

Análisis de estabilidad de ladera en el Cerro del Mesón de Poza Rica, Ver.

Utilizando el método de equilibrio límite

Roberto R. Garibay-Pérez, Alejandro Córdova-Ceballos, Raymundo Ibañez-Vargas, Gastón Genaro García Reyes, Avril González Sierra, Amanda E. Salan Reyes y Juan L. Jiménez-Ramírez

Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Veracruzana
Poza Rica, Ver.; México

[rgaribay, acordova] @uv.mx, zs11005504@estudiantes.uv.mx

Abstract— This research about the hillside stability in the rural area of Poza Rica, Veracruz, was intended to define the grade of vulnerability that exists in the soil, since the slopes of Ejido Cerro del Mesón significantly suffer a decrease in its mechanical properties (cohesion and angle of internal friction) as its moisture content increases. The cited above was quantified by a safety factor using techniques from the Limit Equilibrium Method, where theories about the resistance of materials are employed, the relationship between the forces that exist along the slip surface and the parameters that determine the soil resistance.

Keyword— *Hillside – slope, safety factor, glide, the limit equilibrium method, stability, humidity.*

Resumen— La presente investigación de estabilidad de ladera en la zona rural de Poza Rica, Ver, tuvo la finalidad de definir el grado de vulnerabilidad que existe en el suelo, ya que los taludes del Ejido Cerro del Mesón sufren significativamente una disminución en sus propiedades mecánicas (cohesión y ángulo de fricción interna) a medida que se incrementa su porcentaje de humedad. Lo citado anteriormente se cuantificó a través de un factor de seguridad utilizando técnicas del Método de Equilibrio Límite, en donde se emplean teorías de resistencia de materiales, la relación entre las fuerzas que existen a lo largo de la superficie de falla y de parámetros que determinan la resistencia del suelo.

Palabras claves— *Ladera –talud, factor de seguridad, deslizamiento, método de equilibrio limite, estabilidad, humedad.*

I. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de laderas y taludes es una problemática clásica en obras de ingeniería; para conocer el grado de inestabilidad se analiza mediante la teoría de Equilibrio Límite, su análisis se basa en la determinación de un factor de seguridad, relacionando las fuerzas deslizantes y resistivas a lo largo de la superficie de falla.

Sin embargo, en los últimos tiempos se ha incrementado significativamente el uso del Método de Elemento Finito, el cual es un método numérico que divide un cuerpo en formas geométricas simples o elementos, interconectados entre sí, para resolver de forma aproximada el conjunto; donde se considera las relaciones “esfuerzo-deformación”.

Los taludes y laderas son masas de suelo, roca o la combinación de estos, con pendiente irregular y con cambios notables de altura. Tanto las laderas como los taludes en zonas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos, debido a que se reúnen los cuatro elementos para su ocurrencia, que son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas, mientras que las fallas de ambos durante periodos prolongados de infiltración, son atribuidas al avance del humedecimiento dentro de la masa del suelo, a causa de que la resistencia al esfuerzo cortante disminuye debido a la succión (Mora y Rojas, 2009).

Existen dos tipos de fuerza que actúan en cualquier tipo de deslizamiento: las motoras y las resistentes. Las fuerzas motoras se originan por el peso del material que conforma el cuerpo de una ladera o talud y por el peso de cualquier sobrecarga que se coloque en la parte alta de ellos, mientras que las fuerzas resistentes son el resultado de la resistencia “in situ” de los materiales que conforman las laderas o los taludes.

En el presente trabajo se realizó un estudio de estabilidad, en una zona rural de la ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Ver., conocido como Ejido Cerro del Mesón; este lugar fue considerado con motivo de que en la zona se han producido daños en las viviendas de los habitantes por posibles movimientos del terreno, debido al debilitamiento progresivo de las propiedades mecánicas del suelo a consecuencia de la lluvia, erosión y degradación del material, así como otros fenómenos naturales.

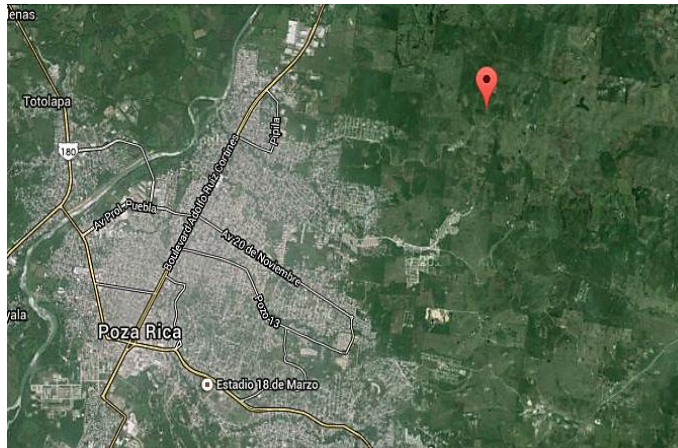


Fig. 1.- Zona de estudio

II. REVISIÓN LITERARIA

La finalidad del análisis de estabilidad de taludes es estimar la posibilidad de falla y de provocarse un deslizamiento de la masa de suelo que lo forma, ya que pueden originarse como consecuencia de distintas perturbaciones externas al pie del talud, o quizás producto de la acción de la gravedad y de esta manera lograr una efectiva medida de corrección o estabilización.

A. Factores que influyen en la estabilidad de un talud

La falla de un talud o ladera se origina debido a características, propiedades o un incremento en los esfuerzos actuantes, así como una disminución de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Estas variaciones, es provienen por efectos naturales y actividades humanas.

De acuerdo a Budhu (2007) los factores principales que afectan la estabilidad de una ladera o talud son:

- Erosión: La erosión modifica la geometría del talud y por lo tanto los esfuerzos a los que está sometido, generándose un talud diferente al inicialmente analizado o en la modificación de las condiciones originales.
- Lluvia: Los taludes se ven afectados al saturarse los suelos que los forman, provocando un aumento de peso de la masa, y así una disminución en la resistencia al esfuerzo cortante.

- Sismo: Los sismos suman fuerzas dinámicas a las fuerzas estáticas actuantes a las que está sometido un talud, provocando esfuerzos cortantes dinámicos que reducen la resistencia al esfuerzo cortante, debilitando al suelo.
- Características geológicas: Características geológicas no identificadas durante el levantamiento y exploración de campo, que al no ser considerados durante la evaluación de la estabilidad del talud, aumenta la incertidumbre del factor de seguridad calculado.
- Cargas externas: Aumento en las fuerzas actuantes en la masa del suelo, que pueden llevar a la falla del talud si no son controladas o tomadas en cuenta durante la evaluación de la estabilidad del talud.
- Excavaciones y/o rellenos: Actividades de construcción realizadas al pie de un talud, pueden causar la falla de este, puesto que se modifica la condición de esfuerzos a las que está sometido.
- Condiciones de presión de poro y vaciado rápido: Los embalses pueden estar sujetos a un cambio rápido en su nivel de agua y se ven juntos a una reducción de la fuerza lateral que proporciona el agua, además de que el exceso de presión de poro no da tiempo de disiparse.

B. Método de equilibrio límite

Los métodos de equilibrio límite analizan el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, y se basan exclusivamente en las leyes de la estática. Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas haciendo uso de dichas técnicas, puesto que el análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o bien dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson (1955) y Fellenius (1936). Los métodos de Bishop (1955) y Jambú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como son los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos.

C. Método de Fellenius

A este método se le conoce también como método Sueco, método Ordinario, método de las dovelas o método U.S.B.R. Dicho método asume superficies de falla circulares y se divide el área de falla en fajas verticales, donde se deben obtener las fuerzas actuantes y resultantes para cada dovela y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo se obtiene el factor de seguridad.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son:

- El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangencial a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas, no son conocidas por Fellenius.

Al realizar la sumatoria de momentos con respecto al centro del círculo, se obtiene la siguiente expresión para calcular el factor de seguridad:

$$F.S. = \frac{\sum [C' \Delta L + (W \cos \alpha - u \Delta L \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

Donde:

- α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada faja.
- W= Peso total de cada dovela.
- u= Presión de poros.
- ΔL = Longitud del arco del círculo en la base de la tajada
- C' = Cohesión del suelo.
- ϕ' = Ángulo de fricción.

Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. (Suárez, 1998).

III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A. Investigación de campo

Para la realización del análisis de estabilidad se necesitó efectuar el levantamiento topográfico del lugar, el cual se realizó con el equipo electrónico estación total Leica TS02; y con los datos obtenidos en campo se permitió conocer la topografía de las masas inestables, área, al igual que la dirección de sus movimientos mediante la observación de las fisuras, la vegetación.

La caracterización del suelo del Ejido Cerro del Mesón, se inició con el muestreo “in situ”, donde realizaron sondeos del tipo cielo abierto. La profundidad de muestreo fue tomado de los taludes y deslaves que predominan en la zona de estudio, aproximadamente de 1.50 a 1.80 m.

Se obtuvieron cuatro muestras de suelo inalterado en la zona de estudio, las cuales pertenecen a dos perfiles en los cuales se encuentran los daños más significativos a la población.

B. Investigación de laboratorio

Las muestras obtenidas en campo se llevaron al laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana para su ensaye; donde se le realizaron pruebas índices como mecánicas a los especímenes siguiendo los procedimientos de las normas en cada una de ellas.

En los ensayos de laboratorio se determinó el porcentaje de humedad del material, peso volumétrico en estado natural, límites de Atterberg, las cuales permiten la clasificación y caracterización del suelo, mientras que con la prueba triaxial rápida (UU) se determina la resistencia al corte del material.

Tabla I.- Resultados de Pruebas de Clasificación y caracterización de suelos

Prueba de laboratorio	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Humedad Natural	34.72%	33.34%	22.07%	27.56%
Peso específico de la muestra	1.74 ton/m ³	1.82 ton/m ³	1.88 ton/m ³	1.81 ton/m ³
Límite Líquido	58.42%	53.16%	51.13%	60.13%
Límite Plástico	27.05%	25.86%	19.64%	23.91%
Índice de Plasticidad	31.37%	27.30%	31.49%	36.23%
SUCS	CH	CH	CH	CH

De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el material estudiado se trata de una arcilla de alta compresibilidad (CH), este tipo de suelo se considera representativo de la zona de estudio, ya que las cuatro muestras extraídas tienen las mismas características físicas, clasificación y comportamiento.

Como se observa en la Tabla I, Limite Liquido de la CH es mayor del 50%, lo cual significa que en condiciones extremas de humedad, este tipo de suelo puede retener enormes cantidades de agua.

La realización de la prueba triaxial rápida (UU) para calcular el ángulo de fricción y la cohesión del suelo, se dividió en dos partes, en la primera, se prepararon tres muestras remoldeadas en laboratorio con material suelto (alterado), con un molde como se muestra en la Figura 4.1. Las dimensiones corresponden a 3cm de diámetro, altura de 8.95cm y un volumen de 63.62 cm³.

Se aplicó de una carga estática que fue calculada con anterioridad, y se compacto hasta obtener el peso volumétrico y la humedad natural de sitio.

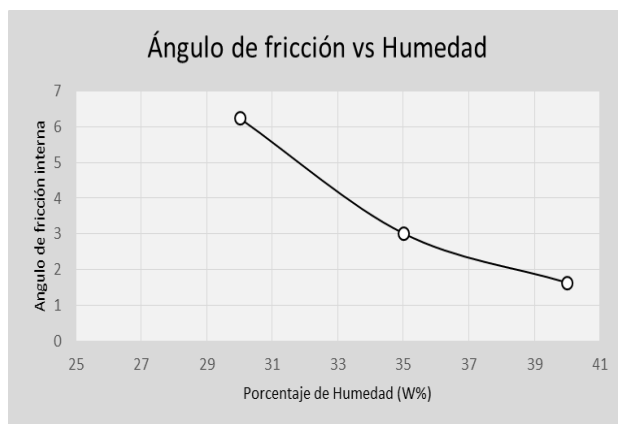
En la segunda se precedió a realizar los mismos pasos pero variando la humedad del natural, lo cual modifica el grado de saturación, esto con el fin de reproducir en laboratorio el efecto que tiene el agua en las características mecánicas del material, simulando lo que puede ocurrir en tiempos de lluvia.

Tabla II: Comportamiento de los parámetros de resistencia del suelo con respecto de la humedad

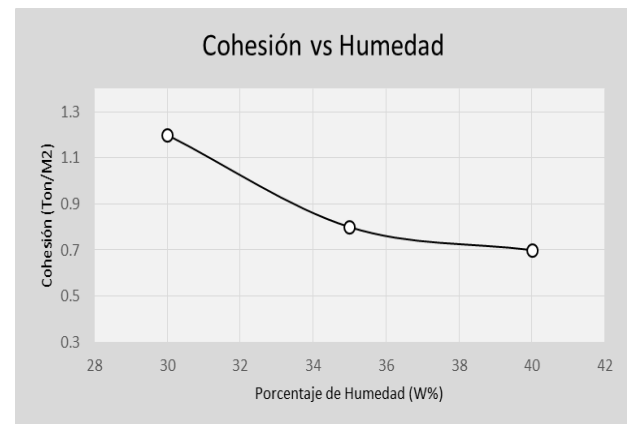
Humedad	W%	SUCs	Cohesión (Ton/m2)	Angulo de fricción
Natural	30%	CH	1.2	6.24
Agregada	35%	CH	0.8	3.02
Agregada	40%	CH	0.7	1.64

De acuerdo a los datos de la Tabla II, se puede observar que existe una correlación entre los parámetros mecánicos del suelo y el grado de humedad, puesto que existe una disminución significativa en la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo CH.

En las siguientes graficas se muestra el comportamiento de los parámetros mecánicos calculados a partir de la prueba triaxial rápida (UU).



Gráfica I - Ángulo de fricción interna vs Contenido



Gráfica II - Cohesión vs Contenido de humedad.

IV. ANALISIS DE ESTABILIDAD

La obtención del F.S, de igual manera se dividió en dos partes, en la primera se realiza el análisis de estabilidad de los dos perfiles con las propiedades mecánicas obtenidas con respecto a la humedad de campo y en la segunda con las propiedades obtenidas a diferentes grados de humedad, esto con el objetivo de comprender la relación entre el F.S, y la humedad del suelo.

A grandes rasgos los datos que se necesitan considerar para el análisis por cada una de las dovelas son:

- A: Área y volumen.
- W_i : Peso total.
- θ : Ángulo entre la línea central y la proyección del centro de falla.
- N_i : Fuerza normal en la base.
- T_i : Fuerza motora en la base, considerándose con respecto a las manecillas del reloj positiva o negativa.
- L_i : Longitud del arco en la base o bien la secante de la base.
- G_i : Esfuerzo normal promedio.
- S_i : Resistencia potencial promedio en la base.
- $S_i L_i$: Fuerza resistente potencial.

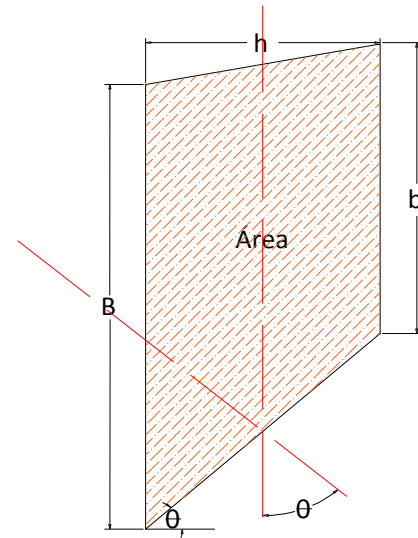


Fig. 2. Dimensiones de dovelas para análisis

Se realiza el mismo procedimiento para cada una de las dovelas que conforma el perfil. Una vez teniendo cada uno de los datos, el factor de seguridad para la circunferencia propuesta se calcula con la expresión:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento motor}} = \frac{\sum S_i L_i}{\sum L_i} \quad (2)$$

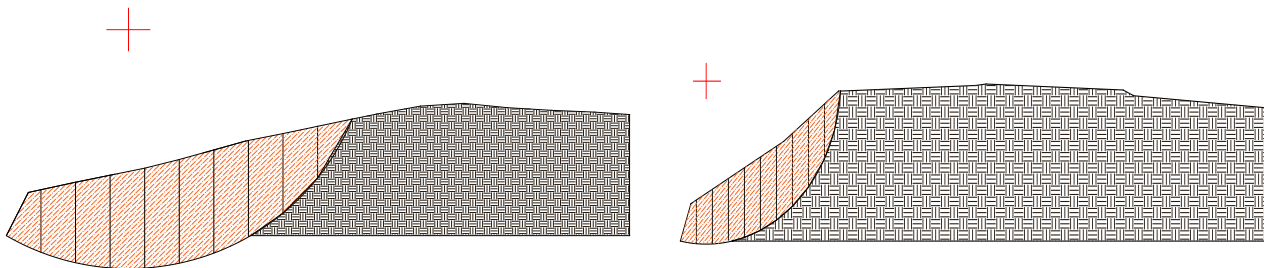


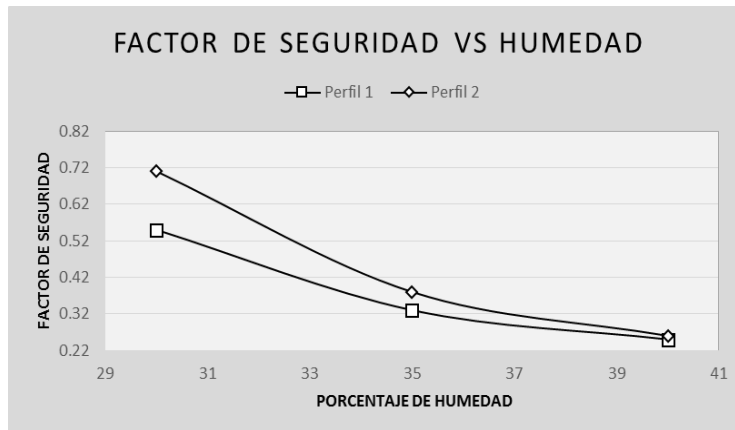
Fig 3 y 4.- Perfiles topográficos con propuesta de superficie de falla, donde se considera el talud homogéneo e isotrópico.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente, se procedió a realizar el estudio de estabilidad para dos perfiles 1 y 2 para calcular su F.S. evaluando el comportamiento mecánico del suelo a diferentes grados de humedad partiendo con la humedad obtenida en campo, esto con el objetivo de comprender la relación entre el F.S, y la humedad del material.

Tabla III.- Resultados del análisis de estabilidad de los perfiles 1 y 2.

Humedad	W %	F.S. Perfil 1	F.S. Perfil 2
Natural	30	0.55	0.71
Agregada	35	0.33	0.38
Agregada	40	0.25	0.26



Gráfica 3.- Relación de factor de seguridad vs humedad.

Con los datos de la Tabla III se puede observar el comportamiento del F.S. con respecto a la humedad del material, en la gráfica III, se observa que existe una correlación entre los parámetros, por la existencia de una disminución significativa del F.S. al estar aumentando el porcentaje de humedad.

Los resultados obtenidos en el análisis de los dos perfiles comprueban una inestabilidad del terreno, puesto que no se cumple con el F.S. estático mínimo que es de 1.5.

VI. CONCLUSIONES

El suelo que conforma las laderas en el Ejido Cerro del Mesón presenta una baja resistencia al cortante, la cual se considera como la detonante de este deslizamiento, un factor muy importante para favorecer la inestabilidad de esta zona son las lluvias que ocurren prácticamente todo el año, las cuales satura al suelo al penetrarle el agua por las grietas que contiene dicho material a lo largo de toda su masa debido a la erosión.

En las visitas a la zona de estudio se pudo observar que el suelo retenía gran cantidad de agua, aunque las lluvias ya tenían días de haber ocurrido. Al contener una gran cantidad de agua dentro del talud, se disminuye su cohesión y su resistencia al corte, esto se confirmó en laboratorio al realizar la prueba triaxial (UU) con especímenes a diferentes grados de humedad.

La determinación de los factores internos del suelo a través de pruebas de laboratorio permitieron crear modelos geotécnicos idealizados de deslizamiento, los cuales se consideraron isotrópicos y homogéneos, los cuales fueron sometidos a un análisis de estabilidad, donde se pudo conocer el comportamiento del suelo a diferentes grados de humedad, esto para simular en laboratorio lo que puede ocurrir en tiempos de lluvia.

El F.S. obtenido es de gran ayuda para establecer criterios geométricos en la remediación de este deslizamiento, así como también se puede determinar la obra correcta para solucionar esta problemática.

REFERENCIAS

- [1] Crespo Villaláz., 2010 “Mecánica de suelos y cimentaciones” Sexta Edición. Editorial Limusa. México.
- [2] Peter L. Berry y David Reid., 1993 “Mecánica de suelos” Editorial Mc Hill. México
- [3] Roy Whitlow., 1994 “Fundamentos de mecánica de suelos” Segunda edición editorial CECSA, México.
- [4] Juárez Badillo y Rico Rodríguez., 1963 “Mecánica de Suelos” Tomo I Editorial Thompson, México.
- [5] T. William Lambe, Robert V. Whitman, 1969. “Mecánica de Suelos” Editorial Limusa. México.
- [6] Ralph B. Peck, Walter e Hanson, Tomás H. Thornburn, 2009, “Ingeniería de Cimentaciones” Editorial Limusa, México.
- [7] José Alfredo Zepeda Garrido, 2004. “Mecánica de suelos no saturados” Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- [8] Jaime Suarez Díaz, 1998. “Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales”. Instituto de investigadores sobre erosión y deslizamientos.
- [9] Audini Montoya Orozco, 2009. “Confiabilidad en estabilidad de taludes” Universidad Nacional Autónoma de México.
- [10] José Manuel Barrera Ramos, 2014. “Modelo experimental de taludes escalonados”. Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- [11] Karla María Orozco Olarte, 2013. “Estabilidad de taludes en suelos residuales, evaluado en el corto y largo plazo”. Universidad EAFIT, Medellín.
- [12] María Laura Monsalve Hurtado, 2006. “Análisis comparativo de estabilidad de una ladera, ubicada en el sector la trujillana de la autopista Rafael Caldera, mediante el método de elementos finitos y equilibrio límite”. Universidad de los Andes, Venezuela.
- [13] Alan Raúl Granados López, 2006. “Estabilización del talud de la costa verde en la zona del distrito de Barranco, Lima”. Pontificia Universidad Católica de Perú.
- [14] Marco Vinicio Romero, 2011. “Propuesta metodológica para la evaluación de estabilidad de taludes y terraplenes en proyectos de carreteras”. Universidad de San Carlos, Guatemala.
- [15] Alejandro Kerguelen Argumedo, 2009. “Análisis probabilístico de estabilidad de taludes”. Universidad de los Andes, Venezuela.
- [16] Miguel Herrera García, 2006. “Estabilidad de taludes en carreteras”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.