelo del talud tomando en cuenta los valores obtenidos de la topografía, así como los valores teóricos y los obtenidos en el laboratorio. Además, al no conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático, éste se tomará como variable y el estudio se realizará para diferentes profundidades de nivel freático. Los análisis que se realizarán serán Morgenstern-Price, Janbú simplificado, Fellenius y Bishop. La profundidad de las perforaciones se tomó usando la superficie de falla que brindó el software.

Modelo: precipitación

Para analizar la precipitación y su influencia, primero se debe conocer el comportamiento de la misma. Para ello, se registraron las precipitaciones durante el periodo octubre 2009-marzo 2010 haciendo uso de un pluviómetro. Además de esto, se realizó un estudio del comportamiento de la precipitación histórica, con el fin de determinar, con mayor exactitud, el mismo. El estudio de la precipitación se complementó con el pronóstico de la misma, con el fin de evaluar a futuro las condiciones climáticas.

Pluviómetro

Los pluviómetros utilizados son recipientes graduados de plástico. La importancia de estos es que proporcionaron de forma directa una medida de la precipitación. La colocación de estos instrumentos es lo más importante debido a que se deben colocar de manera que no haya afectación por plantas, animales y árboles. Las mediciones se realizarán cada semana y la misma consistirá en leer directamente del envase plástico y anotar en el registro la cantidad de

agua precipitada en mm, se vaciará el contenido de los envases y se dispondrá de la misma forma.

Datos históricos

Debido al periodo corto de evaluación de datos de una variable afectada por múltiples factores, se deben tomar en cuenta los datos históricos. Estos presentan el comportamiento de la precipitación en el tiempo con mayor respaldo. Esto es de utilidad en el pronóstico de lluvia, debido a que se pueden formar tres escenarios posibles: lluvioso, normal y seco. Los registros deben ser de estaciones meteorológicas cercanas al sitio en estudio y que se encuentren en vigencia, de manera que se puedan verificar los pronósticos. Estos deben ser solicitados al Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

El método presentado por Villalobos et al (1997) consistió en seleccionar las estaciones meteorológicas de acuerdo a su representatividad, calidad y extensión de registro, actualización y permanencia. Seguidamente se tomó las precipitaciones mensuales y se sumaron para obtener las precipitaciones anuales. Se agruparon realizando una distribución de frecuencias. Si la distribución fue normal, se formaron los escenarios basados en la desviación estándar, es decir: el escenario seco consideró las precipitaciones menores a la desviación estándar negativa; el escenario lluvioso, las que fueron mayores a la desviación estándar positiva; y el escenario normal, aquel entre las dos desviaciones estándar. Si la distribución no fue normal, se dividió en terciles, de manera que el escenario seco fueron todas aquellas precipitaciones menores al primer tercil, el escenario lluvioso las que fueron mayores al tercer tercil, y el escenario normal las precipitaciones entre el primer y segundo tercil. (Villalobos et al, 1997). El detalle de este método se encuentra en la sección de anexos.

Pronóstico

Para completar el modelo se pronosticó la precipitación. Esto se pudo realizar por diferentes métodos. Los que se van a explicar en esta sección corresponden a la media móvil y al método de índices de estacionalidad.

Media móvil

Este método depende del número de periodos que se requiera analizar. Para realizar este trabajo se utilizaron tres periodos de estudio. El mínimo de medidas que se deben tener para pronosticar usando este número de periodos es de tres. El método consiste en promediar los últimos tres periodos. El promedio de estos últimos periodos va a ser la predicción de lluvia. El número de periodos va a depender del número de datos con los que se cuente. (Anderson et al, 2008)

Índice de estacionalidad

El método de índice de estacionalidad es utilizado para el pronóstico de datos (Anderson et al, 2008). Debido a que las medidas de precipitación presentan un comportamiento similar, se decide hacer uso de un índice que analiza el promedio de un periodo en particular y establece su relación con respecto a la media; es decir, si se encuentra por arriba o por debajo de la misma. Para la determinación del índice se hace uso de la siguiente fórmula:

$$I_e = \frac{D_i}{D} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

I_e= Índice de estacionalidad para el iésimo período

D_i= Los valores promedio de los n periodos.

D = Media general

Una vez calculado el índice de estacionalidad se debe multiplicar por el promedio. Este se calcula haciendo una regresión lineal donde la pendiente se calcula siguiendo la ecuación:

$$m = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde “x” es el periodo, “y” la precipitación y “n” el número de periodos.

Posterior a esto se debe de calcular “b” de la ecuación de la recta, y para ello se toma la siguiente fórmula:

$$b = \bar{y} + b\bar{x} \quad \text{Ecuación (18)}$$

El pronóstico para dicho periodo, el cual puede ser anual, mensual o semanal se calcula con la siguiente ecuación:

$$Precipitación_{periodo} = mx + b \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde “x” es el número de periodos desde el primer año, mes o semana a pronosticar. Para calcular sub-periodos se debe dividir entre el número de subperiodos. Este pronóstico promedio de tendencia lineal se ajusta al multiplicarlo con el índice de estacionalidad, el cual es el encargado de asignarle la tendencia de los datos.

$$Pronóstico = \frac{P_{periodo}}{N} * I_e \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde P_{periodo} es la precipitación del periodo, “N” el número total de datos y el I_e es el índice de estacionalidad.

Modelo: Humedad

Una vez calculada la precipitación, se debe analizar el efecto que tiene en el suelo. Parte de esta precipitación se pierde por escorrentía, una se infiltra en el suelo y es evapotranspirada por las plantas y una parte de la lluvia infiltrada se convierte en humedad en el suelo. Para la determinación de esta humedad se pueden seguir dos procedimientos: uno es una medición directa y el otro es analítico.

Método directo

El método de medición directa de humedad consiste en la obtención de muestras de suelo a una profundidad determinada. Esta muestra es llevada al laboratorio de manera que no pierda humedad, se toma el peso húmedo de la muestra y se coloca en el horno por 24 horas a 110°C. Se determina el peso seco y utilizando la siguiente ecuación se calcula el contenido de agua en el suelo.

$$w = \frac{W_{h+b} - W_{s+b}}{W_s} \times 100 \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

W = contenido de humedad (%)

W_{h+b} = Peso Húmedo + bandeja

W_{s+b} = Peso seco + bandeja

W_s = Peso seco

Además, se debe tomar una muestra del suelo que se va a considerar como la humedad inicial. Dentro de las mediciones realizadas se debe llevar un registro diario de la precipitación haciendo uso de un pluviómetro. El efecto de la lluvia en la humedad se determina realizando mensualmente una gráfica donde se grafica en el eje de las ordenadas el contenido de humedad y en el eje de las abscisas la precipitación acumulada en mm. De esta gráfica se lee directamente la humedad asociada a la precipitación deseada. La humedad obtenida es neta, esto quiere decir que ya pasó la precipitación por la escorrentía, filtración y evapotranspiración.

Método analítico

El método analítico utilizado en este trabajo corresponde a un modelo desarrollado por Schosinsky (2007), el cual toma la precipitación mensual y la convierte en humedad del suelo. Este proceso involucra realizar un balance hídrico, y para ello se debe calcular la escorrentía, la precipitación infiltrada y la evapotranspiración potencial. A continuación se presenta un resumen del método, el detalle se encuentra en la sección de anexos.

El primer cálculo que se debe realizar es determinar la fracción de lluvia interceptada por el follaje. Para el cálculo de este valor se debe considerar un coeficiente que depende de la densidad del follaje. Si este es normal, el coeficiente es igual a 0.12; pero si este fuera denso sería 0.20. También depende de la cantidad de precipitación. Por lo que el cálculo sería de acuerdo con las siguientes condiciones.

- 1) Si $P \leq 5mm$, $Ret = P$
 - 2) Si $P \times Cfo \geq 5mm$, $Ret = P \times Cfo$
 - 3) Si $P > 5mm$ y $P \times Cfo < 5$, $Ret = 5$
- Ecuación (22)

Donde:

Ret = Retención de lluvia por follaje

P = Precipitación

Cfo = Coeficiente de follaje

Seguidamente se debe calcular la infiltración; para ello primero se tiene que calcular el coeficiente de infiltración. Este depende de diferentes fracciones, que consideran el efecto de la pendiente, cobertura vegetal y la textura de suelo. La suma de estas fracciones debe ser menor que uno; si fuera mayor se considera igual a uno. Posteriormente este coeficiente se multiplica por la precipitación para obtener la lluvia infiltrada.

$$Ci = Kp + Kv + Kfc \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$Pi = Ci \times (P - Ret) \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

Pi = Precipitación infiltrada

Ci = Coeficiente de infiltración

Kp = Fracción que infiltra por pendiente

Kv = Fracción que infiltra por vegetación

Kfc = Fracción que infiltra por textura del suelo

La escorrentía se calcula usando la siguiente fórmula:

$$ESC = P - Ret - Pi \quad \text{Ecuación (25)}$$

Además se debe calcular la evapotranspiración potencial. Esta se puede determinar usando dos ecuaciones, una que contempla la evapotranspiración de la planta y la otra que depende de factores climáticos. El uso de ellas dependerá de la información que se tenga.

Seguidamente se calculan los coeficientes de humedad a final de mes. Se calcula un coeficiente de humedad sin la evapotranspiración y otro incluyéndola. Se introducen en estos cálculos datos como la humedad inicial, el punto de marchitez y la capacidad de campo. Todas estas medidas deben estar en milímetros. El punto de marchitez es el menor contenido de humedad que puede contener un suelo, y la capacidad de campo es la máxima humedad que puede haber en el campo.

$$C1 = (Hsi - PM + Pi)/(CC - PM) \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

$C1$ = Coeficiente de humedad sin evapotranspiración

Hsi = Humedad inicial

PM = Punto de marchitez

CC = Capacidad de campo

$$C2 = (Hsi - PM + Pi - ETR1)/(CC - PM) \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde:

C2 = Coeficiente de humedad con evapotranspiración

ETR1 = C1 x ETP

(ETP=Evapotranspiración potencial)

Seguidamente se calcula la evapotranspiración real promediando las humedades calculadas y multiplicándolas por la evapotranspiración potencial

$$ETPR = \left(\frac{C1+C2}{2}\right) \times ETP \quad \text{Ecuación (28)}$$

Se debe determinar la evapotranspiración real (ETPR), por lo que se debe verificar si la planta va a evapotranspirar el potencial o la humedad disponible (HD). Para ello se calcula primeramente dicha humedad y luego se verifica en cuál de las siguientes condiciones se encuentra.

$$HD = Hsi + Pi - PM \quad \text{Ecuación (29)}$$

1) Si $ETPR \leq HD$, $ETR = ETPR$

2) Si $ETPR > HD$, $ETR = HD$

$$\quad \text{Ecuación (30)}$$

La humedad final del suelo (Hsf) debida a una precipitación mensual debe cumplir con la condición limitante de la capacidad de campo. En caso de que se exceda se debe asumir que se encuentra a capacidad de campo.

$$Hsf = HD + PM - ETR < CC \quad \text{Ecuación (31)}$$

Modelo: Succión

El modelo que corresponde a la succión consiste en la determinación de la curva suelo - agua teórica y experimental, de forma que con la humedad se pueda establecer cuál es la succión y viceversa.

Curva suelo – agua teórica

La determinación de la curva suelo – agua teórica se basa en una metodología desarrollada por Perera et al en 1999. Esta se basa en la granulometría del suelo. La curva suelo – agua es la que representa la relación entre la succión y el contenido de humedad. La forma de la curva también depende de la plasticidad del suelo. El procedimiento detallado se presenta en la sección de anexos. A continuación se presenta la ecuación con la que se determina el contenido de humedad, además de la succión matricial. Cabe destacar que para realizar el siguiente cálculo se debe utilizar algún método numérico.

Factor de corrección por la succión

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{h_{rf}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{h_{rf}}\right)} \right] \quad \text{Ecuación (32)}$$

Contenido volumétrico de agua

$$S = C(h) \times \left[\frac{1}{\left[\ln \left[\exp(1) + \left(\frac{h}{af}\right)^{bf} \right] \right]^{cf}} \right] \quad \text{Ecuación (33)}$$

Donde;

S= Contenido volumétrico de agua

h = Succión matricial en kPa

af = Parámetro de ajuste, función de la entrada de aire.

bf = Parámetro de ajuste, función de la tasa de extracción de agua del suelo.

cf = Parámetro de ajuste, función del contenido de agua residual.

hrf = Parámetro de ajuste, función de la succión a la cual el contenido residual de agua ocurre.

Parámetros de ajuste

Suelo No plástico

$$af = 1.14a - 0.5 \quad \text{Ecuación (34)}$$

Donde:

$$a = -2.79 - 14.1 \log(D_{20}) - 1.9 \times 10^{-6} P_{200}^{4.34} + 7 \log(D_{30}) + 0.055 D_{100} \quad \text{Ecuación (35)}$$

$$D_{100} = 10^{\left[\frac{40}{m1} + \log(D_{60})\right]} \quad \text{Ecuación (36)}$$

$$m1 = \frac{30}{[\log(D_{90}) - \log(D_{60})]} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$bf = 0.936b - 3.8 \quad \text{Ecuación (38)}$$

Donde:

$$b = \left\{ 5.39 - 0.29 \ln \left[P_{200} \left(\frac{D_{90}}{D_{10}} \right) \right] + 3D_0^{0.57} + 0.021 P_{200}^{1.19} \right\} m_1^{0.1} \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$D_0 = 10^{\left[\frac{-30}{m2} + \log(D_{30})\right]} \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$m2 = \frac{20}{[\log(D_{30}) - \log(D_{10})]} \quad \text{Ecuación (41)}$$

$$cf = \log(m_2^{1.15}) - \left(1 - \frac{1}{bf}\right) \quad \text{Ecuación (42)}$$

Hrf = 100

Suelos Plásticos

$$af = 32.835\{\ln(wPI)\} + 32.438 \quad \text{Ecuación (43)}$$

$$bf = 1.421(wPI)^{-0.3185} \quad \text{Ecuación (44)}$$

$$cf = -0.2154\{\ln(wPI)\} + 0.7145 \quad \text{Ecuación (45)}$$

Hrf = 500

Curva suelo-agua experimental

La curva suelo-agua experimental se realiza haciendo uso de un tensiómetro, además de pruebas de contenido de humedad. A continuación se detalla el procedimiento.

Tensiómetro

Para el uso del tensiómetro se debe realizar primeramente una curva de calibración, ya que no sería posible relacionar la humedad con la succión de no hacer este procedimiento. Para ello se va a necesitar una muestra inalterada del suelo del talud, la cual se usará para realizar esta calibración. A continuación se presenta el procedimiento a seguir para la toma de la muestra.

Muestra Inalterada

Para obtener una muestra inalterada de tamaño considerable se realizó una excavación previa. Esta debe tener una profundidad que variará de acuerdo con el estrato del que se quiera extraer la muestra. Realizada esta excavación, se debe hacer una segunda excavación que consistió en formar un anillo, de forma que la muestra quede en el centro del anillo para que pueda ser tallada y entre en el recipiente que la contendrá.

Dependiendo de las características que se quieran, se preservó la humedad de la muestra. El recipiente debe ser capaz de proteger a la estructura sin ejercer esfuerzos sobre la muestra que modifiquen la misma ni que permita la pérdida de muestra. Es conveniente tomar en cuenta el tensiómetro por utilizar y la profundidad del mismo, ya que influye en el tamaño de muestra por obtener y, por ende, en el recipiente, ya que el tensiómetro no debe quedar cerca del fondo del recipiente, pues podría dañarse.

Preparación de la muestra y del equipo

El siguiente método fue propuesto por el Ing. Adrián Chavarría de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, el cual tiene amplia experiencia en el uso de este equipo.

El recipiente que contiene la muestra debe perforarse en su fondo de manera que se simulen las condiciones de campo con respecto a la filtración del agua. Para realizar estas perforaciones se pueden seguir diferentes metodologías, entre ellas el uso de un clavo, taladro o calentando un tornillo. Cada método variará dependiendo del material del recipiente.

Una vez que se ha colocado la muestra en el recipiente con el fondo perforado, se debe saturar. Al tener un fondo poroso, la muestra debe recibir una carga de agua constante, ya que va a existir una filtración del líquido.

Simultáneamente, se debe preparar el tensiómetro para su utilización. Parte fundamental en este proceso, es el agua con la cual se va a llenar el instrumento, debido a que las propiedades de la misma afectan las mediciones, debido a su contenido de aire, por lo que se debe usar agua destilada o, en su defecto, agua hervida durante 30 minutos. Seguidamente se debe colocar el tensiómetro en el agua, una vez que ésta se ha enfriado, de forma que se humedezca la porcelana ubicada en la punta del instrumento. A continuación se llena de agua y se le extrae el aire al tensiómetro mediante ligeros golpes.

Colocación del instrumento

Para colocar el tensiómetro se debe realizar una excavación en la muestra de forma que el diámetro sea ligeramente inferior al del equipo, ya que es fundamental para la realización del ensayo que la porcelana esté en contacto con el suelo en toda su longitud. Además, no debe quedar cerca del fondo del recipiente, ya que afecta las medidas por tomar, por lo que se recomienda una distancia mayor a cinco centímetros del fondo.

Ensayo

El ensayo con el tensiómetro consiste en tomar lecturas de succión con el instrumento y tomar muestras de humedad para dicha medida, de manera que se forme una gráfica humedad contra succión.

Las muestras para el cálculo de la humedad se deben tomar a la profundidad de la punta de porcelana, siguiendo lo establecido con la norma ASTM D- 2216.

La cantidad de puntos por tomar dependerá del criterio de la persona que desarrolle el ensayo. Se recomienda tomar puntos cada 10 kPa como mínimo.

Una vez realizada la curva, se podrán correlacionar las medidas de succión tomadas en el campo con la humedad del suelo a la hora de realizar la medición, suponiendo la misma estructura.

Modelo: Estabilidad

Análisis determinístico

Se realiza un análisis de estabilidad sencillo utilizando el método de dovelas para calcular el factor de seguridad según la metodología de Fellenius y de Bishop. En este análisis se introducen valores constantes y valores variables. Este es realizado en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel 2007. A continuación se presenta la metodología empleada para el desarrollo de la hoja de cálculo.

La hoja de cálculo fue realizada de tal manera que los primeros datos que se deben introducir son las características del suelo y la geometría del talud. Las propiedades del suelo que se solicitan son el peso específico, la cohesión y el ángulo de fricción. Se pueden introducir hasta cuatro tipos diferentes de suelos. Además se introduce el valor de la sobrecarga.

Seguidamente se debe introducir la geometría del talud; esta se hará como pares ordenados (x, y) de manera que se logre definir el contorno del talud. De la misma manera se introducen los valores correspondientes a las fronteras de los diferentes tipos de suelo, así como la ubicación de la sobrecarga.

Posteriormente, se deben introducir tres puntos, en forma de pares ordenados, por donde va a pasar la superficie de falla. Los puntos que se solicitan son: el de entrada, el de salida y un punto intermedio. A partir de estos tres puntos y utilizando la ecuación de un círculo, se obtiene la expresión para determinar el radio y el centro del círculo.

Para la definición de la superficie de falla se toma la ecuación del círculo con los datos del centro y del radio del mismo y se evalúan puntos (x, y) de manera que por medio de la aplicación Solver del software Microsoft Excel se encuentran los puntos pertenecientes al círculo.

Luego se deben determinar las dovelas. Para ello se hace uso de la ecuación de la recta y de la localización exacta de cada uno de los puntos y se obtiene el ancho y altura de la dovela. Usando una lógica similar se obtienen los espesores de cada una de las capas del suelo. Estos cálculos se realizan automáticamente al ingresar el perfil del talud.

La hoja de cálculo automáticamente determina la geometría y peso de la dovela y el ángulo de inclinación de la base de la misma. Se selecciona manualmente la existencia o no de una sobrecarga. En caso de existir, el software determina el valor de ésta y se la adiciona a las fuerzas verticales.

Automáticamente la hoja de cálculo determina los porcentajes de suelo existentes en cada dovela, de manera que se selecciona automáticamente el valor de cohesión en la capa de suelo en la que se encuentra la superficie de falla.

Con respecto a los ángulos de fricción se trabajan de una forma similar, ya que se toma en cuenta el valor de phi, ángulo de fricción interna, que se encuentra en el estrato en el que se da la falla. Además, se introduce un nuevo ángulo que es similar al de fricción, que se denomina ángulo de fricción debido a la succión (Fredlund, 1993), que es un ángulo que se introduce cuando se analiza un suelo no saturado con el fin de transformar la succión en cohesión.

La succión en un análisis de estabilidad de taludes se trabaja, tal y como lo indica Fredlund y Rahardjo (1993), usando el método de cohesión total. Este consiste en transformar la succión en cohesión y adicionársela; para ello se calcula la tangente del ángulo de succión y se multiplica por la succión. El producto se le adiciona a la cohesión.

Finalmente se calculan las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizantes para realizar el cálculo del factor de seguridad según Fellenius y, en el caso de Bishop, se debe introducir un factor de seguridad buscado y realizar iteraciones hasta llegar al mismo valor.

Análisis probabilístico

Método de Rosenblueth

El método de Rosenblueth (Rosenblueth, 1975) tiene la finalidad de obtener una probabilidad de falla. El primer paso para seguir esta metodología es determinar las variables, ya que de esto dependen los pasos siguientes. Según sea el número de variables, así se requerirán cálculos.

Seguidamente, se requiere realizar combinaciones de las variables. Cada variable se define con un promedio (μ_i) y una desviación (σ_i). Las combinaciones se deben realizar como se muestra a continuación:

$$F_{++} = g[(\mu_x + \sigma_x), (\mu_y + \sigma_y)] \quad \text{Ecuación (46)}$$

$$F_{+-} = g[(\mu_x + \sigma_x), (\mu_y - \sigma_y)] \quad \text{Ecuación (47)}$$

$$F_{-+} = g[(\mu_x - \sigma_x), (\mu_y + \sigma_y)] \quad \text{Ecuación (48)}$$

$$F_{--} = g[(\mu_x - \sigma_x), (\mu_y - \sigma_y)] \quad \text{Ecuación (49)}$$

Donde:

F = factor de seguridad resultante de la combinación de la desviación (σ_n) y promedio (μ_n) de las variables.

Junto a estas combinaciones se deben realizar otras, que involucran el número de variables (N) y la relación existente entre las variables (ρ_{xy}).

$$P_{++} = P_{--} = \frac{1}{2^N} (1 + \rho_{xy}) \quad \text{Ecuación (50)}$$

$$P_{+-} = P_{-+} = \frac{1}{2N} (1 - \rho_{xy})$$

Ecuación (51)

Posteriormente se calcula el factor de seguridad esperado para dos variables aleatorias siguiendo la siguiente ecuación:

$$E[F] = \mu_F = P_{++}F_{++} + P_{+-}F_{+-} + P_{-+}F_{-+} + P_{--}F_{--}$$

Ecuación (52)

Donde:

$E[F]$ = Factor de seguridad general

A este factor de seguridad se le debe calcular la varianza, la cual se obtiene de esta forma:

$$Var[F] = E[F^2] - (E[F])^2$$

Ecuación (53)

El factor de seguridad calculado previamente, usando la ecuación 52, tiene un índice de confiabilidad, con el cual se puede conocer el nivel de desempeño y conocer así la probabilidad de falla. Para el cálculo de este índice de confiabilidad debe de seguirse la siguiente metodología, dependiendo de los datos que se tengan (normales o no normales). En caso de que se tratara de una distribución log normal:

$$\beta = \frac{|\ln(Fc) - \mu_N|}{\sigma_N}$$

Ecuación (54)

Donde:

$$\mu_F = E[F] \quad \text{Ecuación (55)}$$

$$\mu_N = \ln(\mu_F) - \frac{1}{2}\sigma_N^2 \quad \text{Ecuación (56)}$$

$$\sigma_N = \sqrt{\ln(1 + V_F^2)} \quad \text{Ecuación (57)}$$

$$V_F = \frac{\sigma_F}{\mu_F} \quad \text{Ecuación (58)}$$

$$\sigma_F = \sqrt{Var[F]} \quad \text{Ecuación (59)}$$

Donde:

μ_F = factor de seguridad general
 σ_F = desviación estándar del factor de seguridad general.

V_F = coeficiente de variación
 σ_N = desviación estándar de las variables
 μ_N = promedio de las variables
 β = índice de confiabilidad.

En caso de una distribución normal se debe seguir la siguiente metodología:

$$\sigma_F = \sqrt{Var[F]} \quad \text{Ecuación (60)}$$

Donde:

$$\sigma_F = \sqrt{Var[F]} \quad \text{Ecuación (61)}$$

$$\mu_F = E[F] \quad \text{Ecuación (62)}$$

Calculado los índices de confiabilidad se verifican en el cuadro 12 y se obtiene la probabilidad de falla, la cual cita Baltodano (2009) a US Corps of Engineers.

CUADRO 12. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD Y PROBABILIDAD DE FALLA (BALDODANO, 2009)		
Nivel de Desempeño	Índice de confiabilidad	Probabilidad de falla
Alto	5	2.871×10^{-7}
Bueno	4	3.169×10^{-5}
Superior al Promedio	3	0.00135
Inferior Al Promedio	2.5	0.00621
Pobre	2	0.02275
Insatisfactorio	1.5	0.06681
Peligroso	1	0.15866

Inclinómetro

El inclinómetro marca Vishay modelo P-350A es un equipo que toma las medidas de deformación horizontal de un terreno. Para la utilización de dicho equipo se debe introducir el sensor por la tubería guía, de manera que se va bajando el mismo por ésta y registra lecturas cada cierta distancia. Esta información se anota y, con días de medición distintos, se puede saber si el terreno presenta algún desplazamiento graficando en una misma hoja las dos mediciones. El detalle del equipo se encuentra en el manual, en la sección de anexos. A continuación se presenta el procedimiento simplificado del uso del equipo. (Vishay Instruments , 1978).

Mediciones estáticas

- 1) Conecte el aparato (s) como se muestra en la placa dentro de la tapa.
- 2) Seleccione la posición adecuada del selector de puente, completo o medio / cuarto.
- 3) Ajuste el disco de factor de calibre como se desee para el calibre en particular y / o aplicación y bloquee.
- 4) Gire la perilla de sensibilidad totalmente a la derecha (para la sensibilidad máxima)
- 5) Gire el mando grande de recalibración hacia la izquierda para llevar una lectura del contador de "0000".
- 6) Gire la perilla de extensor de alcance a "+" (sin cifras)
- 7) Presione el botón de encendido para BAT o de CA. Este último requiere la instalación del cable de la línea 115 VAC.
- 8) Gire el interruptor de palanca de balance a encendido.
- 9) Con una condición sin carga sobre la probeta, gire la perilla de balance para llevar a cero el medidor (a la derecha para mover el puntero hacia la derecha). Bloquee la perilla. Si no es posible anular el medidor con el control de balance, bloquee el control en cualquier posición y utilice el mando grande de recalibración para obtener la nulidad de conformidad

con el párrafo 11. Registre la deformación de signo contrario y la lectura de esta condición sin carga. Reanudar las instrucciones con el párrafo 10.

- 10) Cargue la muestra de ensayo como se desee. Para los procedimientos que siguen se supone que ha sido anulado el contador a deformación 0000 antes de la aplicación de una carga.
- 11) Si el medidor se desvía a la izquierda, gire el mando grande de recalibración hacia la derecha hasta que el medidor llegue a cero. Lea el contador de deformación y el signo. Si el medidor sigue siendo a la izquierda en plena lectura del contador, gire la perilla de rango extensor de las agujas del reloj hasta que el puntero se mueva metros a la derecha; gire la perilla grande de recalibración hacia la izquierda en cero. Si el medidor se desvía a la derecha, gire el extensor de alcance hasta que se mueva el puntero a la izquierda. A continuación, gire la perilla grande de recalibración en sentido horario para obtener un valor nulo. Lea el contador de deformación y el signo.
- 12) Si el contador de deformación indicó "+" eso quiere decir que se encuentra en tensión, pero si indica "-" se está produciendo una compresión. Para aquellos casos sin carga, en que el medidor se anuló sólo usando el mando grande de recalibración, se deben anotar las lecturas de deformación y signo que se obtuvieron para la carga cero. La carga de prueba debería utilizarse ahora y seguir realizando los procedimientos de anulación en el medidor. En estas condiciones, la deformación se calcula de la siguiente forma: Deformación = lectura final – lectura sin carga.

Resultados

Los resultados que se presentan en esta sección son los correspondientes al talud. Estos se presentan de acuerdo con una secuencia lógica y de ejecución. Existen resultados complementarios, los cuales se presentan en la sección de apéndices.

El modelo geotécnico que se presenta a continuación fue realizado con base en las perforaciones SPT realizadas en el talud y las características de los suelos de los estratos, tal como el peso específico, obtenido directamente del estudio de suelos, la cohesión y ángulo de fricción, obtenidos de correlaciones de acuerdo con los golpes promedio por estrato.

Modelo geotécnico

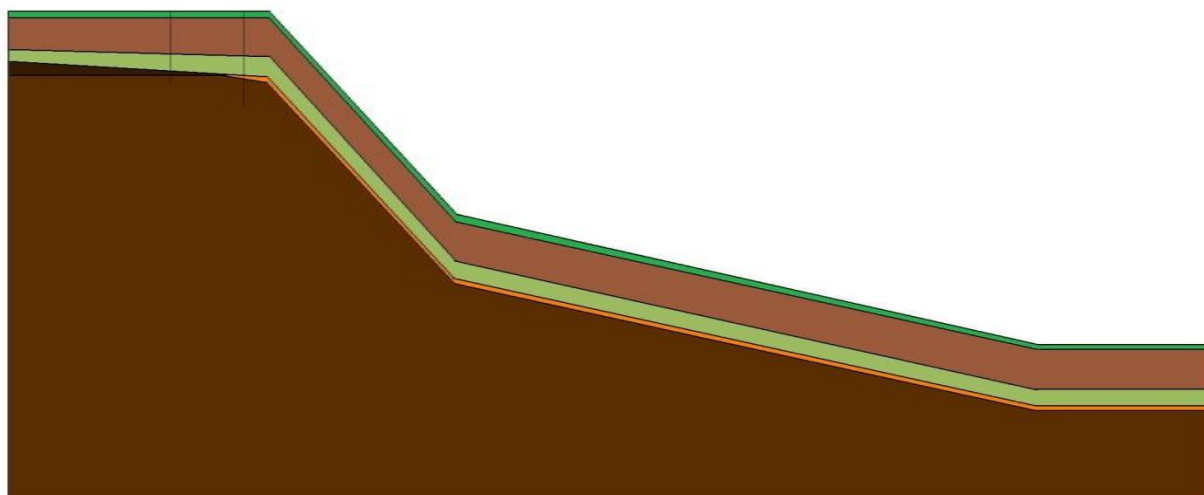


Figura 25. Modelo geotécnico para el talud ubicado en las Nubes de Coronado.

CUADRO 13. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE LOS ESTRATOS PRESENTADOS EN EL MODELO GEOTÉCNICO. (GEOAM & AUTOR, 2010)					
I D	Descripción	Espesor	y	c	Φ
		m	Ton/m ³	Kpa	(°)
	Limo color café oscuro con pintas rojas	0,55	1,7	55	29
	Limo color café claro	2,70	1,7	95	32
	Limo arcilloso café	0,90	1,7	95	32
	Limo color café con pintas amarillas y rojas	0,45	1,7	95	32
	Limo arcilloso color café oscuro	1,35	1,7	95	32
	Limo color café claro	Desconocido	1,8	120	38.5

Pruebas de Laboratorio

Además del estudio de suelos, se realizaron pruebas de laboratorio para obtener datos más específicos de cada uno de los estratos del suelo, sobre los que se van a construir en un futuro las cimentaciones.

Granulometría

Se determinó la granulometría del suelo usando el método del tamizado y se obtuvo la curva granulométrica y la clasificación del suelo según SUCS. Ver cuadro 14 y figuras 26 y 27.

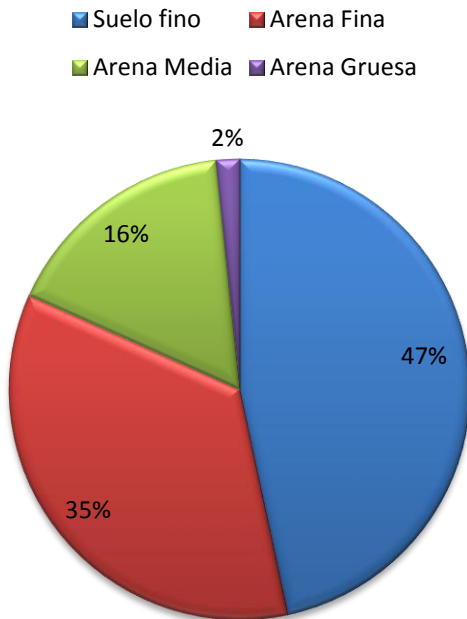


Figura 26. Composición del suelo

CUADRO 14. COMPOSICION GRANULOMETRICA			
Tipo	Tamaño	Rango (mm)	Porcentaje
Arena	Gruesa	2 – 0,6	1,65%
	Media	0,6-0,2	16,64%
	Fina	0,2 – 0,06	35,07%
Limo	Grueso	0,06 – 0,02	-
	Medio	0,02 – 0,006	-
	Fina	0,006 -0,002	46,65%

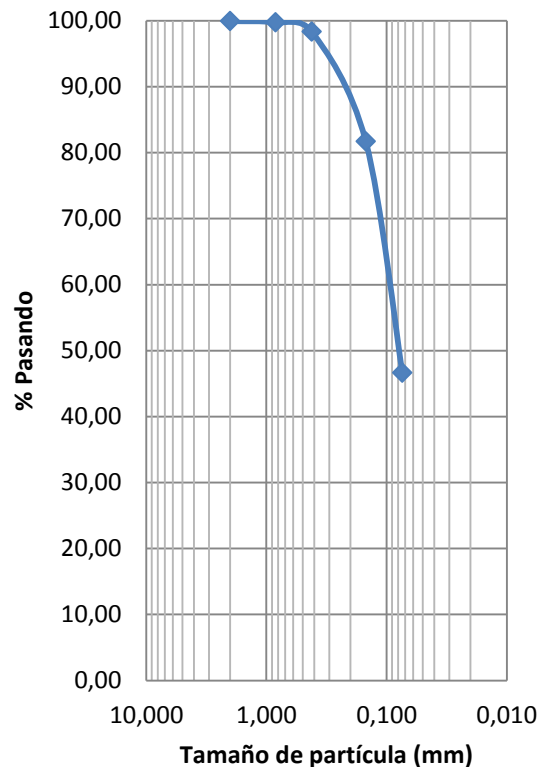


Figura 27. Curva Granulométrica del suelo

Límites de Atterberg

Se realizaron ensayos para determinar el límite líquido y el límite plástico del suelo en estudio y a partir de estos, clasificar el suelo usando la carta de plasticidad. El límite líquido se obtuvo usando el método de un punto.

CUADRO 15. DETERMINACION DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Número de Golpes	20
Número de Bandeja	59
Peso de la Bandeja	6,719
Peso Húmedo + Bandeja	17,746
Peso Seco	14,406
Contenido de humedad (%)	43,45
Límite Líquido	42

El límite plástico no se logra determinar, ya que no se pudieron formar los bastoncitos del tamaño estipulado por la norma. Por lo que el suelo se declara como no plástico. Ver cuadros 15 y 16 y figura 28.

CUADRO 16. LÍMITES DE ATTERBERG

Límite Líquido	42
Límite Plástico	NP
Índice de Plasticidad	NP
Clasificación SUCS	SM

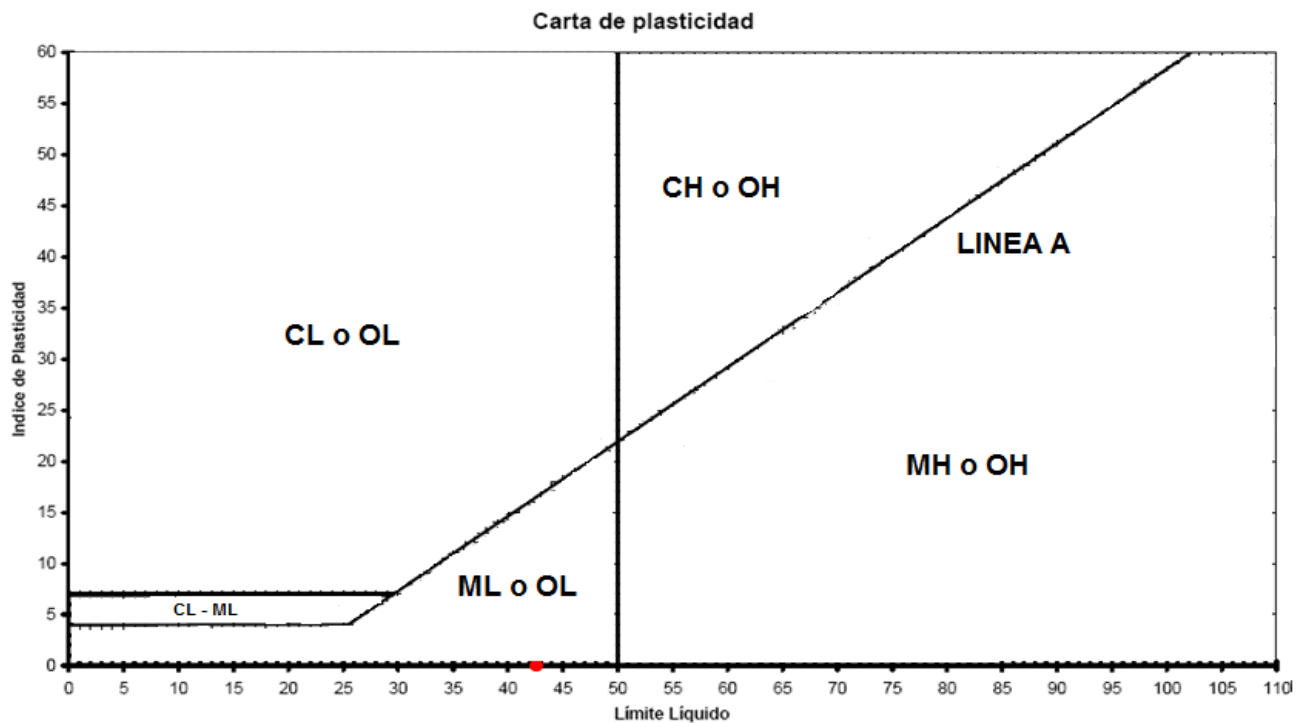


Figura 28. Determinación de la clasificación SUCS usando la carta de plasticidad.

Sedimentación

En la prueba de sedimentación no se apreció una diferencia de suelos, por el contrario, se ve una sola masa de suelo de un mismo tamaño. Este ensayo se hizo para verificar de la existencia de más de un tipo de suelo. En las figuras 29 y 30 se presentan las fotografías que muestran el resultado de dicho ensayo.



Figura 29. Prueba de sedimentación realizada al suelo en estudio.



Figura 30. Comportamiento del suelo en prueba de sedimentación.

Prueba Proctor modificado

Con este ensayo se determina el máximo peso volumétrico seco y la humedad óptima del suelo para una determinada energía de compactación. Los resultados obtenidos se utilizan para ampliar la caracterización del suelo y no tienen injerencia en el desarrollo del proyecto. Ver figura 31 y cuadro 17.

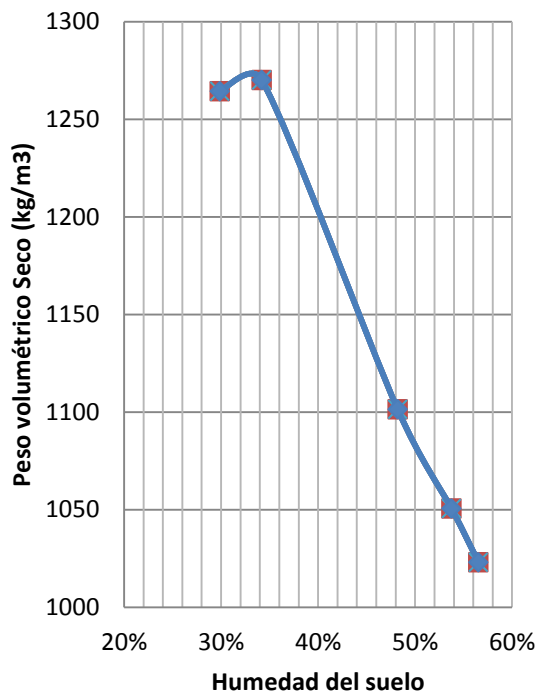


Figura 31. Curva de compactación usando el método de Proctor modificado

CUADRO 17. PESO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA	
Peso Volumétrico Seco Máximo (kg/m ³)	1275
Humedad óptima (%)	32,4

Gravedad específica (suelo)

Debido al contenido elevado de limo se realizó la prueba de gravedad específica para suelos. Ver cuadro 18.

CUADRO 18. GRAVEDAD ESPECIFICA	
Clasificación SUCS	SM
Masa del picnómetro lleno de agua a la temp de ensayo (g)	349,55246
Masa promedio del picnómetro (g)	100,75

Temperatura del ensayo (°C)	23
Densidad del agua a la temp del ensayo (g/cm ³)	0,99754
Volumen de calibración (cm ³)	249,8
Masa de suelo seco (g)	45,73
Gravedad específica (Gs)	2,60

Corte directo

La prueba de corte directo, consolidado drenado, se realizó para tres cargas distintas: 4, 8 y 16 kg. Utilizando el software de la empresa Humboldt se realizó la prueba y se obtuvo que la cohesión del material es de 60 kPa aproximadamente y el ángulo de fricción es de 25°, esto para una muestra inalterada de suelo extraída a 0,5 m de profundidad.

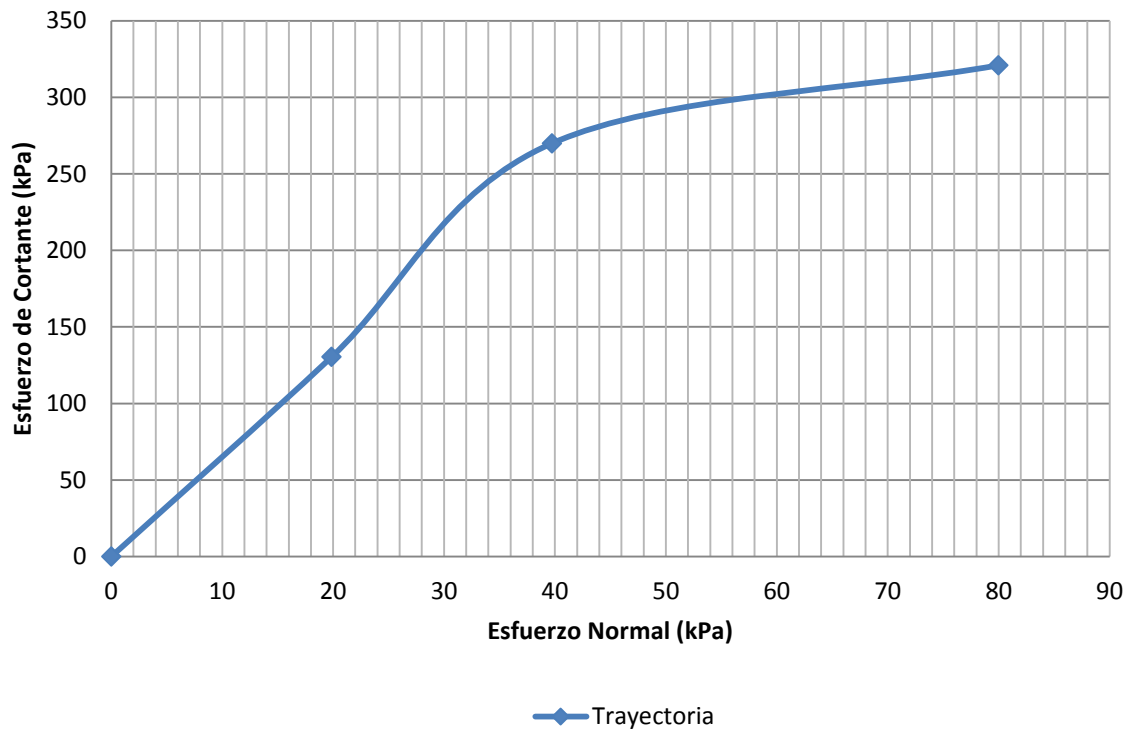


Figura 32. Resultados de la prueba de corte directo.

Construcción del modelo

A continuación se presentan los elementos necesarios para la realización del modelo geotécnico, tales como la geometría del talud y el cálculo de perforaciones.

Topografía

La determinación de la altura del talud es fundamental, ya que es un valor importante a la hora de realizar el modelo para el análisis de estabilidad. Ver figura 33 y cuadro 19.

Estación	(+)	AI	(-)	Elevación
BN1	0.257			1000.000
		1000.257		
PC1	0.082		3.883	996.374
		996.456		
PC2	0.103		3.973	992.483
		992.586		
PC3	0.388		3.763	988.823
		989.211		
PC4	0.255		3.887	985.324
		985.579		
PC5	0.081		3.886	981.693
		981.774		
PC6	0.113		3.952	977.822
		977.935		
PC7	0.739		3.442	974.493
		975.232		
PC8			3.452	971.780
Diferencia de altura (m)			28.220	

Figura 33. Determinación de la altura del talud.

CUADRO 19. GEOMETRÍA DEL TALUD	
Corona del talud (m)	21 m
Altura (m)	28 m
Longitud del talud en su cara(m)	62 m

Perforaciones

El cálculo de las perforaciones se realizó usando el programa SLOPE/W® de la empresa GEOSLOPE®. Al programa se le introdujeron los siguientes parámetros mediante un análisis

retroactivo con el fin de determinar una superficie de falla a corto plazo.

CUADRO 20. PARAMETROS DE DISEÑO	
Métodos de análisis	Ordinario, Bishop, Janbú Modificado y Morgenstern - Price
Peso Unitario (KN/m3)	18
Angulo de Fricción (Grados)	0
Cohesión (KPa)	72

Con estos valores se determina la posible superficie de falla a corto plazo. A continuación el detalle de ésta.

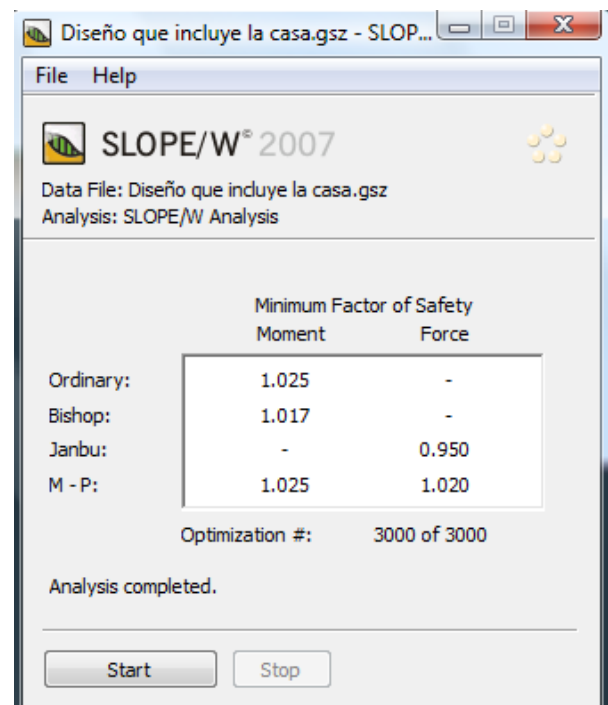


Figura 34. Factores de seguridad obtenidos usando diferentes métodos de análisis.

La profundidad de perforación se calcula usando el modelo realizado de manera que se traza una línea recta desde la superficie del talud hasta encontrar la superficie de falla. La longitud de dicha recta es la profundidad buscada. Las perforaciones fueron realizadas por la empresa GEOAM y el estudio de suelos producto de la

perforación se encuentra en la sección de anexos.

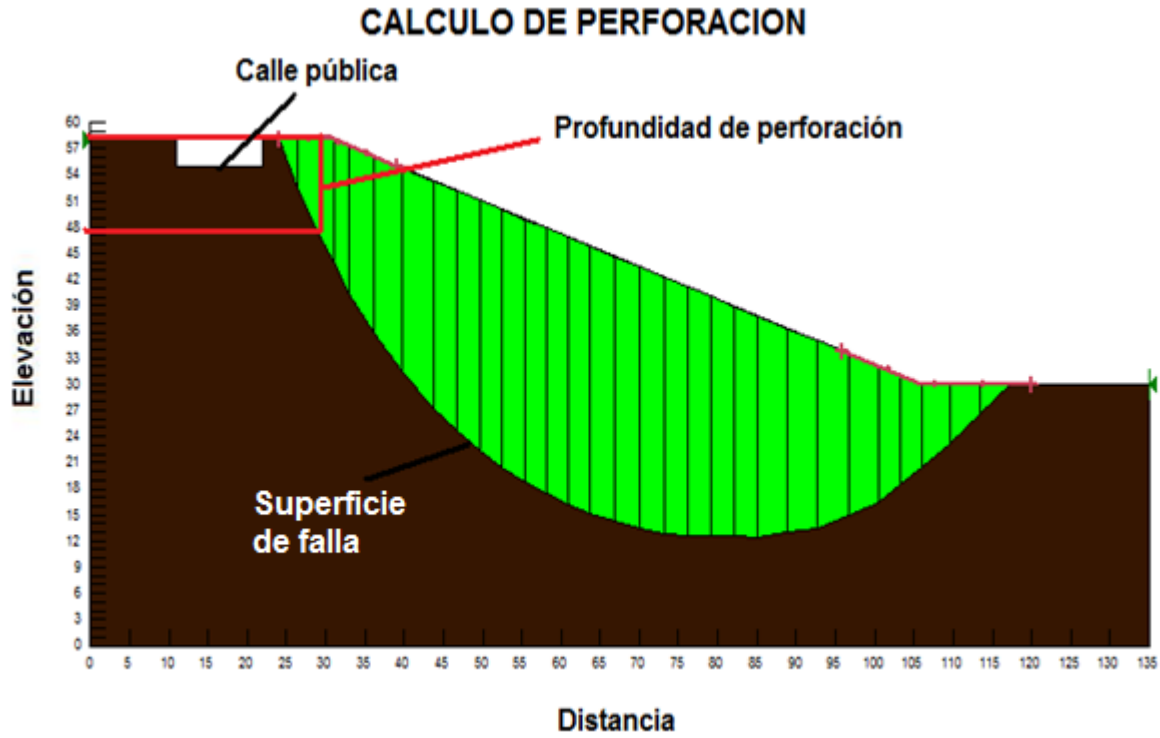


Figura 35. Determinación de la superficie de falla y de la profundidad de perforación en el talud en estudio.

CUADRO 21. DIMENSIONES PERFORACIONES	
Número de perforaciones	2
Tipo de perforación	SPT encamisada
Diámetro de perforación	3 pulgadas
Ubicación	Corona y pie
Profundidad (m)	8

Modelo precipitación

Para el modelo de la precipitación se usaron datos históricos de cinco estaciones cercanas al talud; junto a esto se hace un registro de precipitación semanal en el sitio. Con esta información y haciendo uso de la estadística, probabilidades y pronósticos, se obtiene el modelo de la precipitación.

Cada registro histórico de cada una de las estaciones meteorológicas fueron tomados de datos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Estos son datos mensuales de precipitación. En el cuadro 22 se presenta el registro de los primeros cuatro meses de la estación ubicada en Las Nubes. Estos registros completos se encuentran en la sección de Anexos de este documento.

Registro histórico

Las estaciones consideradas para el estudio son las ubicadas en Rancho Redondo, San Josecito de Heredia, Cascajal, Las Nubes y Coronado. Las dos primeras se encuentran en servicio, mientras que las demás no, mas son tomadas en cuenta debido a la cercanía con el sitio en estudio.

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril
1971				
1972	120			
1973	113.5	58	17	25
1974	12	14.5	0.5	39
1975	6.5	12.5	16	72.2
1976	92.5	5.5	3.5	0
1977	28.5	12.5	102.5	7.5
1978	30	4	13.1	7.5
1979	6.2	94	34	4.6
1980	34.7	6.3	29.1	227.9
1981	71.7	70.4	6.2	17.1
1982	30.4	33.8	22.8	108.7
1983	29.7	4	10.3	14.3
1984	187.7	18.3	64.3	17.6
1985	45	152.8	14.7	11.2
1986	114.8	34.7	2.1	11.3
1987	78.9	32.9	149.5	25.7
1988	183.5	23.7	6.8	73
1989	12.2	11.2	49.6	32.3
1990	39.1	64.5	22.2	33.2
1991	5.4	7.8	36.1	46.8

Precipitación registrada entre octubre 2009 - marzo 2010 en el talud

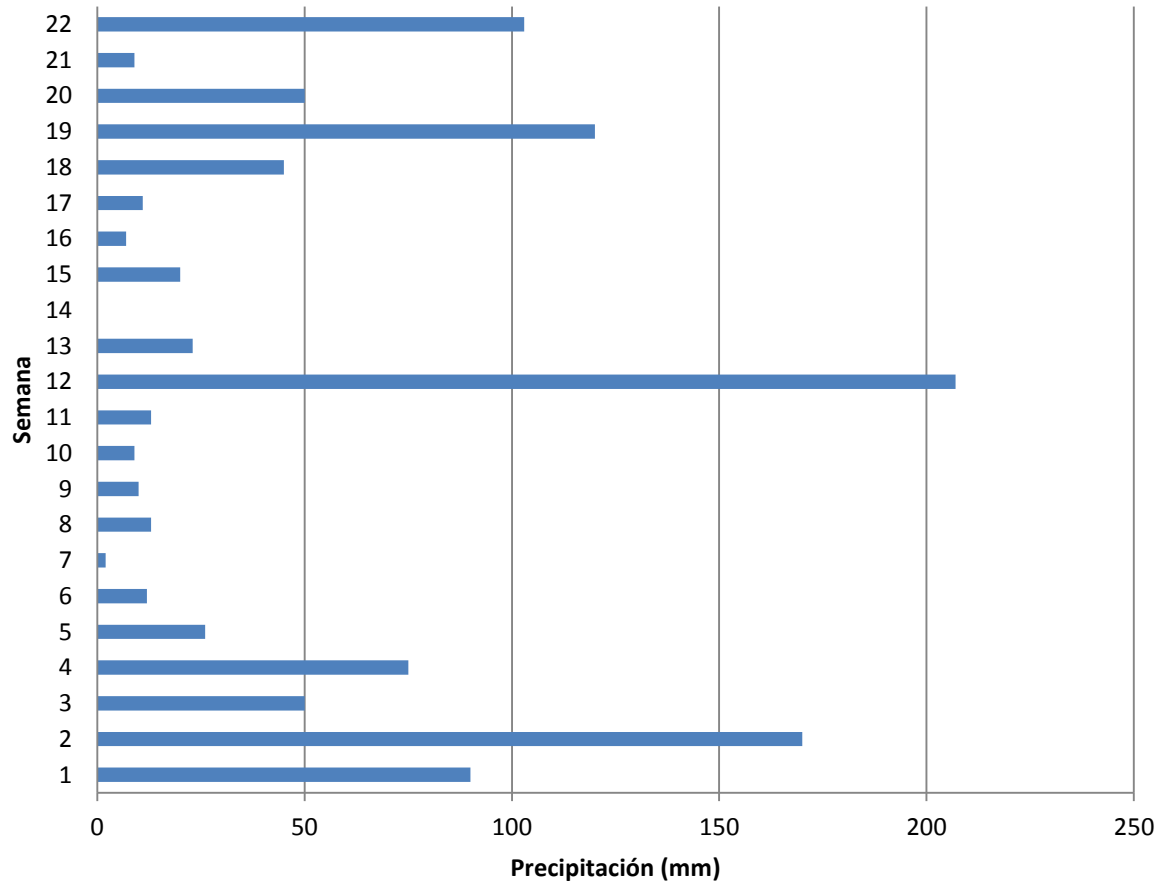


Figura 36. Registro de la precipitación ocurrida en el talud en el periodo 27 de octubre 2009 – 22 de marzo 2010. (Ref. Autor).

Pronóstico

Los pronósticos que se realizaron en este trabajo se basaron en dos métodos. Uno de ellos es la media móvil y el otro es el de índices de estacionalidad. En el cuadro 23 se presentan los pronósticos para el talud para el año 2010 usando la metodología de índices de estacionalidad en el cual se utilizaron los datos obtenidos en el pluviómetro instalado en el talud.

Mes	Precipitación (mm)
Enero	243,00
Febrero	83,00
Marzo	170,00
Abril	210,01
Mayo	222,79
Junio	235,57
Julio	248,34
Agosto	261,12
Septiembre	273,90
Octubre	286,68
Noviembre	299,46
Diciembre	312,24

Esta metodología se aplicó para el pronóstico semanal y se obtuvieron errores considerados como aceptables ($E < 10\%$), debido a la variabilidad del fenómeno que se estaba midiendo. La calibración del modelo se realizó con el objetivo de obtener pronósticos más certeros. La carencia de una base de datos más amplia afecta la variación de los errores

calculados. Tal como se puede ver en la semana 2 del mes de marzo del 2010, ver cuadro 24, en el que error de la semana disminuyó al igual que el error total del mes.

Sin Calibración					
Semana	1	2	3	4	Total
Real (mm)	120	50	9	103	282
Pronostico (mm)	26,0	33,5	14,4	16,4	90,3
Error (%)	-362	-49	37	-527	-212
Calibrando semana 1					
Semana	1	2	3	4	Total
Real (mm)	120	50	9	103	282
Pronostico (mm)	48,5	50,1	21,5	24,6	144,8
Error (%)	-147	0	58	-318	-95
Calibrando semana 2					
Semana	1	2	3	4	Total
Real (mm)	120	50	9	103	282
Pronostico (mm)	52,5	51,2	23,3	26,6	153,7
Error (%)	-129	2	61	-287	-84
Calibrando de todo el mes					
Semana	1	2	3	4	Total
Real (mm)	120	50	9	103	282
Pronostico (mm)	64,9	63,4	24,8	44,1	197,2
Error (%)	-85	21	64	134	43

Pronóstico usando la media móvil

Debido a las mediciones mensuales, el método de la media móvil es el más indicado para realizar el pronóstico semanal. En el cuadro 25 se presenta el pronóstico semanal usando la media

móvil. Utilizando este método, se apreció la sensibilidad del mismo ante cambios bruscos de precipitación. En estos cambios el error aumentó considerablemente.

CUADRO 25. PRONÓSTICO SEMANAL USANDO EL MÉTODO DE MEDIA MOVIL

Mes	Semana	Pronóstico (mm)	Precipitación real (mm)	Error (%)
Octubre	4	-	90	-
Noviembre	1	-	170	-
	2	103.3	50	52
	3	98.3	75	24
	4	50.3	26	48
Diciembre	1	37.7	12	68
	2	13.3	2	85
	3	9.0	13	-44
	4	8.3	10	-20
	5	10.7	9	16
Enero	1	10.7	13	-22
	2	76.3	207	-171
	3	81.0	23	72
	4	76.7	0	100
Febrero	1	14.3	20	-40
	2	9.0	7	22
	3	12.7	11	13
	4	21.0	45	-114
Marzo	1	58.7	120	-105
	2	71.7	9	30
	3	59.7	50	85
	4	54.0	103	-91

Comportamiento de la precipitación Las Nubes

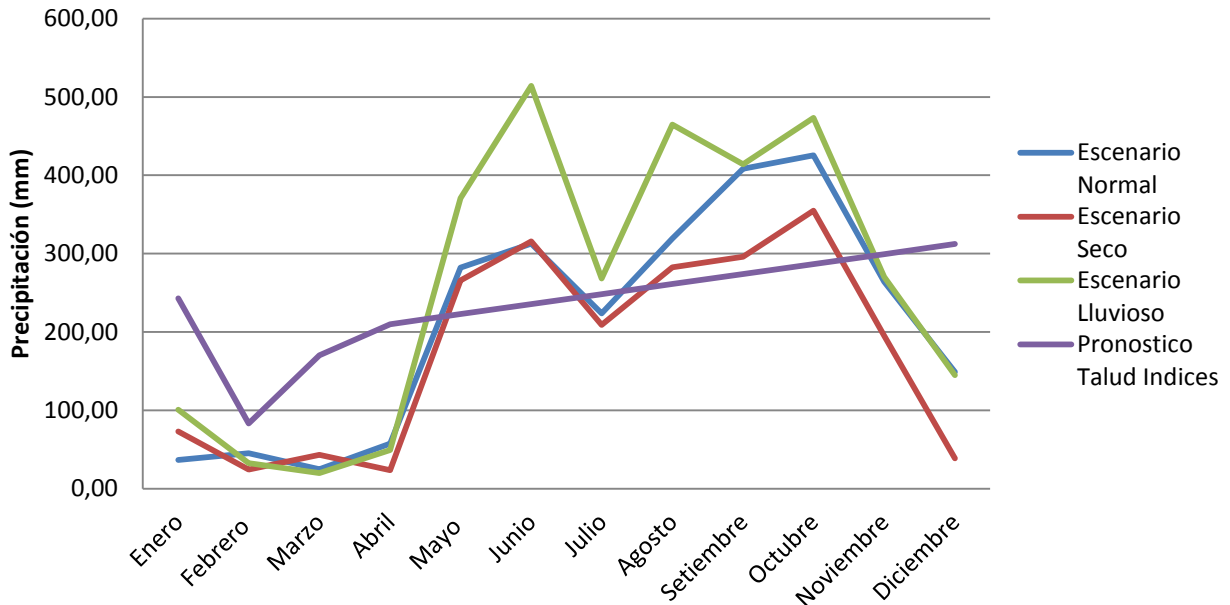


Figura 37. Ubicación del pronóstico de precipitación, utilizando el método de índices de estacionalidad, en la metodología de escenarios del IMN. (Fuente: Cuadro 23 y registro de precipitaciones mensuales de la estación meteorológica Las Nubes).

Modelo del esfuerzo de succión

Con la granulometría del suelo (SM), se obtiene la succión teórica del suelo usando la metodología propuesta por Perera (1999). Esta curva varía según la plasticidad del suelo.

En las figuras 38 y 39 se presentan las curvas tanto para suelos no plásticos como plásticos. Esta última curva se basa en datos provistos por el estudio de suelos.

Curva característica suelo-agua teórica suelo no plástico

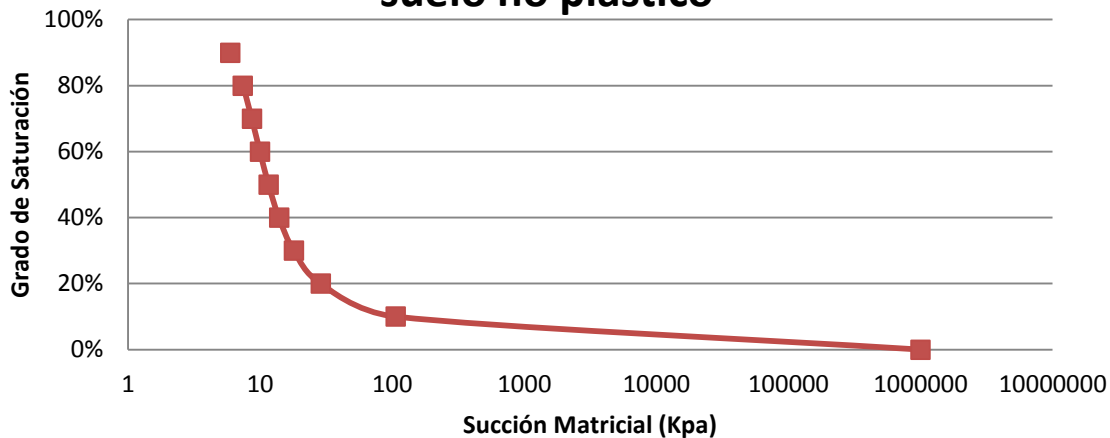


Figura 38. Curva teórica Característica Suelo – Agua para un suelo no plástico.

Curva Característica Suelo-Agua Teórica Suelo Plástico

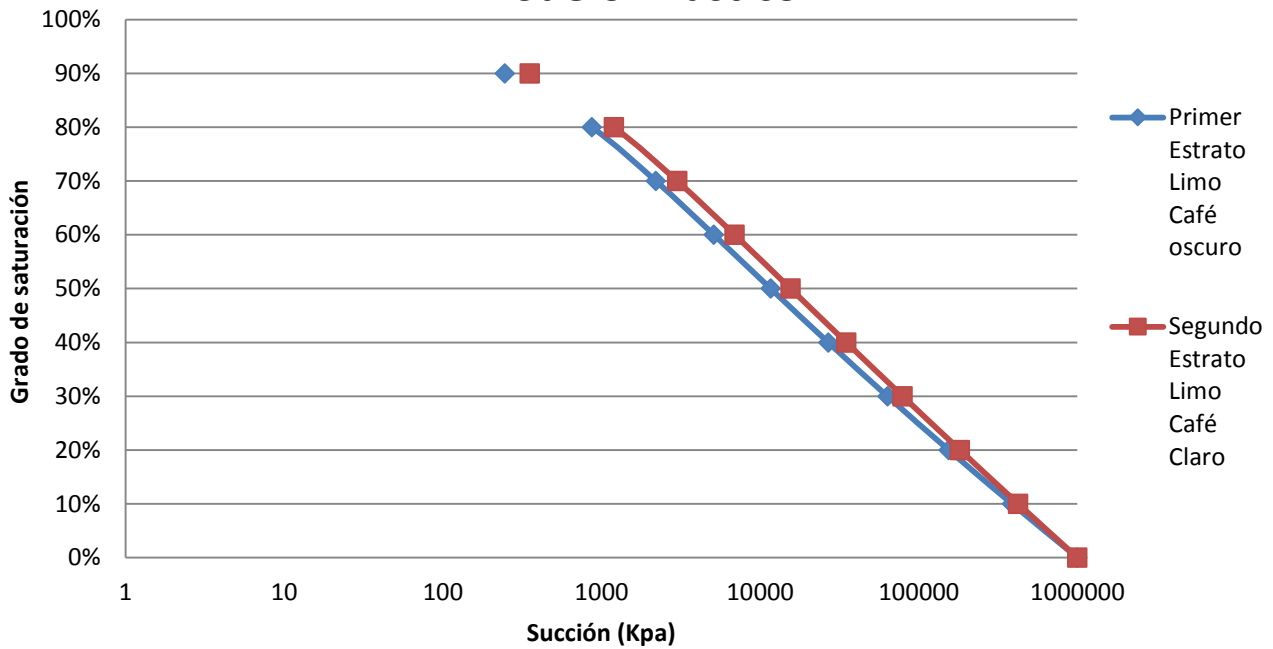


Figura 39. Curva Característica Suelo – Agua Teórica para los primeros estratos del talud.

Haciendo uso de un tensiómetro y de una muestra inalterada del suelo del talud se obtuvo una curva suelo – agua experimental. La curva se completó haciendo uso de la ecuación de mejor ajuste. Ver figura 40.

Esta curva tiene similitud a la curva características de un suelo no plástico, coincidiendo con la clasificación del suelo.

Curva característica suelo - agua experimental

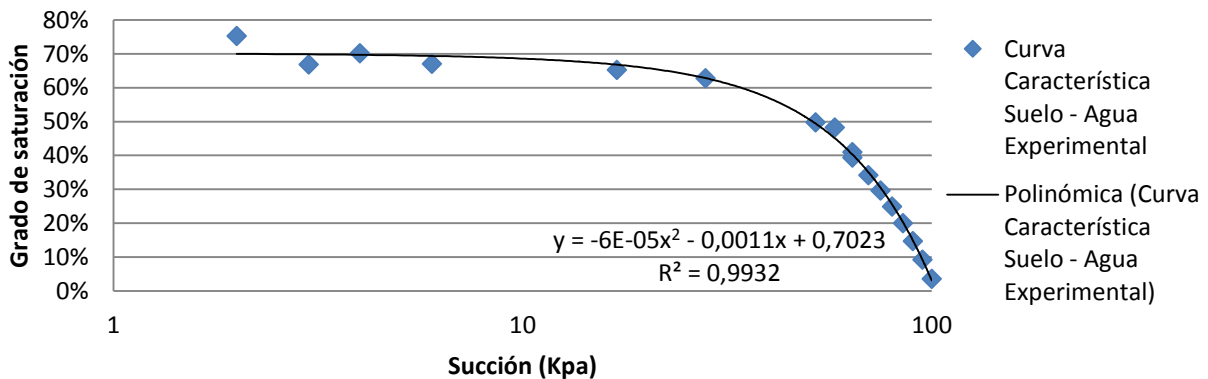


Figura 40. Curva característica Suelo – Agua experimental obtenida usando un tensiómetro.

Relación lluvia - humedad

Haciendo uso de la metodología desarrollada por Schosinsky (2007), se calculó la humedad final del suelo haciendo uso de la precipitación mensual. Para cada una de las estaciones meteorológicas se realizó el cálculo. A continuación se presenta el cálculo de la humedad a partir de la precipitación pronosticada. Se tomó la información de las tablas provistas por Schosinsky (1999).

Para el cálculo de la retención de precipitación en el follaje, se toma el 12% recomendado por Schosinsky (1999) y se multiplica por la precipitación. Si este producto es mayor a cinco milímetros se usa este valor; en caso contrario se utiliza el valor de la precipitación.

En el cálculo de la infiltración, el coeficiente se obtiene de la suma de los coeficientes secundarios. Estos otros: coeficiente por pendiente, vegetación y textura, se obtienen de tablas provistas en Schosinsky (1999).

Para el coeficiente por pendiente se toma el que indica la pendiente mayor al 7%. El de vegetación, el que indica la cobertura con zacate mayor al 75%. Finalmente, el de textura, se toma el valor indicado en Schosinsky (1999) para limo arenoso.

La evapotranspiración se determina con la ecuación que involucra la temperatura media mensual y el porcentaje de horas de luz solar mensual descrita por Schosinsky (2007). La capacidad de campo y el punto de marchitez se obtienen de Schosinsky (2007) para un suelo limo arenoso.

En el cuadro 26 se presenta para el talud el comportamiento de la humedad a lo largo del año de acuerdo con la precipitación pronosticada.

CUADRO 26. CÁLCULO DE HUMEDAD A PARTIR DE LA PRECIPITACIÓN PRONOSTICADA USANDO EL MODELO PROPUESTO SCHOSINSKY (2007)

Mes	Precipitación (mm)	Humedad
Enero	243,00	31%
Febrero	83,00	22%
Marzo	170,00	18%
Abril	210,01	18%
Mayo	222,79	18%
Junio	235,57	19%
Julio	248,34	21%
Agosto	261,12	25%
Septiembre	273,90	30%
Octubre	286,68	31%
Noviembre	299,46	31%
Diciembre	312,24	31%

En la figura 41 se aprecia la relación directamente proporcional que existe entre el peso específico y la humedad del suelo. Este dato es importante para el análisis de estabilidad.

Influencia de la humedad en el peso específico del suelo

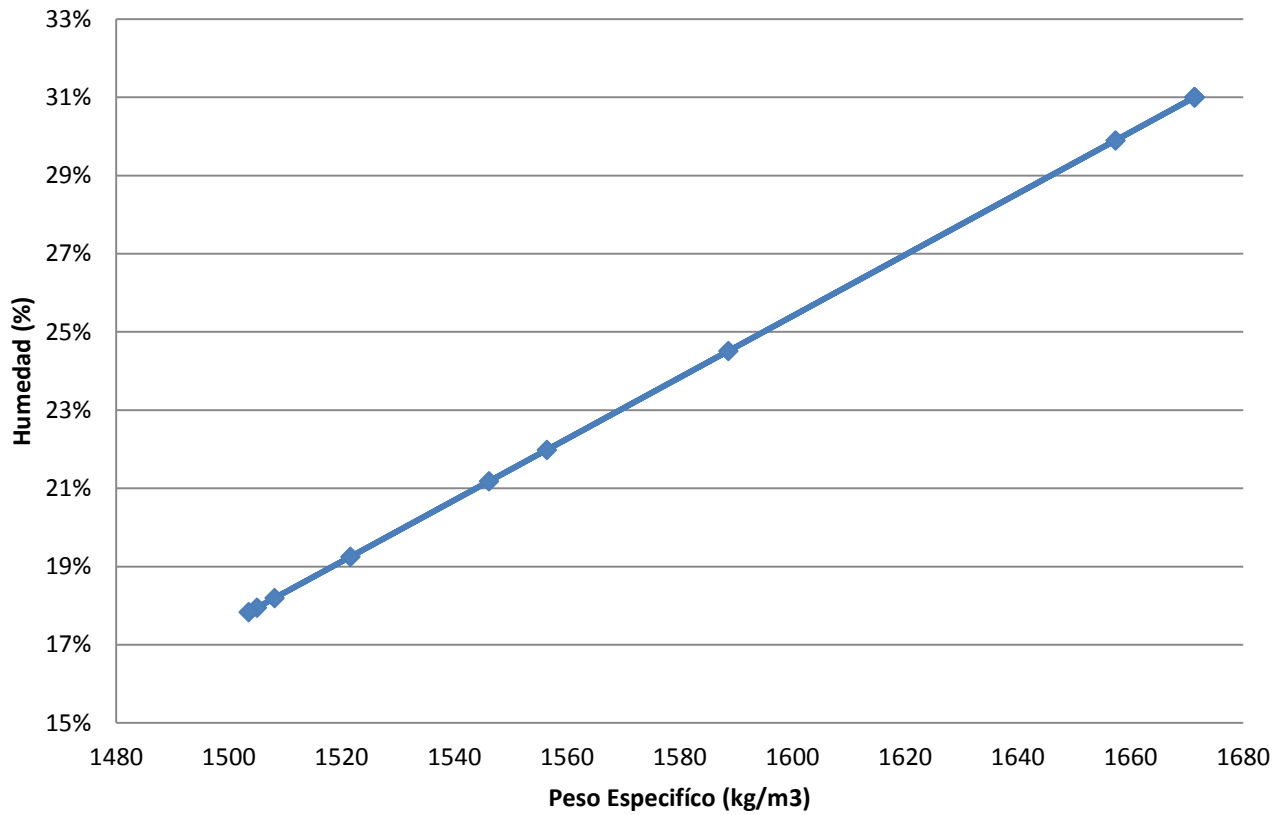


Figura 41. Relación entre el peso específico y la humedad

Modelo de estabilidad de talud

Análisis de estabilidad determinístico

Con los parámetros de resistencia calculados, se procede a realizar el cálculo de la estabilidad del talud. Este se realizó usando el método de las dovelas, el método de Fellenius y el método de Bishop. La evaluación del talud se realizó para todo el año, por lo que se utilizaron los datos mensuales indicados en las figuras 42, 43, 44 y 45.

Pronóstico de la precipitación

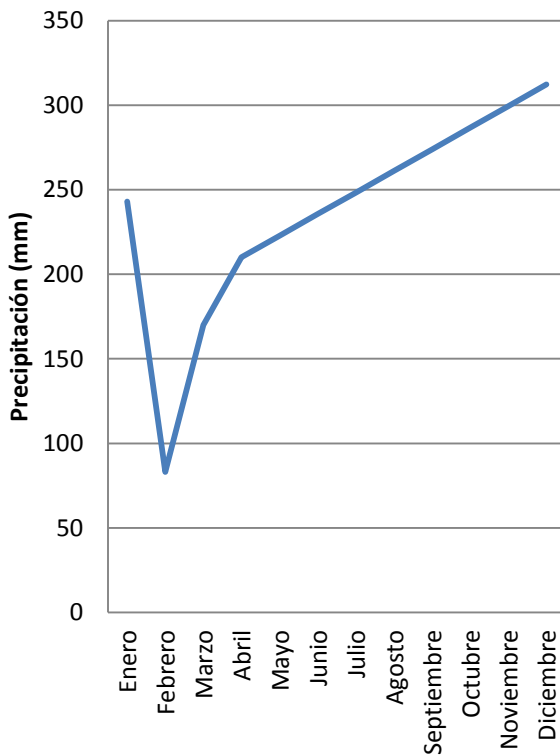


Figura 42. Precipitación pronosticada para el año 2010

Pronóstico anual de la humedad en el talud

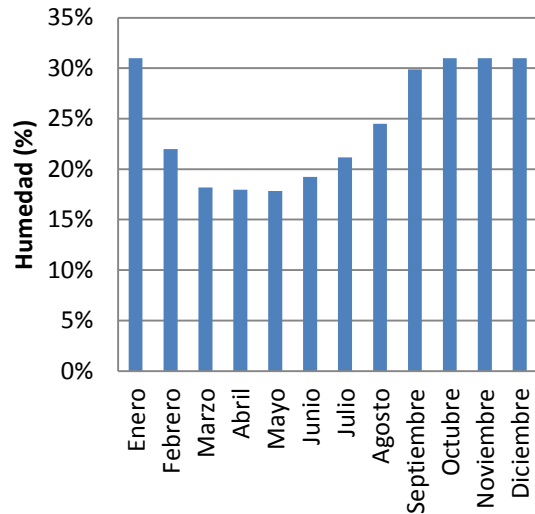


Figura 43. Comportamiento de la humedad pronosticada en el año 2010.

Pronóstico anual de la succión en el talud

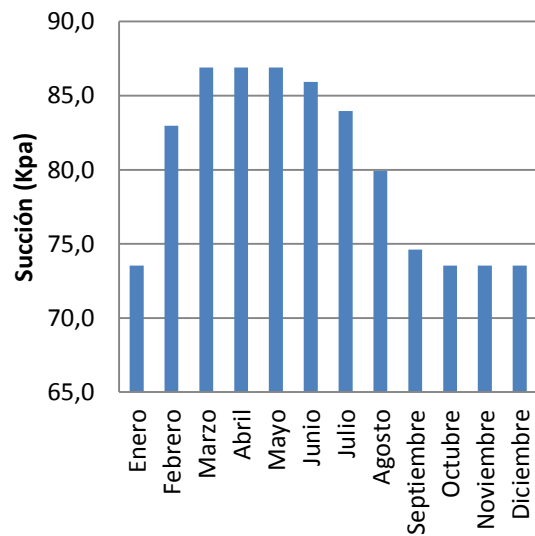


Figura 44. Comportamiento pronosticado de la succión en el 2010 a partir de la curva de succión medida con el tensiómetro.

Comportamiento anual del peso específico en el talud

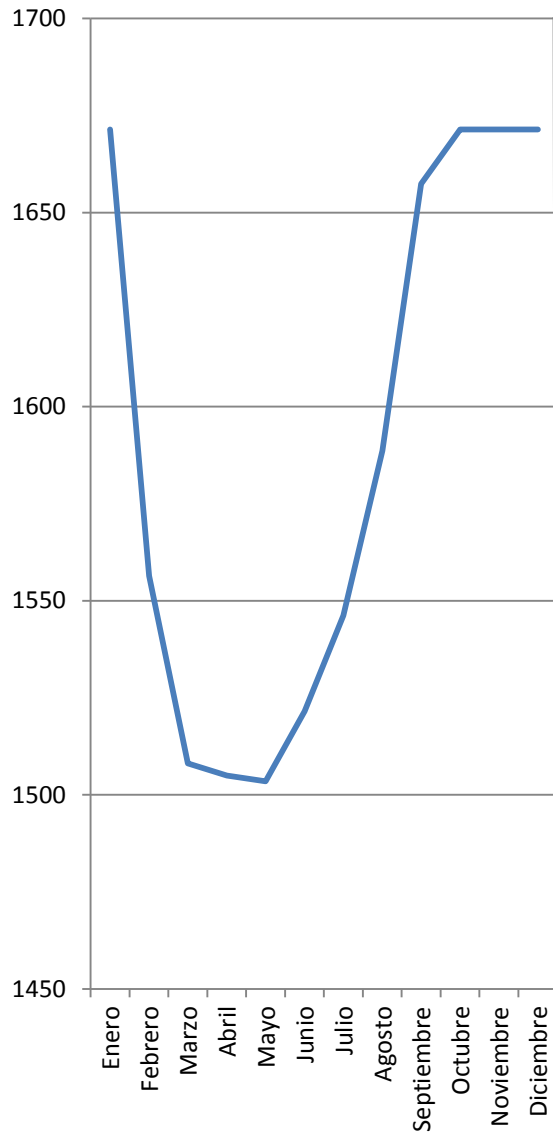


Figura 45. Comportamiento del peso específico en el año 2010.

Teniendo en cuenta todas las variaciones, se procede a realizar el cálculo de estabilidad variando la precipitación.

Influencia de la precipitación en el factor de seguridad para el año 2010

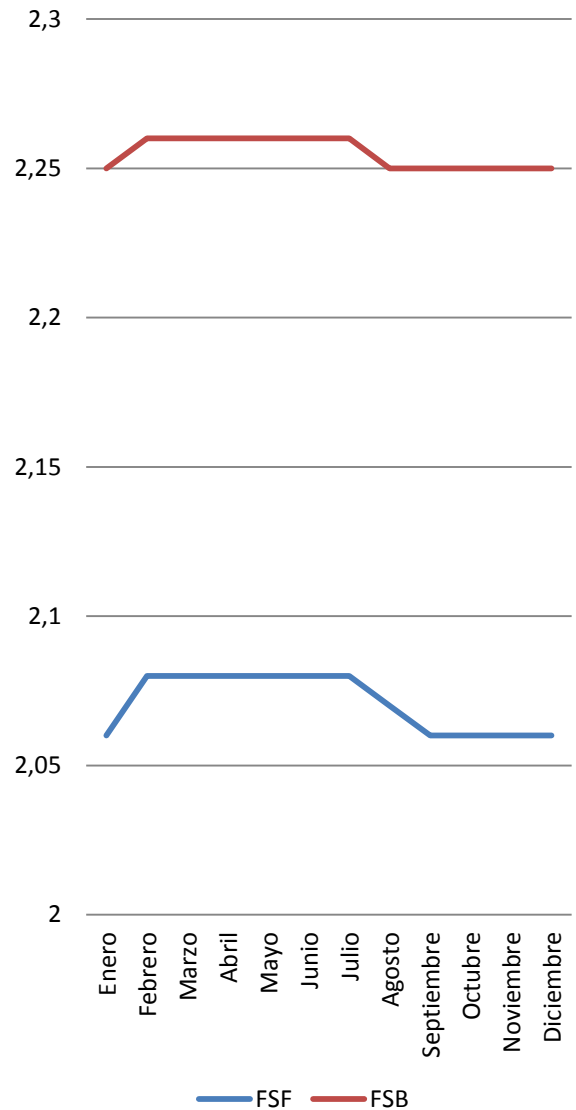


Figura 46. Variación en el factor de seguridad debido a la precipitación para el año 2010. (Nota: FSF = Factor de Seguridad Fellenius, FSB = Factor de Seguridad Bishop.)

La influencia del esfuerzo de succión en la estabilidad del talud se puede apreciar mejor en la variación del factor de seguridad. Su aporte en la cohesión del material es el que se evalúa.

La figura 47 muestra el efecto de la variación de la succión en el factor de seguridad para condiciones geométricas y condiciones de suelo específicas. Para este análisis se tomó dicha información del talud en estudio.

Efecto de la variación de la succión en el factor de seguridad

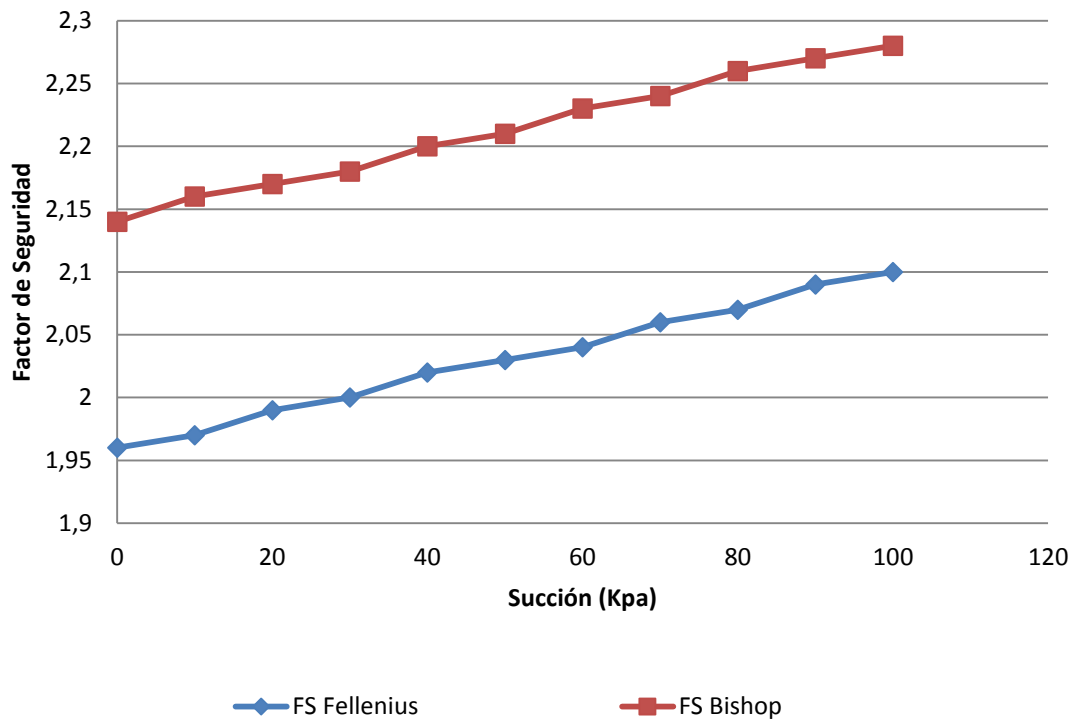


Figura 47. Efecto de la succión en el factor de seguridad.

Análisis de estabilidad probabilístico.

Usando el método de Rosenblueth se obtiene la probabilidad de falla, tomando como variables la succión y el peso específico, los cuales se manejaron usando un promedio y una desviación. Este método identifica dos variables: el peso específico y la succión. Ambos dependen de la humedad producida por la lluvia. Estos parámetros son parte importante en el análisis de estabilidad y de ellos depende el cálculo del factor de seguridad del talud. Cada uno tiene una desviación estándar y un promedio que va a generar cuatro combinaciones para el cálculo de factores de seguridad. Siguiendo el método propuesto por Rosenblueth (1975), se considera que no hay relación entre las variables, es decir, que no depende una de la otra; por lo que se usa un valor de ρ_{xy} igual a cero. Siguiendo el procedimiento se obtiene un índice de

confiabilidad que se asocia con una probabilidad de falla y con un nivel de desempeño. Baltodano (2009).

CUADRO 28. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PROBABILÍSTICO USANDO EL MÉTODO DE ROSENBLUETH PARA EL TALUD EN ESTUDIO

Número de variables	2	
Variable	Promedio	Desviación
Peso Especifico (kg/m3)	1600	100
Succión (kPa)	70	10
Índice de confiabilidad	6.9	
Probabilidad de falla	2.871 X 10-7	
Nivel de desempeño	Alto	

Análisis de resultados

El estudio realizado en el talud ubicado en Las Nubes de Coronado durante setiembre 2009 a marzo 2010 tiene la finalidad de determinar la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión y su participación en la estabilidad de taludes. Para ello se instrumenta haciendo uso de un tensiómetro, pluviómetro y de un inclinómetro, además de pruebas de laboratorio para la determinación de los parámetros de resistencia del suelo mediante pruebas de esfuerzo cortante.

El modelo geotécnico mostrado en la figura 25 se realiza basándose en los resultados obtenidos de la prueba SPT realizada por la empresa Geoam. La profundidad de las perforaciones SPT se calcularon haciendo uso del software slope/w® versión estudiantil de la empresa Geoslope®. Los parámetros utilizados para la determinación de esta profundidad de perforación se obtienen de pruebas de laboratorio realizadas a una muestra de suelo del talud obtenida a un metro de profundidad. Las pruebas de laboratorio realizadas fueron las de clasificación. Se obtuvo la granulometría del suelo, límites de Atterberg, gravedad específica y Proctor modificado.

La muestra de suelo obtenida se colocó en el horno y se dejó secando por 24 horas. Se realizó el cuarteo del material y se obtuvieron las cantidades necesarias para cada una de las pruebas. La primera de ellas realizada fue la de límites de Atterberg. La reacción del suelo durante la determinación del límite líquido evidencia el comportamiento del mismo ante la humedad. Al agregar agua a éste, absorbe el líquido y mantiene la consistencia sin importar la cantidad adicionada. Sin embargo, a la hora de colocar el material en la copa de Casagrande e

iniciar el mecanismo de la misma, el suelo reacciona de manera que el agua es expulsada y la falla del talud realizado en la copa se da con menos golpes del mínimo, lo que hace que la prueba sea rechazada y, por consiguiente, debe ser realizada nuevamente, mas se obtienen los mismos resultados, usando el método del multipunto, a pesar de la alta atención al contenido de agua de la muestra. El comportamiento del suelo es propio de un suelo colapsable, por lo que se cambia de metodología para la determinación del límite líquido por la de un único punto. Este límite se obtiene con dificultad y tiene un valor de 41. Además de la determinación del límite líquido, se prueba la plasticidad del suelo mediante la formación de bastoncitos de 1 cm. Luego de varios intentos se determina que el suelo es no plástico, debido a la imposibilidad de la formación de dichos bastoncitos. Esto hace pensar en la presencia de material granular y bajo contenido de arcilla.

Seguidamente se realiza la granulometría del suelo mediante el uso de diferentes tamices. La composición del suelo en la figura 26 certifica el alto contenido de arena en la muestra, pero a su vez muestra que existe alto contenido de limo. La clasificación obtenida, según el sistema SUCS, es SM, arena limosa. Debido a que la proporción de limos y arena es muy similar, 46% y 54% respectivamente, se decidió realizar una prueba de sedimentación, la cual comprobó dicha condición, tal y como se puede apreciar en las figuras 29 y 30.

Esta clasificación del suelo permite realizar el cálculo de la profundidad de las perforaciones bajo condiciones de corto de plazo. En este tipo de análisis se utiliza el ángulo de

fricción igual a cero, se busca una cohesión que refleje la condición del talud actualmente, es decir, que no presenta deslizamientos ni otro tipo de inestabilidades, por lo que el factor de seguridad debe ser uno o superior. Además se supone un solo estrato del mismo material con un peso específico obtenido de tablas (Braja, 2001). La superficie de falla es la que determina la profundidad de la perforación; esta distancia se calcula desde la superficie del suelo hasta la superficie de falla. Para el talud en estudio se determinó que la profundidad de perforación debe ser de aproximadamente ocho metros.

La estratigrafía obtenida de las perforaciones, según lo muestra el cuadro 13, difiere de la caracterización realizada a la muestra obtenida a un metro de profundidad, ya que la clasificación del suelo y los límites de Atterberg son diferentes. Dicha diferencia puede radicar en que el sitio de exploración es otro, ya que la muestra fue tomada cerca de la calle y las perforaciones fueron realizadas en el borde y a seis metros del mismo, con dirección a la calle, en la corona del talud. La principal diferencia de los resultados es la plasticidad del material, ya que el estudio de suelos presenta índices de plasticidad altos, mientras que la prueba de laboratorio indica la nula plasticidad. En el campo además se realizó la prueba de los bastoncitos a humedad natural y se obtuvieron los mismos resultados que en el laboratorio, además se detectó que la muestra contiene un cierto grado de arcilla, ya que las huellas dactilares quedaron ligeramente manchadas por el suelo.

En la prueba de corte directo se obtuvo la cohesión y el ángulo de fricción debido a la succión para el primer estrato de suelo del talud. Los valores obtenidos se encuentran cercanos a los esperados. La diferencia entre los valores puede deberse a dos condiciones: el grado de consolidación de las muestras y el efecto de las correlaciones presentadas por Braja (2001) para el cálculo de estos parámetros a partir de ensayos SPT. Ante estas diferencias se deben usar los valores obtenidos de las pruebas de laboratorio.

El efecto de la consolidación está determinado por el periodo que se dejó consolidando. Cabe recordar que este procedimiento es la etapa previa al corte y de la cual se obtiene la velocidad de corte utilizando el t_{50} calculado de la curva de consolidación. La consolidación primaria es la de mayor importancia para este ensayo. Se fallaron pastillas con diferentes tiempos de consolidación, de hasta 20 horas, obteniéndose resultados similares. Este factor, el de consolidación, afecta en el cálculo de la cohesión- En la segunda muestra, la que se falló a 8 kg, fue donde se presentó un comportamiento peculiar, ya que a la hora del corte se presentó de forma normal un incremento en la resistencia al corte y rápidamente cae la resistencia; se deja cortando la máquina y aparece un segundo pico de resistencia, el cual fue mucho mayor al primero, hasta llegar a 54kg de fuerza cortante. Al alcanzar una deformación de aproximadamente el 20% del diámetro se produce la falla con una caída de la resistencia notable. Esto pudo haberse dado debido a un problema en la prueba o en la calidad de la preparación de la muestra. Para mayor detalle, estos resultados se encuentran en la sección de apéndices de este documento

La variación de los resultados obtenidos con respecto al ángulo y la cohesión también puede estar relacionada con que estos valores son obtenidos a partir de correlaciones con ensayos SPT (Braja, 2001). Éstas se dan para condiciones establecidas, tales como tipo de suelo y contenido de humedad, lo cual hace que los parámetros de ajuste varíen. Por eso la importancia de la realización de pruebas tales como el corte directo, las cuales determinan con buen grado de precisión los parámetros.

Paralelamente a la realización de las pruebas de laboratorio desde octubre del 2009 hasta marzo 2010 se tomaron medidas de precipitación mediante la instalación en campo de un pluviómetro de fabricación casera. Este fue formado a partir de una botella a la cual se le cortó la parte superior, que a su vez funcionó de embudo y como medio para el control de la

evaporación. Las medidas de lluvia se realizaron una vez por semana debido a la distancia al sitio en estudio. La precipitación requiere de un espacio de estudio mayor al realizado con el fin de determinar cierto patrón de comportamiento para cada mes del año. Además, para la proyección o pronóstico de precipitaciones, se debe tener una base histórica lo suficientemente extensa para contemplar los diferentes escenarios o fenómenos climáticos cíclicos, tales como el fenómeno de El Niño y el de La Niña.

El periodo de estudio de la precipitación es corto por lo que se decidió tomar en cuenta los registros históricos con que cuenta el Instituto Meteorológico de Costa Rica (IMN). La ubicación del talud es en las Nubes de Coronado, mas la estación ubicada en ese poblado no se encuentra vigente, por lo que se decide tomar en cuenta las estaciones ubicadas en Cascajal, siguiente poblado después de Las Nubes, y en la otra estación ubicada en Coronado. Ambas estaciones se encuentran discontinuadas. Ante esta situación se decide ampliar el radio de estudio y se toman las estaciones de Rancho Redondo y de San Josecito de Heredia, debido a que son las más cercanas y se encuentran en funcionamiento.

Estas estaciones meteorológicas cuentan con registros mayores a 10 años, por lo que se pueden determinar los comportamientos mensuales. Estos datos se procesaron y se les realizó un análisis estadístico en el que se determinó, mediante la elaboración de una distribución de frecuencias por mes, el comportamiento de los datos. Junto a esto, se desarrolló un método propio del IMN (Villalobos et al, 1997) en el que se agrupan los datos en tres escenarios: seco, normal y lluvioso. Estos procedimientos se pueden observar en la sección de apéndices de este documento. Sin embargo, no es suficiente conformarse con determinar el comportamiento de los datos y asignar una probabilidad para realizar el pronóstico de la precipitación, por lo que se implementó el método de la media móvil de tres periodos y el método de índices de estacionalidad.

Estos pronósticos tomaron como base de información las medidas recolectadas en el periodo de estudio y se ubicaron en los escenarios que se tomaron para cada una de las estaciones, tal y como se puede apreciar en la figura 37 para el caso del talud y para el resto de estaciones en la sección de apéndices. Ambos métodos se compararon y el margen de error tiene gran variabilidad; sin embargo, utilizando el método de índices de estacionalidad, ajustándolo con las medidas tomadas, se obtienen porcentajes de error inferiores al 5% e inclusive menores a 2%, tal y como se puede apreciar en el cuadro 24, en el que en la segunda semana de marzo se obtiene un error menor al 2%.

Ambos métodos son útiles dependiendo de las circunstancias en que sean empleados. El método de la media móvil es útil cuando se trabaja en periodos cortos y más recientes, pero con el mínimo cambio climático que se llegue a producir el margen de error aumenta considerablemente. Mientras que el método de la media móvil tiene mayor efectividad para periodos cortos, el método de índices de estacionalidad funciona cuando se tienen datos históricos suficientes, ya que esta formulación genera un índice de estacionalidad el cual amplifica o disminuye el promedio de precipitaciones según sea el comportamiento que tenga el mes a lo largo de la historia, por lo que la influencia de un cambio climático repentino, tal como un frente frío, que genera un aumento de precipitación, puede ser considerado hasta cierto punto. La precipitación pronosticada para el talud en el año 2010 en el cuadro 23 se obtiene haciendo uso de la metodología de índices de estacionalidad.

La siguiente etapa, posterior al modelaje de la precipitación, es determinar la humedad en el suelo debido a la respectiva lluvia. Para analizar este comportamiento existen dos maneras de conocer la humedad del suelo luego de un periodo de lluvia. Uno de estos métodos consiste en tomar muestras de suelo y determinar la humedad y así tratar de relacionar mediante ecuaciones el comportamiento del suelo. El

inconveniente de este método, desarrollado y puesto a prueba en este proyecto, es que para determinar la relación existente entre la precipitación y la humedad se hace necesario realizarlo diariamente durante un tiempo prolongado, en el que se pueda detectar el comportamiento en periodos secos y lluviosos. Esto debido a que la influencia de la evapotranspiración y escorrentía varían diariamente, lo que directamente afecta la humedad. Además de esta recomendación, la relación está limitada a la profundidad a la que sea tomada la muestra, ya que no se puede asegurar que el suelo se comportará de igual manera a una profundidad mayor, debido a que existen diferentes factores que hacen que la humedad varíe, tales como la presencia del nivel freático, retención del humedad, entre otros.

El otro método es el desarrollado por Schosinsky (2007), el cual, partiendo de la precipitación mensual en milímetros, la traduce en humedad mediante un balance hídrico de los factores que afectan la misma. Estos factores son: la escorrentía, filtración y la evapotranspiración. Como resultado final de este modelo se tiene la humedad al final del mes, tanto en milímetros de agua como en porcentaje a lo largo de un año. Este método propone tres estados de humedad: el punto de marchitamiento, el cual es el punto más bajo de humedad al que pueda estar el suelo; capacidad de campo, es el punto más alto de humedad el que pueda estar sometido el suelo sin estar saturado; y suelo saturado, es decir, con todos sus vacíos llenos de agua. Debido a que se desea buscar el contenido de humedad que se encuentra por encima del nivel freático, se descartó el suelo que se encuentra debajo del mismo, el cual, para facilitar cálculos, se supone saturado.

Una de las limitaciones de este método es que considera la humedad a la profundidad de las raíces, por lo que humedades a mayor profundidad se toman a capacidad de campo. Además de esta limitación se encuentra la del coeficiente de infiltración, ya que, a pesar de que se puede obtener de tablas, para obtener el valor

específico y representativo para el suelo se hace necesario realizar una prueba de permeabilidad para conocer el dato de forma directa. Otra limitación que tiene el método es la determinación de la capacidad de campo. La misma se puede obtener de la curva suelo – agua, sin embargo este proyecto se apegó a Schosinsky (2007): esta se determina por medio del porcentaje de peso seco y dependiendo del tipo de suelo. Tiene como límite superior 39% para un suelo arcilloso; sin embargo, al tomar una muestra de humedad en el talud, se determinó que la humedad era del 65% y según el estudio de suelos el rango de humedades de estratos más profundos es mayor al 40%, por lo que se cuestiona esta capacidad de campo. Cabe destacar que como todo modelo, este se basa en los resultados obtenidos para condiciones específicas, que al reproducirlos bajo otras condiciones los resultados esperados no siempre se adecuan a la perfección. Sin embargo, es una buena opción para considerar, ya que no existe mayor desarrollo del tema. En la figura 43, se aprecia para la lluvia pronosticada para el año 2010 el contenido de humedad calculado. Al estar en una zona altamente lluviosa es de esperar que el contenido de agua en el suelo se encuentre a capacidad de campo. Al realizar este análisis de humedad en el suelo con la información de precipitación de las estaciones meteorológicas, se observó que la estación de Cascajal tiene un comportamiento inverso, es decir, el suelo se encuentra mayormente en el punto de humedad más bajo posible según el registro de precipitaciones. Esta condición puede considerarse como un error del modelo, dado que en este punto de marchitez las plantas tienden a morir de asfixia, ya que sus poros se cierran completamente para retener el agua y esta situación se vería reflejada en el campo con la poca existencia de vegetación, ya que se supone un tipo de suelo dado de origen volcánico y de vegetación similar, ya que la diferencia de elevación no es considerable. El detalle de esta anomalía se encuentra en la sección de apéndices.

La humedad del suelo obtenida de la precipitación pronosticada mediante el método de índices de estabilidad, modifica ciertos parámetros del suelo, como el peso específico total y la succión. El peso específico total tiene relación directa con la humedad, tal y como se aprecia en la figura 41. A medida que aumenta la humedad el peso específico total crece linealmente. Al aumentar también tiene el inconveniente de que se aumenta el peso del talud, lo que puede desencadenar un deslizamiento.

La succión también se modifica al existir una variación en el contenido de agua en el suelo. Para el análisis de la succión se tiene un modelo teórico, el cual se verifica con el modelo experimental. El modelo teórico es propuesto por Perera (1999). Este se basa en la granulometría y la plasticidad del suelo. Al tener una divergencia con respecto a la plasticidad del suelo, se realizó la curva teórica para suelos no plásticos y para suelos plásticos, tal como se aprecia en las figuras 38 y 39. Cabe destacar que en la curva teórica para suelos plásticos mostrada en la figura 39 hay dos curvas. La diferencia entre ellas es el índice de plasticidad (IP). La línea de color rojo corresponde a la curva suelo – agua de un suelo con un IP mayor, de lo cual se deduce que a mayor IP mayor succión es posible desarrollar, a pesar de que la diferencia no es significativa. Se puede ver que en la figura 38 la curva suelo – agua correspondiente a un suelo no plástico tiene una pendiente fuerte hasta alcanzar succiones de magnitud 10^1 y posteriormente presenta una especie de cola, la cual se extiende hasta llegar a succiones de magnitud de 10^6 , mientras que la curva de un suelo plástico presenta una sola pendiente, la cual se extiende hasta succiones de magnitud 10^6 .

La succión experimental se calcula haciendo uso de una muestra inalterada y de un tensiómetro. El objetivo de esta metodología es generar una curva que relacione la succión con la humedad, ya que el instrumento únicamente permite tomar medidas de succión y no de humedad. Esta relación es importante ya que a

medida de que varíe la humedad va a haber más o menos succión. El método consiste en la obtención de una muestra inalterada de suelo y colocarla en un recipiente con un fondo poroso, el cual simula las condiciones normales del suelo. El suelo se deja saturando y posteriormente se coloca el tensiómetro. El proceso de saturación es diferente al convencional ya que al existir fondo poroso va a haber un drenaje, lo cual hace que este proceso deba realizarse utilizando continuidad en el flujo de agua que entra en la muestra. Este proceso de saturación tiene el inconveniente de que el punto de saturación completa es complicado de obtener, por lo que es probable que no se logre iniciar las mediciones en el punto 0 kPa de succión y saturación 100%. Esto hace que la curva de succión práctica comience con $S < 100\%$, lo que es una limitante para aquellas humedades superiores al punto inicial. Sin embargo, cabe destacar que las humedades altas conllevan esfuerzos de succión menores.

La curva suelo-agua mostrada en la figura 40 inicia en humedad correspondiente al 75%, por lo que para humedades superiores debe de utilizarse el modelo teórico. Al existir dos alternativas debido a la divergencia en la clasificación, se debe verificar el comportamiento de los datos. La figura 40 tiene cierta similitud con la curva mostrada en la figura 38, la cual corresponde a la del suelo no plástico, confirmando los resultados obtenidos en el laboratorio. Con esta curva suelo – agua propia del suelo, obtenida directamente, y la humedad calculada según la precipitación pronosticada, se puede tener por cada mes del año la succión esperada.

La estabilidad del talud depende de varios factores, entre ellos la geometría, sobrecargas impuestas, parámetros propios del suelo, condiciones de drenaje y condiciones climatológicas. Para determinar la influencia de la precipitación en el esfuerzo de succión en la estabilidad de taludes se debe correlacionar con el factor de seguridad, por lo que se debe realizar un análisis de estabilidad. El método desarrollado

para determinar este factor es el de equilibrio límite. Se divide el talud en diferentes secciones en las cuales se hace un equilibrio de fuerzas. Se utilizó el método de Fellenius y el método de Bishop para la obtención manual del factor de seguridad.

Para que se pueda evaluar la precipitación y su influencia, se deben asumir ciertas condiciones como constantes; en este caso se van a considerar la geometría, la sobrecarga y las condiciones de drenaje como tales. Se consideraron variables la precipitación y la succión. En la figura 42, se muestra el comportamiento de la precipitación pronosticada para el año 2010 y en la figura 43, se aprecia dicha precipitación convertida en humedad.

El aporte de la succión en la estabilidad del talud se encuentra a la hora de calcular las fuerzas resistentes que van a depender de la cohesión del material. A este esfuerzo se le adiciona la succión mediante la aplicación de un concepto llamado cohesión total, el cual es propuesto por Fredlund (1993). Este método consiste en sumarle a la cohesión la succión multiplicada por la tangente del ángulo de fricción debido a la succión. Tal como se aprecia en la figura 46, el factor de seguridad, sea calculado por Bishop o por Fellenius, tiene un comportamiento similar al apreciado en la figura 44, que contiene el comportamiento anual de la succión. El aumento del factor de seguridad se da en los meses donde la precipitación disminuye y por lo tanto la succión aumenta. Además esto involucra una disminución en el peso del talud, ya que el peso específico total disminuye.

En la figura 46 se analizó la influencia de la succión en el factor de seguridad. Efectivamente existe un aumento en dicho factor. Este aumento es de aproximadamente 8%. Con esto se comprueba que al no tomar en cuenta el esfuerzo de succión del suelo se deja de lado cierta resistencia dada por la cohesión aparente.

El diseño de taludes tomando en cuenta el modelo de saturación completa hace rechazar taludes que en condiciones de campo se

encuentran estables debido a que existe mayor incertidumbre en los parámetros empleados. Por lo que se buscan factores de seguridad altos.

El análisis de estabilidad que actualmente se realiza se trabaja con parámetros que son considerados con criterios conservadores debido a la procedencia de los mismo, es decir correlaciones, mientras que en pocos casos se realizan las respectivas pruebas para obtener dichos parámetros de resistencia de forma directa. Esto genera un aumento en el factor de seguridad debido al criterio conservador adoptado.

Al utilizar una metodología considerando el esfuerzo de succión se trata de llegar a diseñar taludes de forma más eficiente, con un precio adecuado y que permita llegar a conocer mejor la interacción que se da en el suelo bajo condiciones no saturadas, lo que conlleva a realizar diseños con mayor seguridad del análisis. Ciertamente debe existir una limitación con respecto al valor de succión tomado. Fredlund (1993) comenta que este límite debe ser 100 kPa aproximadamente. Si bien es cierto la succión es una de las encargadas de sostener el talud, no se pueden descuidar otros aspectos que desencadenan inestabilidad. Este esfuerzo debe considerarse como un apoyo adicional a las condiciones básicas que se toman en cuenta en un análisis convencional.

Además del análisis determinístico, se realizó un análisis probabilístico en el cual, haciendo uso del método de Rosenblueth (1975), se determinó una probabilidad de falla y un índice de confianza. Para ello se deben determinar las constantes y variables en el estudio. Tal como se mencionó previamente, las variables son la succión y el peso específico. Estas tienen relación entre sí, por lo que cada una de ellas cuenta con un promedio y una desviación estándar asumida por el usuario. El análisis probabilístico se encuentra poco desarrollado aún, sin embargo es de gran utilidad y de respaldo tener un valor que confirme o descalifique los cálculos realizados.

Entre las medidas de estabilización que se recomiendan utilizando esta metodología de succión es la del drenaje. La función fundamental de un drenaje es sacar agua del talud. A menor contenido de agua que se encuentre en el talud, beneficia de forma directa su estabilidad, ya que se disminuye el peso del mismo y las fuerzas de succión comienzan a actuar. En suelos como en el del sitio estudiado, que retienen suficiente humedad, el efecto de la succión se disminuye, por lo que es fundamental tener un buen sistema de drenaje en el talud, de manera que la precipitación que logra infiltrarse sea evacuada en el menor tiempo posible. De esta forma se ataca la fuente del riesgo y se trata de proponer una solución acorde con la situación expuesta. Esta se considera y se logra llegar a un manejo de la amenaza.

Dentro de las limitaciones existentes en este trabajo, está el periodo de análisis de humedad, el cual no permite desarrollar pronósticos con menor porcentaje de error. La variabilidad climática actual hace que la predicción sea irregular, tal y como se presenta en la figura 37, donde el pronóstico no calza en los determinados escenarios. El modelo de humedad, obtenido por Schosinsky (2007), como todo modelo, cuenta con sus limitaciones, y como lo expone el autor, se asumen condiciones tales como la anisotropía del suelo y las condiciones de humedad mínima y máxima, las cuales difieren de los valores tomados como referencia por el mismo método. A pesar de estas limitaciones se logra determinar la relación existente entre la precipitación y el esfuerzo de succión en la estabilidad de taludes. En términos simples, a medida que aumenta la lluvia va a existir una disminución en el esfuerzo de succión y en el factor de seguridad. La relación es inversamente proporcional. Esto aplica para ciertos rangos debido a la gran cantidad de variables, tal como la vegetación, contenido de humedad inicial, contenido de agua a capacidad de campo, geometría y evapotranspiración. No se logra determinar en una sola ecuación que tome en cuenta todas estas variables.

Este trabajo de investigación tiene como finalidad la preparación de herramientas que, a pesar de funcionar por separado, se pueden integrar sus resultados y resolver para las condiciones buscadas la estabilidad del talud, tanto de forma determinística como probabilística haciendo uso del método de Rosenblueth. Los resultados generales son los esperados previamente a la realización del estudio y, como fue detallado en esta sección, se indican las limitaciones de los diferentes modelos empleados para lograr determinar el factor de seguridad o probabilidad de falla del talud en estudio.

Con el uso del inclinómetro existe un inconveniente. El equipo no detecta mediciones. La prueba del equipo se realizó siguiendo las instrucciones del manual de uso, el cual puede ser consultado en la sección de anexos. Primeramente el equipo se sometió a una modificación con el fin de que pueda funcionar con corriente eléctrica. Seguido de esto, se siguieron las indicaciones hasta el punto en el que el equipo debe tomar la primera lectura. Para realizar esto, se debe neutralizar la aguja de manera que esta marque 0. Esto se debe realizar usando la perilla de balance. Esto no se pudo hacer ya que, por más que se giró la perilla, no hubo cambio alguno. Sin embargo, el manual indica que esta neutralización del equipo se puede realizar con la perilla grande. Se detectó movimiento, sin embargo no se puede neutralizar por completo.

Ignorando esto, se procedió a introducir el sensor en el tubo de PVC de prueba, el cual tiene 50 mm de diámetro SDR 17. No se registró ningún movimiento. Se procedió a la deformación del tubo mediante una prensa con el fin de comprobar el funcionamiento del equipo, sin embargo al introducir el sensor no existe ninguna medida. Se consultó el manual y se revisó la instalación y todo se encuentra en correcto funcionamiento. Se cree, por lo tanto, que el sensor del equipo es el que se encuentra dañado. Por lo delicado del sensor, se evitó desarmarlo, debido a que sus tornillos cuentan con una cabeza poco convencional y se desconoce el

funcionamiento interno de dicho sensor, por lo que se descartó el uso del mismo.

Este tipo de estudio es aplicable a cualquier talud, ya sea este de corte, relleno o natural, de forma que la instrumentación del talud y el respectivo monitoreo del mismo se conviertan en herramientas fundamentales para la detección temprana de inestabilidades que puedan causar deslizamientos y pérdidas humanas y materiales. Dependiendo del sistema y de la tecnología con que se cuente, es posible realizar dicho

monitoreo a través de una computadora que registre los movimientos y sea la que indique la alerta de deslizamiento. La aplicación del monitoreo es útil en carreteras y en comunidades, donde empresas y casas de habitación se encuentren cercanas a los taludes que presenten indicios de inestabilidad con lo cual se podría llegar a salvar vidas humanas ante una detección temprana de problemas de inestabilidad.

Conclusiones

La precipitación es un fenómeno climatológico que tiene influencia en el suelo. Esta modifica los parámetros del suelo. El principal cambio que genera es la humedad del material. Esto tiene repercusiones físicas que afectan los parámetros de resistencia del suelo. El aumento o disminución del agua en los poros del suelo tiene repercusiones tanto en el peso como en la capacidad de resistir fuerzas. En la investigación se estudió el comportamiento del suelo ante la precipitación y se obtuvo:

La precipitación y la humedad

1. La precipitación efectivamente modifica la humedad del suelo. Para que se lleguen a dar estas modificaciones la cantidad de precipitación debe sobrepasar las condiciones específicas del sitio en el que se encuentre. No toda precipitación genera cambios en el contenido de agua del suelo. La vegetación existente, el tipo de suelo y las características del sitio influyen en la humedad. El balance hídrico es el que determina el contenido de agua en determinado periodo de estudio.
2. Con respecto al método empleado existe incertidumbre con la capacidad de campo, la cual trata el autor como el límite o condición necesaria para que el suelo se considere como no saturado. Dicha incertidumbre corresponde a la verificación de las humedades de campo y los resultados del estudio de suelos, ya que en ambos casos resultan mayores que la capacidad indicada como máxima en la tabla del método teórico presentado por Schosinsky (2007). La capacidad de campo, porcentaje que

corresponde a la máxima saturación posible sin llegar a un estado saturado, debe ser obtenida de la curva característica suelo – agua, así como la determinación del punto de marchitez, ya que son parámetros propios del suelo y debido a su composición granulométrica son de difícil ubicación en las diferentes tipos de tablas que proveen la información deseada.

La humedad y la succión

1. Los resultados obtenidos del uso del tensiómetro afirman el modelo teórico, evidenciando la relación inversamente proporcional existente entre la humedad y la succión. A medida que la humedad aumenta la succión tiende a disminuir.
2. La determinación de la capacidad de campo del suelo afecta directamente la succión, ya que existen limitaciones con respecto a la humedad máxima que viene indicada por Schosinsky (2007). Este valor, para el caso del talud en estudio, se encuentra por debajo de la humedad promedio del sitio. Esto hace que la succión existente en el talud sea menor a la calculada siguiendo esta metodología.

Succión y estabilidad de taludes.

1. El esfuerzo de succión forma parte de las fuerzas estabilizadoras. Al ser un suelo SM, no existen fuerzas físico – químicas, por lo que el valor medido es considerado en su totalidad esfuerzo de succión. La variación de la succión tiene un impacto en el factor de seguridad calculado por cualquiera de los métodos. Dicho impacto es del 8%

aproximadamente. La relación entre el factor de estabilidad y la succión es directamente proporcional. Si la succión baja el factor de seguridad se comportará de igual manera.

2. El talud ubicado en Las Nubes de Coronado es estable. Para el resultado del análisis se consideró una sobrecarga de una casa de 800 kg/m², además de precipitaciones pronosticadas utilizando el método del índice de estacionalidad y el cumplimiento del suelo con el modelo de humedad, lo que implica succiones más bajas que las reales. Los factores de seguridad obtenidos son altos, pues son mayores a 2, y para un talud en el cual existen vidas humanas en riesgo, el mínimo es de 1,5. Los efectos sísmicos no se consideran en el análisis realizado, requiriéndose ayuda de software especializado o de un análisis pseudo estático o dinámico.
3. El análisis probabilístico para la estabilidad de taludes muestra una visión diferente de este tipo de estudios, ya que se manejan rangos

probables, promedio y desviación estándar, con respecto a las variables que se analizan. El peso específico y el esfuerzo de succión en este caso son las variables que se ven afectadas por la precipitación y las que van a determinar la condición del talud. El método de Rosenblueth es una metodología simple y de fácil aplicación que tiene relación con el análisis determinístico. Este tipo de análisis maneja rangos, lo que permite manejar escenarios posibles, que van de la mano con el comportamiento del talud. Si bien es cierto que actualmente mediante ensayos de laboratorio es posible determinar con cierta precisión los parámetros del suelo, sin embargo estos corresponden a puntos específicos de exploración y, por el mismo comportamiento del suelo, es posible que existan variaciones, de ahí que el análisis probabilístico es una opción válida, ya que reduce la incertidumbre de los parámetros en el análisis.

Recomendaciones

El proyecto realizado abarca diversos temas por lo que surgen preguntas y nuevas líneas de investigación. En esta sección se presentan algunas recomendaciones con respecto a los diferentes temas abarcados durante la realización del estudio.

La precipitación y la humedad

Es importante destacar que además de la precipitación, la temperatura ejerce control sobre la humedad, y para obtener un modelo más apegado a la realidad, se debe llevar un registro de temperatura promedio, ya que la temperatura tiene influencia directa en la evaporación y en la evapotranspiración.

La humedad y succión

El esfuerzo de succión no es considerado en el análisis de estabilidad convencional. La determinación del aporte de la succión está estrechamente relacionada con la humedad, por lo que en el campo sería de gran utilidad un estudio basado en perforaciones para la realización de un modelo de humedad más certero en profundidad, ya que el uso de tensiómetros para estos casos es limitado a su longitud.

La succión se muestra en el suelo como una cohesión aparente, la cual depende de la humedad del suelo. La variabilidad de esta es debida a la precipitación, por lo que un aumento considerable de lluvia implica una disminución en la succión. Para mantener una succión en el terreno es fundamental el sistema de drenajes, ya que ayuda a mantener un nivel aceptable de humedad y reduce el peso del talud. Además este sistema se puede complementar con vegetación, como el vetiver, la cual es utilizada para el control de la erosión debido a la capacidad de la planta para la absorber agua.

Succión y estabilidad de taludes

Los métodos para el análisis utilizado son sencillos, sin embargo estos no consideran la aceleración del suelo cuando se produce un sismo. Un análisis dinámico es el ideal para la evaluación del comportamiento ante el sismo. Dicho análisis requiere de conocimientos de elemento finito con el fin de poder resolver adecuadamente las formulaciones y lograr determinar el comportamiento del suelo no saturado ante sollicitaciones sísmicas y evaluando el papel de la succión en estas circunstancias.

Apéndices

La sección de apéndices se encuentra compuesta por los siguientes documentos, los cuales son productos complementarios:

1. Escenarios usando la metodología del IMN para cada estación.
2. Gráficos obtenidos de la prueba de corte directo.
3. Humedad calculada según lluvia pronosticada para cada estación.

Anexos

La sección de anexos se encuentra compuesta por los siguientes documentos, los cuales ayudaron a la investigación:

1. Estudio de suelos
2. Registro de precipitación provisto por el IMN.
3. Manual del inclinómetro.
4. Artículo: Calculo escenarios metodología IMN
5. Artículo: Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual
6. Artículo: Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos.
7. Artículo: Método de Rosenblueth.

Referencias

- Aitchison, GD; Bishop, AW. **DISCUSSION IN PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOIL.** Butterworths. Londres. 1960.
- Alonso, E.E., Gens, A., and Hight, D.W. **SPECIAL PROBLEM SOILS.** General report. In proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Vol. 3: 1087-1146. 1987
- Alonso, E.E; Gens, A; Josa, A. **A CONSTITUTIVE MODEL FOR PARTIALLY SATURATED SOILS.** Géotechnique 40. 1990.
- Anderson, D; Sweeney, D. **ESTADISTICA PARA ADMINISTRACION Y ECONOMIA.** Cengage learning. 10ma Edición. 2008.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. **CÓDIGO DE CIMENTACIONES DE COSTA RICA.** Editorial Tecnológica. 2009
- Baltodano Goulding, Rafael. **TENSILE STRENGTH, SHEAR STRENGTH, AND EFFECTIVE STRESS FOR UNSATURATED SAND.** Disertación presentada a la Facultad de Posgrado de la Universidad de Missouri, Columbia para optar al grado de Doctor en Ingeniería Civil. Estados Unidos. 2006
- Baltodano Goulding, Rafael. **APUNTES DE CLASES DE MECÁNICA DE SUELOS 2.** Universidad de Costa Rica. 2009. bbbbbb
- Banco mundial. **VETIVER GRASS: THE HEDGE AGAINST EROSION.** 1990.
- Barrow, GM. **PHYSICAL – CHEMISTRY.** McGraw Hill. Nueva York. 1961.
- Barrera Bucio, Mauricio; Garnica Anguas, Paul. **INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE SUELOS NO SATURADOS EN VÍAS TERRESTRES.** Publicación técnica número 198. Instituto Mexicano del Transporte. México. 2002.
- Braja, Das. **PRINCIPIOS DE INGENIERÍA DE CIMENTACIONES.** International Thomson Editors. 4ta Edición. 2001
- Bishop, AW. **THE PRINCIPLE OF EFFECTIVE STRESS.** Teknik Ukeblad. 1959.
- Bogantes González, Roy. **ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS: ESTUDIO DEL CASO DEL DESLIZAMIENTO DEL CERRO TAPEZCO, COSTA RICA.** Proyecto Final de Graduación. Escuela de Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. 2003.
- Escario, V; Sáez, J. **THE SHEAR STRENGTH OF PARTLY SATURATED SOILS.** Géotechnique 36. 1986.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. **STRESS STATE VARIABLES FOR UNSATURATED SOILS.** Geotech Div A.S.C.E. 1977.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A. **THE SHEAR STRENGTH OF UNSATURATED SOILS.** Canadian Geotechnical Journal. 15, No. 3: 313-321. 1978
- Fredlund, D.G. **APPROPRIATE CONCEPTS AND TECHNOLOGY FOR UNSATURATED SOILS.** Can. Geotech. J. 16 No 1:121-139. 1979
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.. **SOIL MECHANICS FOR UNSATURATED SOILS.** John Wiley & Sons, INC., New York. 1993.
- Fredlund, M. **THE ROLE OF UNSATURATED SOIL PROPERTY FUNCTIONS IN THE PRACTICE OF UNSATURATED SOIL MECHANICS.** PhD thesis. University of Saskatchewan, Canada 1999
- Geoam. **ESTUDIO DE SUELOS LAS NUBES DE CORONADO.** 2010.
- Goyal, Megh R., Santaella Pons, José A., Rivera Martínez, Luis E. **MANEJO DE RIEGO POR GOTEO.** Capítulo V: El Tensiómetro: Su Uso, Instalación y Mantenimiento. Puerto Rico, 2007.
- Josa, A. **UN MODELO ELASTOPLÁSTICO PARA SUELOS NO SATURADOS.** Ph.D. Tesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 1988

- Likos, W. J., and Lu, N. **HYSTERESIS OF CAPILLARY STRESS IN UNSATURATED GRANULAR SOIL.** Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 6. 2004
- Matyas, E.L. y Radhakrishna, H.S. **VOLUME CHANGE CHARACTERISTICS OF PARTIALLY SATURATED SOILS.** Géotechnique, 18, No 4: 432-448. 1968.
- Normas ASTM: ASTM D-2166 Compresión inconfiada, ASTM D-2216 Contenido de humedad, ASTM D- 2487 Clasificación de suelos, ASTM D-2488 Descripción e identificación de suelos y ASTM D- 4318 Límite Líquido, Límite Plástico, Índice de plasticidad.
- Pérez García, Natalia; **DETERMINACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS EN SUELOS NO SATURADOS CON CELDAS DE PRESIÓN.** Publicación técnica número 313. Instituto Mexicano del Transporte. México. 2008.
- Perera, YY; Zapata, CE; Houston, WN; Houston, SL. **PREDICTION OF THE SOIL-WATER CHARACTERISTIC CURVE BASED ON GRAIN-SIZE DISTRIBUTION AND INDEX PROPERTIES.** A.S.C.E. 2005.
- Poblete Freire, Mauro. **CLASE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN FALLAS SEMICIRCULARES.** Curso Suelos II. Universidad Católica de la Santísima Concepción. Chile. 2006
- Porta Casanellas, J; López-Acevedo, Marta. **AGENDA DE CAMPOS DE SUELOS.** Mundi-prensa. 2005.
- Ramírez Escribano, Oldemar. **NOTAS CURSO GEOLOGÍA APLICADA.** I Semestre, 2007
- Rosenblueth, Emilio. **POINT ESTIMATES FOR PROBABILITY MOMENTS.** Universidad Autónoma de Mexico. 1975.
- Schiava R; Etse Guillermo **SIMULACIÓN DE ENSAYOS EMPLEANDO EL MODELO MRS LADE EXTENDIDO PARA SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS** Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina, 2004.
- Schosinsky, Gunther. **MODELO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFILTRACIÓN CON BASE EN LA LLUVIA MENSUAL.** Universidad de Costa Rica, 1999.
- Schosinsky, Gunther. **CÁLCULO DE LA RECARGA POTENCIAL DE ACUÍFEROS MEDIANTE UN BALANCE HÍDRICO DE SUELOS.** Universidad de Costa Rica, 2007.
- Suarez, Jaime. **DESLIZAMIENTOS.** Capítulo 12 Instrumentación y Monitoreo. Colombia, 2009.
- Tedesco, Dante. **HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOUR OF LIME-STABILISED SOILS.** Disertación presentada a la Facultad de ingeniería de la universidad Università degli Studi di Cassino, Cassino para optar por el grado de Doctor en ingeniería civil y mecánica. Italia. 2006
- Ucar Navarro, Roberto. **MANUAL DE ANCLAJES EN INGENIERÍA CIVIL.** Editorial López Jimeno. España. 2005
- Villalobos, Roberto; Retana, José. **SISTEMA DE PRONÓSTICO DE LLUVIAS EN COSTA RICA.** Instituto Meteorológico Nacional. Costa Rica. 1997
- Vishay Instruments. **DIGITAL STRAIN INDICATOR MANUAL.** Model P350-A. 1978
- Wroth, D.M. and Houlsby, G.T. **SOIL MECHANICS: PROPERTY CHARACTERIZATION AND ANALYSIS PROCEDURE.** Proc.11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 1: 1-55. 1985.
- Wood, D.M. **THE BEHAVIOUR OF PARTLY SATURATED SOILS: A REVIEW.** Department of Engineering, University of Cambridge. 1979
- Zamora, JC; Cristancho, F. **LA HUMEDAD EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO.** Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 2008.

Referencias de imágenes

Referencia Internet # 1

- <http://www.snet.gob.sv/Geologia/Deslizamientos/Monitoreo/mon20040511b.jpg>

Referencia Internet # 2

- <http://www.valentinmunoz.com/html/cat/productes/IMG/geotextil3.jpg>

Referencia Internet # 3

- <http://img382.imageshack.us/i/dsc00954nk0.jpg/#q=Taludes conformacion>

Referencia internet # 4

- http://www.etmultiservicios.com/imagenes/cimentaciones/partes_anclaje.gif

Referencia Internet # 5

- <http://www.erosion-prevention.com/cutslope.jpg>