

## Aplicación de métodos de análisis de estabilidad de taludes. Caso de estudio: río Albarregas, tramo Pan de Azúcar - El Rodeo, terraza de Mérida, Venezuela

### Application of slope stability analysis methods. Study case: Albarregas river, Pan de Azúcar – El Rodeo section, Mérida's terrace, Venezuela

Quintero, Rosma\*<sup>1</sup>; Rincón, Jorge<sup>1</sup>; Corredor, Alfredo<sup>1</sup>; Torres, Jesus<sup>2</sup>; Belandria, Norly<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigaciones en Geología Aplicada (GIGA), Escuela de Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida 5101. Venezuela.

<sup>2</sup> Departamento de Obras Civiles y Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Temuco, Temuco 4780000, Chile

\*ireluzqm@gmail.com

#### Resumen

*La ciudad de Mérida es una zona sísmicamente activa debido a la presencia del Sistema de Fallas de Boconó, características que, sumadas a la influencia climática y antrópica suelen generar problemas de inestabilidad en obras civiles. Para esta investigación se analizan los taludes a lo largo del río Albarregas entre el sector El Rodeo - Pan de Azúcar. Se aplican los métodos de Equilibrio Límite y Elementos Finitos con la finalidad de analizar su comportamiento. Para ello se estiman de forma aproximada las propiedades mecánicas del suelo y coeficiente de Balasto a través de datos geofísicos, generando ocho modelos de los taludes, luego se estima el factor de seguridad en condición seca, saturada y pseudoestática. Finalmente, se aprecian las zonas de retiro mínimo en las crestas de los taludes, para el caso de estudio, los mayores retiros son, los taludes estudiados en la margen izquierda del río Albarregas (sector El Rodeo y Campo Claro) y en la margen derecha (sector Campo Claro y Pan de Azúcar). Se recomienda el desarrollo de drenajes que regulen la infiltración de agua en los taludes, así como integrar la información aportada con otros proyectos a fin de mejorar el ordenamiento territorial en la zona metropolitana de Mérida.*

**Palabras clave:** taludes, métodos numéricos, factor de seguridad, retiro mínimo, terraza.

#### Abstract

*The city of Mérida is a seismically active zone due the presence of the Bocono's fault system, features that, added to the climatic-anthropic influence tends to generate instability issues on civil work. For this research, the slopes analyzed are the ones through Albarregas river, between El Rodeo and Pan de Azúcar sectors. The Limit Equilibrium and Finite Element methods are applied with the purpose of analyze its behavior. To do that, are estimated in an approximated way the soil mechanical properties and Balasto's coefficient through geophysical data, generating eight slope models, then the safety factor is estimated on dry, saturated and pseudo-static conditions. Finally, the minimal retreat areas are appreciated on the crest of the slopes, for the study case, the greater retreat areas are, the slopes studied on the left margin of Albarregas river (El Rodeo-Campo Claro sector) and on the right margin (Campo Claro - Pan de Azúcar sector). It is recommended the construction of draining systems that regulates the water infiltration in the slopes, as it to integrate the provided information from other research projects, with the aim of improving the territorial ordering in the Metropolitan area of Mérida.*

**Keywords:** Slope, numerical methods, safety factor, minimal retreat, terrace.

## 1 Introducción

La ciudad de Mérida se caracteriza por ser sísmicamente activa, debido a que se encuentra ubicada cerca al sistema de fallas de Boconó; lo cual genera condiciones de inestabilidad geológica, junto al vertiginoso crecimiento poblacional que se ha venido desarrollando durante los últimos 20 años en zonas que presentan un alto grado de amenaza para la población (Colina y col., 2014). Por otra parte, es importante disponer de un mayor y mejor conocimiento de las zonas más propensas a la ocurrencia de activación masiva de movimientos de masa debido a que son fenómenos de gran impacto dinámico (Tagliaferro y col., 2012), por tal razón se hace necesario realizar estudios que permitan determinar las diversas propiedades de los materiales que constituyen los taludes a fin de analizar su estabilidad.

El desarrollo de esta investigación, requiere la participación de diferentes disciplinas científicas, así como el manejo coordinado de la información en un Sistema de Información Geográfico (SIG), que permite la utilización y actualización de la información (Schmitz y col., 2011). En tal sentido, esta investigación parte de trabajos (Colina y col., 2014, Schmitz y col., 2011, Padrón y col., 2011) y los datos del Proyecto de Microzonificación Sísmica realizado por FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, donde el método de adquisición de datos del subsuelo es a través de la técnica refracción de microtemores (ReMi), (Louie 2001) y recomendada para ambientes urbanos por ser de fácil aplicación, la cual permite realizar la caracterización de sitio en función de la distribución de las velocidades de las ondas longitudinales y transversales (Colina y col., 2014).

La velocidad de ondas está relacionada con las características mecánicas del material, de modo que, es posible calcular los módulos de deformación elásticos dinámicos. Este conocimiento asociado al rápido progreso en la eficiencia computacional que incorporó técnicas de modelado numérico permite a los investigadores comprender la respuesta geomecánica de los taludes bajo cargas estáticas y dinámicas, siendo una parte importante en el logro del diseño seguro y racional en diversas prácticas de geotecnia (Prasad y col., 2020, Puttre 1991).

En esta investigación, para el análisis de estabilidad de taludes se estima el factor de seguridad con el fin de evaluar de manera aproximada, qué tan cerca o lejos, deberían estar y construirse las estructuras considerando cargas debido a su propio peso y fuerzas sísmicas. Uno de los métodos de análisis, es el Método de Equilibrio de Límite (MEL), el cual ha sido ampliamente estudiado (Fellenius 1936, Janbu 1968, Bishop 1965, Morgenstern y col., 1965, Spencer 1967), este método permite calcular y modelar el comportamiento del talud. Otros de los métodos es Elementos Finitos (FEM), debido a ser una alternativa poderosa y viable (Hammah, 2005, Hammah y col., 2010) además de poseer la característica de tener recursos informáticos disponibles,

combinados con bajos costos, determinándose las tensiones, desplazamientos y deformaciones que actúan en el talud. Cabe señalar que en la terraza de Mérida hay diversos sectores que han sido estudiados y aplicaron el Método de Equilibrio Límite (Al Ayssami 2017, Belandria y col., 2019, Guillén y col., 2017, Peña y col., 2017, Noguera 2018 y Corredor 2018), además, emplearon el método de Elementos Finitos (Torres y col., 2013) y Equilibrio Límite como método comparativo.

El objeto de este estudio es aplicar métodos numéricos para el estudio de los taludes ubicados en el Río Albarregas entre el sector Pan de Azúcar y El Rodeo pertenecientes a la Terraza de Mérida, con la finalidad de generar análisis en estado seco, saturado, pseudoestático, además de estimar el factor de seguridad. Además de determinar de manera aproximada el retiro mínimo que deben tener las edificaciones que están asentadas próximas a la cresta de los taludes a través de la metodología desarrollada por (Belandria y col., 2019). Esto permite establecer comparaciones entre los resultados obtenidos por ambos programas, información que se complementará con los análisis geológicos y geomorfológicos. De igual forma, la investigación sirve de base para mejorar la planificación urbana de la zona metropolitana de Mérida y aplicación de métodos de estabilización de bioingeniería adecuados (Torres y col., 2019).

## 2 Metodología empleada

El área de estudio se encuentra ubicada en la Terraza de Mérida, estado Mérida, limitada entre los sectores, Pan de Azúcar y El Rodeo, abarcando una superficie de 15 km<sup>2</sup>, como se muestra en la Figura 1. Así mismo, se desarrolla un modelo de elevación para la zona de estudio, mediante el uso de un programa SIG, con la finalidad de facilitar el trazado de perfiles topográficos, todos en sentido NO-SE pasando a través de los puntos que definen las líneas ReMi y los taludes que son estudiados en cada sector, estos perfiles permiten establecer la geometría de ocho modelos, cuatro de ellos ubicados a la margen derecha (1D, 2D, 3D, 4D) y otros cuatro a la margen izquierda (1I, 2I, 3I, 4I) del río Albarregas (aguas abajo).

### 2.1 Adquisición de datos

En la Tabla 1 se muestran los datos (ReMi) de donde se obtienen los rangos de las propiedades del suelo: densidad ( $\rho$ ), velocidad de onda longitudinal ( $V_p$ ), velocidad de onda transversal ( $V_s$ ) y espesor de capa ( $E$ ).

Partiendo de estos datos se determinan las propiedades elásticas del suelo (Tabla 2) como el peso específico, coeficiente de Poisson dinámico ( $\nu_d$ ), módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) [29] y el módulo de reacción o coeficiente de Balasto ( $K$ ) [30] a partir de las Ecuaciones (1-4).

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1)$$

$$\nu_d = \frac{0,5 \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (2)$$

$$E_d = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 (1 + \nu_d) \quad (3)$$

$$K = 4 \cdot \gamma \cdot V_s \quad (4)$$

Por otra parte, para la obtención de los parámetros de resistencia del suelo (Tabla 3) como cohesión (C) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) se utiliza los rangos del coeficiente de Balasto (K) tal como lo indica (Belandria y col., 2019). Seguidamente se usa el gráfico elaborado por la empresa Soletanche citada por (Ucar 2010) donde se consideran los valores del coeficiente de Balasto (K) y la cohesión (C) para la obtención del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ).

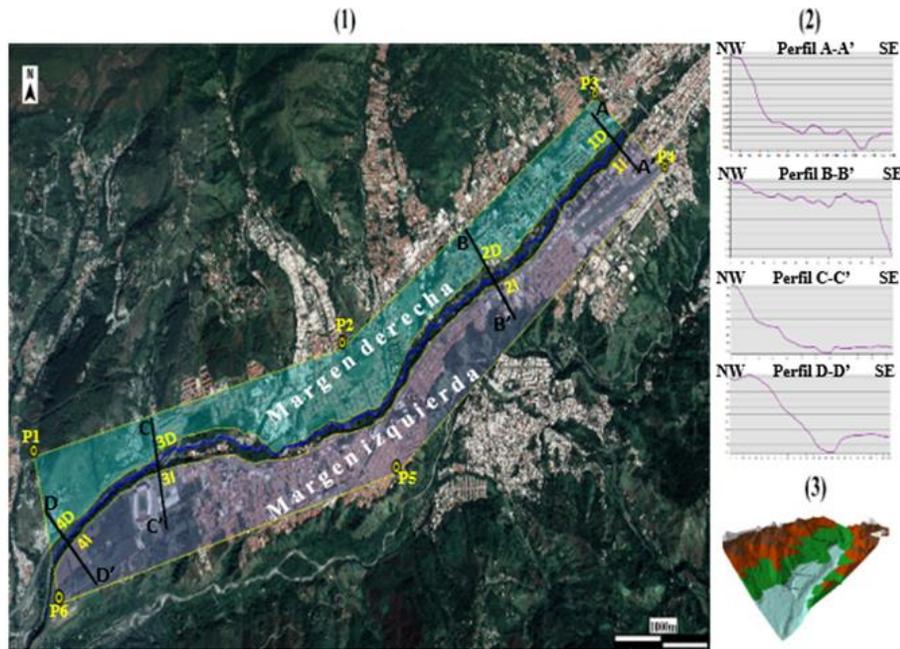


Fig 1. Ubicación del área de estudio. (1) Vista del trazado de los perfiles y de la ubicación de los modelos, (2) Perfiles topográficos, (3) Modelo de elevación Digital. Tomada y modificada de Qgis y Google Earth Pro (2018).

Tabla 1. Ubicación, espesores, densidad y velocidades Vs, Vp, Fuente: Funvisis y Laboratorio de Geofísica de la ULA.

Modelos	Línea ReMi	Ubicación	Espesor (m)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1D - 1I	LR13	Residencias El Rodeo	16 - 27	1,76 - 1,92	696 - 1230	402 - 711
4D - 4I	LR17	Enlace Pan de Azúcar	20 - 64	1,96 - 2,40	1311 - 2056	758 - 1189
3D - 3I	LR29	Campo claro	52 - 78	1,98 - 2,56	1129 - 2431	653 - 1405
2I	LR30	Av. Andrés Bello	11 - 34	1,66 - 1,84	573 - 1376	331 - 796
2D	LR32	Urb. Humboldt	12 - 23	1,38 - 1,66	684 - 1083	396 - 626

Tabla 2. Determinación de las propiedades elásticas del suelo.

Modelo	$(\gamma)$ (kN/m <sup>3</sup> )			$(E_d)$ (kN/m <sup>2</sup> )			$(\nu_d)$		
	capa 1	capa 2	capa 3	capa 1	capa 2	capa 3	capa 1	capa 2	capa 3
1D-1I	17,25	18,03	18,82	7,12x10 <sup>5</sup>	1,54x10 <sup>6</sup>	2,42x10 <sup>6</sup>	0,250	0,250	0,250
2D	13,52	15,09	16,27	5,40x10 <sup>5</sup>	1,01x10 <sup>6</sup>	1,63x10 <sup>6</sup>	0,250	0,250	0,250
2I	16,27	17,25	18,03	4,55x10 <sup>5</sup>	1,58x10 <sup>6</sup>	2,91x10 <sup>6</sup>	0,250	0,250	0,250

3D-3I	19,40	20,97	25,09	$2,11 \times 10^6$	$4,63 \times 10^6$	$12,63 \times 10^6$	0,250	0,250	0,250
4D-4I	19,21	20,97	23,52	$2,81 \times 10^6$	$6,01 \times 10^6$	$8,47 \times 10^6$	0,250	0,250	0,250

Tabla 3. Parámetros de resistencia del suelo.

Modelo	K (N/cm <sup>3</sup> )			C (kN/m <sup>2</sup> )			$\phi$ (Grados)		
	capa 1	capa 2	capa 3	capa 1	capa 2	capa 3	capa 1	capa 2	capa 3
1D-1I	27,76	41,74	53,50	20	30	55	27	32	34
2D	21,40	30,84	40,74	15	20	25	23	28	32
2I	21,56	41,32	57,38	15	25	55	24	35	35
3D-3I	50,70	78,10	141,04	30	60	75	35	37,8	44
4D-4I	58,26	88,91	111,82	55	60	70	35	39	41

## 2.2 Estimación del Factor de Seguridad por el Método de Equilibrio Límite (MEL)

Las propiedades elásticas y resistentes del suelo se introducen en un programa basado en el MEL, el cual consiste en el análisis de equilibrio de una masa potencialmente inestable, comparando las fuerzas que tienden al movimiento y la fuerzas que se oponen al mismo, se basa en la selección de una superficie teórica de rotura utilizando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb y la estimación de un factor de seguridad (González y col., 2002). Se estudia el comportamiento del talud bajo las condiciones seca, pseudoestática seca, saturada y pseudoestática saturada, estimándose el Factor de Seguridad (FS) por los métodos Ordinario o de Fellenius (OF), Bishop Simplificado (BS), Janbu Simplificado (JS) y Morgenstern Price (MP).

## 2.3 Estimación del Factor de Seguridad por el Método de Elementos Finitos (MEF)

Los modelos también son analizados a través del MEF, en el cual un medio continuo, ejemplo un macizo rocoso, es considerado como el ensamblaje de una serie de elementos estructurales interconectados mediante un número finito de nodos (Zienkiewicz 1968). De éste se obtienen valores de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y factor de seguridad.

## 2.4 Evaluación del retiro mínimo respecto al borde del talud a través del MEL Y MEF

Para obtener la separación que deben tener las edificaciones respecto a los bordes de taludes se seleccionan las superficies con FS menores o iguales a uno, una vez obtenidas, se mide la distancia de alejamiento respecto a la cresta o cabecera del talud, prolongando la pendiente del talud e interceptando con la prolongación de una línea horizontal del tope o cabecera del talud. Seguidamente, se mide la distancia desde el punto de intercepción hasta la curva de rotura más alejada tal como se muestra en la Figura 2, donde se comparan ambos métodos, dicho procedimiento descrito se aplica a todos los modelos de los taludes analizados.

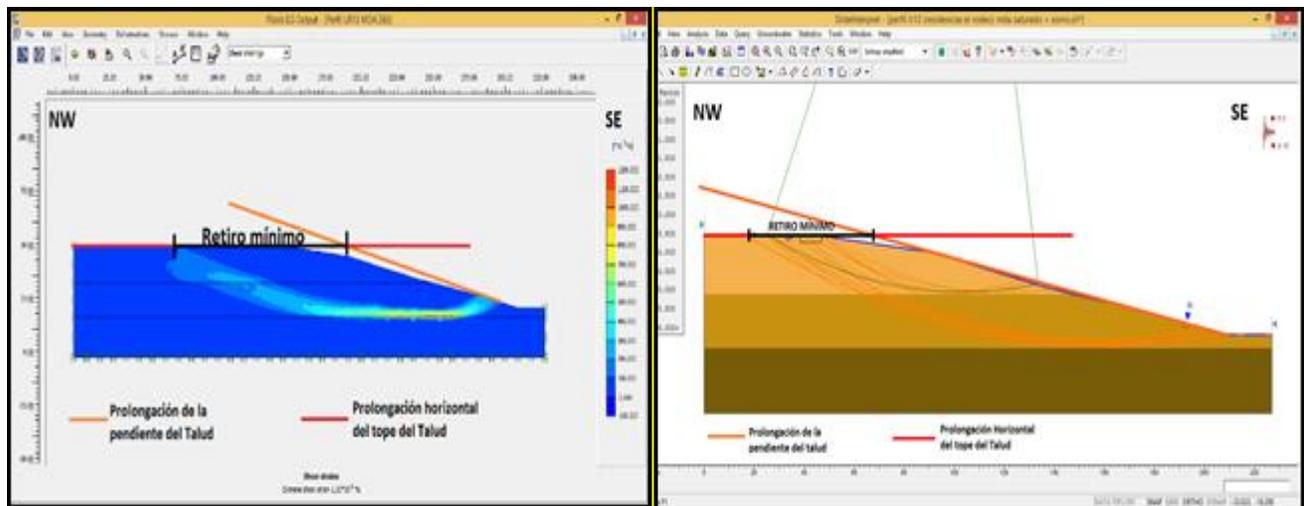


Fig 2. Forma de evaluación del retiro mínimo (a) MEL, (b) MEF

### 3 Análisis de resultados

#### 3.1 Estimación del Factor de Seguridad por el Método de Equilibrio Límite

Los resultados de los modelos en las diferentes condiciones se muestran en la Tabla 4, donde se puede observar que la condición que afecta mayormente a los taludes es la condición cuando se considera la masa de suelo saturada y el sismo, atribuido al aumento del peso de la masa deslizante en el talud producto de la acción del agua

y el efecto de la carga que se genera al momento de presentarse un sismo. Por supuesto, esto es considerando que ambas condiciones estén presentes en el mismo tiempo, en cuyo caso, la probabilidad de ocurrencia disminuye debido a que es poco probable se genere la condición saturada y el efecto de la carga sísmica a la vez. Por otra parte, la estimación del Factor de seguridad (FS) también se determina de manera aproximada analíticamente para la condición seca por medio del MEL específicamente el método Ordinario de Fellenius (OF) y el de Bishop (BS), dando el mismo valor del FS, permitiendo de esta manera, comparar y validar los resultados obtenidos por los programas y ecuaciones analíticas referidas al Factor de Seguridad.

Condición	Modelos Perfil A-A'							
	(Residencias El Rodeo - Av. Urdaneta Hotel Caribay)							
	1D				1I			
	OF	BS	JS	MP	OF	BS	JS	MP
EPS	3,939	4,032	3,903	4,031	2,233	2,355	2,173	2,356
PS	1,581	1,606	1,565	1,608	1,288	1,368	1,243	1,382
EPS <sub>AT</sub>	2,344	2,439	2,388	2,442	1,217	1,367	1,241	1,376
PS <sub>AT</sub>	0,915	0,976	0,939	0,980	0,694	0,823	0,727	0,852
Condición	Modelos Perfil B-B'							
	(Urb. Humboldt - Av. Andrés Bello CC Las Tapias)							
	2D				2I			
	OF	BS	JS	MP	OF	BS	JS	MP
EPS	5,163	5,449	5,003	5,445	3,379	3,580	3,290	3,579
PS	1,676	1,699	1,668	1,701	1,662	1,673	1,640	1,690
EPS <sub>AT</sub>	2,949	3,241	3,002	3,241	1,570	2,109	1,861	2,115
PS <sub>AT</sub>	0,840	0,930	0,897	0,930	0,819	1,036	0,941	1,062
Condición	Modelos Perfil C-C'							
	(sector Campo Claro-Estadio Metropolitano de Mérida)							
	3D				3I			
	OF	BS	JS	MP	OF	BS	JS	MP
EPS	2,776	2,928	2,749	2,926	1,610	1,699	1,592	1,691
PS	1,421	1,499	1,415	1,505	0,997	1,067	0,979	1,071
EPS <sub>AT</sub>	1,320	1,677	1,521	1,681	0,763	0,884	0,796	0,893
PS <sub>AT</sub>	0,724	0,87	0,808	0,889	0,436	0,572	0,484	0,599
Condición	Modelos Perfil D-D'							
	(Enlace Pan de Azúcar)							
	4D				4I			
	OF	BS	JS	MP	OF	BS	JS	MP
EPS	2,847	2,939	2,803	2,942	3,050	3,217	2,998	3,219
PS	1,569	1,616	1,547	1,630	1,643	1,709	1,625	1,718
EPS <sub>AT</sub>	1,660	1,806	1,799	1,816	1,836	1,937	1,884	1,944
PS <sub>AT</sub>	0,907	0,995	0,943	1,015	0,952	0,998	0,990	1,090

**Tabla 4.** Factor de seguridad de los taludes estudiados por el Método de Equilibrio Límite.

#### 3.2 Estimación del Factor de Seguridad por el Método de Elementos Finitos

Los modelos de los taludes estudiados por el MEL, son analizados también a través de otro programa basado

en el MEF, del cual se obtienen valores aproximados de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, así como las estimaciones del Factor de seguridad (FS), tal como se muestra en la Tabla 5, donde se evidencia que la condición más desfavorable por lógica es la pseudoestática saturadas, en la cual, se generan los mayores desplazamientos y deformaciones en el talud, por ser el caso más desfavorable estudiado. Por otra parte, también se puede observar que los valores de FS se aproximan a los determinados por el MEL, lo que permite en cierta manera, comparar y validar los resultados obtenidos (Tabla 5).

### 3.3 Resultados de la evaluación del retiro mínimo

Para la evaluación del retiro mínimo, se comparan los resultados obtenidos por el MEL y MEF (Tabla 6), seleccionando la condición más desfavorable que puede generar inestabilidad afectando a las edificaciones que se encuentre próximas a la cresta del talud.

## 4 Discusión

De acuerdo al cálculo del factor de seguridad por los métodos utilizados en esta investigación, se puede decir que la condición más desfavorable es la Pseudo-estática saturada (PSat). Por otra parte, los taludes más inestables se encuentran entre el sector El Rodeo y Campo Claro (específicamente alrededor del estadio Metropolitano) a la margen izquierda del río Albarregas, seguidos por los ubicados en el enlace Pan de Azúcar donde a la margen derecha del río estarían los taludes más vulnerables.

Así mismo, se ha verificado que los resultados determinados por el desarrollo analítico son iguales a los estimados a través del MEL y cercanos a los obtenidos por MEF para las condiciones elasto-plástica seca (EPS) y pseudo-estática seca (PS) (con diferencia del 1,3%), resaltando que los valores proporcionados por el programa que emplea MEF son más precisos, sin embargo, los datos del programa que aplica MEL son aceptables, en especial para los métodos más rigurosos como el de Morgenstern - Price (MP), además presentan la ventaja de procesar los datos en menor tiempo.

Además, la Tabla 6 muestra que los mayores retiros determinados para la ubicación de las obras civiles son los establecidos por el MEF en condición PSat, de esta manera, se obtienen los retiros respecto a las cabeceras de los taludes ubicados a lo largo del río Albarregas, entre el sector El Rodeo y el enlace Pan de Azúcar.

Por consiguiente, analizando las zonas de retiro respecto a los bordes de los taludes, es posible puntualizar que existe un gran número de obras civiles que se encuentran dentro de esta zona de inestabilidad que pueden ser afectadas en caso de presentarse la condición PSat.

El mayor retiro se presenta a la margen izquierda del río Albarregas (136 m), este punto de retiro respecto a la cresta del talud se encuentra en los alrededores de la Av. Urdaneta y del Hotel Caribay, por su parte, a la margen derecha el mayor retiro mínimo establecido es de 75 m para los taludes próximos a la Urbanización Humboldt, mientras que para la condición PSat se establecen retiros de 75 m (margen derecha) y 76 m (margen izquierda).

Finalmente, en el Estadio Metropolitano de Mérida se registra el segundo mayor retiro determinado (112 m) para los taludes de la margen izquierda del río Albarregas, mientras que para la margen derecha se presentan retiros en un rango de 80 a 83 m entre el sector Campo Claro y el enlace Pan de Azúcar.

## 5 Conclusiones

La condición pseudo-estática saturada es la que genera mayores problemas de inestabilidad considerando el factor de seguridad y los desplazamientos obtenidos por MEF, esto puede ser atribuido al peso que adiciona la incorporación de agua y el sismo al talud, así como, las elevadas pendientes que facilitan dichos desplazamientos por acción de la gravedad.

Los taludes más inestables se encuentran entre el sector El Rodeo y Campo Claro, alrededor del estadio Metropolitano, margen izquierda del río Albarregas, siendo las zonas aledañas a los bordes de estos últimos las que presentan el mayor retiro de las edificaciones, así mismo, los taludes ubicados, entre el sector Campo Claro y el enlace Pan de Azúcar margen derecha, debido a las altas pendientes.

Los valores obtenidos a partir del MEL y MEF son relativamente similares lo que permite validar la información obtenida a partir de los modelos. Ambos se recomiendan para realizar análisis de estabilidad de taludes, sin embargo, si se pretende dar resultados más prácticos, se sugiere emplear MEL, y si se desea estudiar desplazamientos y deformaciones se sugiere el MEF a pesar de un mayor tiempo de procesamiento.

Tabla 5. Resultados generales de los taludes estudiados por el método de Elementos Finitos.

Condición	Modelo	Desplazamiento (m)	Esfuerzos Totales (kN/m <sup>2</sup> )	Deformación (%)	FS
Seca	1D	1,62x10 <sup>-3</sup>	-933,89	2,99x10 <sup>-3</sup>	4,018
Pseudoestatica seca		1,65x10 <sup>-3</sup>	-935,26	3,28x10 <sup>-3</sup>	1,367
Saturada		2,56x10 <sup>-3</sup>	-968,81	5,61x10 <sup>-3</sup>	2,354
Pseudoestatica saturada	1I	2,83x10 <sup>-3</sup>	-1,03x10 <sup>3</sup>	6,01x10 <sup>-3</sup>	0,627
Seca		1,10x10 <sup>-3</sup>	-841,04	5,22x10 <sup>-3</sup>	2,403
Pseudoestatica seca		1,41x10 <sup>-3</sup>	-841,79	6,33x10 <sup>-3</sup>	1,054
Saturada	2D	2,80x10 <sup>-3</sup>	-935,38	12,30x10 <sup>-3</sup>	1,396
Pseudoestatica saturada		4,41x10 <sup>-3</sup>	-982,55	79,60x10 <sup>-3</sup>	0,558
Seca		1,02 x10 <sup>-8</sup>	-728,05	2,70x10 <sup>-3</sup>	5,616
Pseudoestatica seca	2I	1,29 x10 <sup>-8</sup>	-730	2,99x10 <sup>-3</sup>	1,413
Saturada		1,43 x10 <sup>-3</sup>	-864,04	5,91x10 <sup>-3</sup>	3,124
Pseudoestatica saturada		6,34 x10 <sup>-3</sup>	-894,37	6,46x10 <sup>-3</sup>	0,664
Seca	3D	1,02 x10 <sup>-3</sup>	-662,45	4,56x10 <sup>-3</sup>	2,413
Pseudoestatica seca		2,08 x10 <sup>-3</sup>	-693,53	19,90x10 <sup>-3</sup>	1,650
Saturada		2,54 x10 <sup>-3</sup>	-726,95	76,20x10 <sup>-3</sup>	1,354
Pseudoestatica saturada	3I	4,39 x10 <sup>-3</sup>	-944,23	246x10 <sup>-3</sup>	0,614
Seca		1,52x10 <sup>-3</sup>	-1110	4,23x10 <sup>-3</sup>	2,918
Pseudoestatica seca		1,86x10 <sup>-3</sup>	-1150	4,65x10 <sup>-3</sup>	1,146
Saturada	4D	4,08x10 <sup>-3</sup>	-1160	15,30x10 <sup>-3</sup>	1,582
Pseudoestatica saturada		5,43x10 <sup>-3</sup>	-1180	21,70x10 <sup>-3</sup>	0,546
Seca		1,37x10 <sup>-3</sup>	-1130	1,19x10 <sup>-3</sup>	1,653
Pseudoestatica seca	4I	2,56x10 <sup>-8</sup>	-1400	1,94x10 <sup>-3</sup>	0,897
Saturada		2,49x10 <sup>-8</sup>	-1720	6,70x10 <sup>-3</sup>	1,555
Pseudoestatica saturada		3,18	-1400	41,70x10 <sup>-3</sup>	0,455
Seca	4D	1,12 x10 <sup>-3</sup>	-2020	2,15x10 <sup>-3</sup>	2,862
Pseudoestatica seca		1,38x10 <sup>-3</sup>	-2070	2,43x10 <sup>-3</sup>	1,220
Saturada		2,97x10 <sup>-3</sup>	-220,42	7,45x10 <sup>-3</sup>	1,669
Pseudoestatica saturada	4I	3,85x10 <sup>-3</sup>	-306,94	14x10 <sup>-3</sup>	0,619
Seca		1,48x10 <sup>-3</sup>	-1490	1,77x10 <sup>-3</sup>	3,170
Pseudoestatica seca		1,96x10 <sup>-3</sup>	-999,05	3,75x10 <sup>-3</sup>	1,673
Saturada	4I	1,95x10 <sup>-3</sup>	-1770	4,60x10 <sup>-3</sup>	1,867
Pseudoestatica saturada		9,51x10 <sup>-3</sup>	-2200	7,37x10 <sup>-3</sup>	0,620

**Tabla 6.** Valores generales del retiro en la cabecera de los taludes determinados por MEL y MEF en su condición mas desfavorable.

Condición	Modelo	Ubicación	Retiro mínimo (m)				
			OF	MEL (dovelas)		MEF	
			BS	JS	MP		
Pseudoestatica saturada	1D	Sector El Rodeo	68,24	50,51	63,86	50,51	73
Pseudoestatica saturada	1I	Hotel Caribay	111,36	62,77	98,66	55,17	136
Pseudoestatica saturada	2D	Urb. Humboldt	41,69	41,69	41,69	41,69	75
Pseudoestatica saturada	2I	CC Las Tapias	45,47	0	41,74	0	76
Pseudoestatica saturada	3D	Sector Campo Claro	59,52	59,52	59,52	59,52	80
Pseudoestatica Seca	3I	Estadio Metropolitano	51,07	34,44	41,22	31,32	79
Saturada	3I	Estadio Metropolitano	13,13	0	17,75	0	0
Pseudoestatica saturada	3I	Estadio Metropolitano	85,21	85,21	85,21	85,21	112
Pseudoestatica saturada	4D	Enlace Pan de Azúcar	77,01	71,35	74,51	0	83
Pseudoestatica saturada	4I	Enlace Pan de Azúcar	45,62	0	23,63	0	50

**Conflicto de intereses:**

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

**Referencias**

Colina J, Volcanes V, Cerrada M, Pinto F, Salas M, Klarica S, Aranguren R, Choy J, Yegres L, Ávila J, Zambrano O, Morales C, Pérez A, Sosa G, 2014, Determinación de las velocidades de corte en los primeros 30 m de profundidad a partir de refracción por microtremores ReMi en el Área Metropolitana de Mérida, Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra, Vol 46, No 1, 18-26.

Tagliaferro M, André A, 2012, Los deslizamientos ocurridos el 20 de noviembre del 2008 en Las Colinas del sur de Caracas: una visión general de su impacto geotécnico, Revista Facultad de Ingeniería UCV, Caracas Vol 27, No 1, 31-40.

Schmitz M, Hernández J, Morales C, Domínguez J, Rocabado V, Valleé M, Tagliaferro M, Delavaud É, Singer A, Amarís E, Molina D, González M, Leal V, El Grupo de Trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, 2011, Principales resultados y recomendaciones del proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, Revista Facultad de Ingeniería UCV, Caracas Vol 24, No 4, 53-59.

Padrón C, Mendez K, Schmitz M, Hernandez J, 2011, La Microzonificación Sísmica en el proceso de planificación urbana. Caso de estudio: municipio Chacao Revista Facultad de Ingeniería UCV, Caracas Vol 25, No 2, 5-6.

Louie J, 2001, Refraction Microtremor (Remi) field tutorial 30-meters shear velocity with two hours effort. Optim LLC.

Prasad S, Siddique T, 2020, Stability assessment of landslide-prone road cut rock slopes in Himalayan terrain: A finite element method based approach. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering Vol 12, 59-73.

Puttre M, 1991, Product data management. Mechanical Engineering-CIME Vol 113, No 10, 81-84.

Fellenius W, 1936, Calculation of Stability of Earth Dams, Transaction.

Janbu N, 1968, Slope Stability Computations. Trondheim: Soil Mechanics and Foundation Engineering Report, The Technical University of Norway.

Bishop A, 1955, The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. Geotechnique, Vol 5, No 1, 7-17.

Morgenstern N, Price V, 1965, The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Geotechnique Vol 15, 79-93.

Spencer E, 1967, A Method of Analysis for Stability of the Embankment Using Parallel Inter-Slice Forces. Geotechnique, Vol 17, 11-26.

- Hammah R, 2005, A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit equilibrium investigation. En Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences–GeoSask 2005.
- Hammah R, Yacoub T, Corkum B, Curran J, 2010, A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation.
- Zienkiewicz O, 1968, The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. Mc Graw Hill. Londres.
- Torres R, Torres J, Monsalve M, 2013, Análisis de estabilidad cuasi-tridimensional de un talud de suelo empleando el método de elementos finitos: Autopista San Cristóbal – La Fría, Venezuela. Revista Ciencia e Ingeniería. Vol 34, No 2, 63-72.
- Al Ayssami S, 2017, Estudio geotécnico de los taludes ubicados en el sector la Vuelta de Lola, parroquia Gonzalo Picón Febres, municipio libertador, Estado Mérida a través de datos sísmicos. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Belandria N, Ucar R, Herrera F, 2019, Cálculo preliminar del retiro de las obras civiles del borde de la terraza de Mérida, Venezuela. Rev. Ciencia e Ingeniería. Vol 40, No 1, 9-16.
- Guillén Y, Gutiérrez D, 2017, Estudio geotécnico de los taludes ubicados entre el sector Santa Rosa y el Viaducto Campo Elías pertenecientes a la Terraza de Mérida, Edo, Mérida. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Peña G, Rosales A, 2017, Estudio probabilístico de la estabilidad del talud de la terraza de Mérida desde el sector Belén hasta la Facultad de Medicina – Venezuela. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. (2017).
- Noguera V, 2018, Análisis geotécnico de la estabilidad de taludes a lo largo del río Albarregas desde el Sector El Rodeo hasta el viaducto Campo Elías, Mérida estado Mérida Venezuela. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Corredor A, 2018, Análisis de los taludes ubicados entre el sector Belén y La Mara, a través de métodos numéricos. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Mérida Venezuela.
- Torres J, Torres R, Belandria N, Barreto W, Picon R, Peña M, Guarache J, Méndez L, 2019, Estudio de la variación en la resistencia al esfuerzo cortante en arenas mal gradadas producto de la plantación de vetiver. Revista Técnica de Ingeniería, Vol. Especial, No 1, 239-246.
- González de VL, Ferrer M, Otuño L, y Oteo C, 2002, Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Educación.
- Ucar R, 2010, Sistema de transporte masivo para el área metropolitana de Mérida-Línea 3 Trolcable en la ciudad de Mérida. Mérida: Tromerca.

**Recibido:** 25 de marzo de 2021

**Aceptado:** 26 de junio de 2021

**Quintero, Rosma:** Ingeniero Geólogo. Grupo de Investigación en Geología Aplicada (GIGA). Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela.

**Rincón, Jorge:** Ingeniero Civil e Ingeniero Geólogo. Grupo GIGA. Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: [Rincon\\_6\\_jorge@hotmail.com](mailto:Rincon_6_jorge@hotmail.com)

**Corredor, Alfredo:** Ingeniero Geólogo. Grupo GIGA. Profesor Instructor de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: [alfco89@gmail.com](mailto:alfco89@gmail.com)

**Torres, Jesús:** Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Profesor de la Universidad Católica de Temuco, Chile. Correo electrónico: [jtorres@uct.cl](mailto:jtorres@uct.cl)

**Belandria, Norly:** Ingeniero Geólogo. Magister en Matemática aplicada a la ingeniería. Doctora en Ciencias Aplicadas. Coordinadora del grupo GIGA. Profesor Asociado de la Universidad de los Andes, Mérida-Venezuela. Correo electrónico: [norlyb@gmail.com](mailto:norlyb@gmail.com)

