

## INTRODUCCIÓN

Las obras geotécnicas son de gran importancia en el desarrollo del país, debido a esto, su diseño debe ser realizado de manera que se evite la falla de las estructuras. Para ese propósito, tradicionalmente en Costa Rica se utiliza el enfoque determinístico y el concepto de "factor de seguridad" (FS) que se define como la relación entre la capacidad soportante última y el esfuerzo máximo de trabajo admisible.

En Costa Rica, el diseño estructuras geotécnicas, como muros de retención o taludes, se ven regidas por el Código de Cimentaciones de Costa Rica (2012). En éste se menciona la utilización de un factor de seguridad de 3,0 si el terreno es de tipo normal y no debe ser inferior a 2,0 aunque se conozcan las cargas con un grado de precisión elevado (Asociación Costarricense de Geotécnica, 2012). La utilización de este factor de seguridad pretende asegurar que la estructura que se está diseñando no llegue a fallar, debido a ello, los factores de seguridad que se utilizan son bastante elevados, lo que genera un aumento en el costo del proyecto debido al sobre-dimensionamiento obtenido. Sin embargo, autores como Coduto (2001) plantean la posibilidad de usar factores de seguridad menores a 2,0 si se conoce con precisión las propiedades del suelo.

Cuando se efectúa un estudio de suelos con el fin de elaborar el diseño de una estructura, se realiza una cantidad limitada de pruebas, debido a los recursos con los que se cuenta, las cuales no necesariamente constituyen una muestra estadísticamente representativa del suelo presente en la zona. No obstante, es posible

conocer su posible comportamiento a partir del diseño con un enfoque probabilístico.

Según estudios preliminares, los análisis probabilísticos para la determinación de la probabilidad de falla de una estructura brindan una gran seguridad en su diseño. Esto permite cuantificar la incertidumbre con la que se está trabajando, conociendo de antemano su probabilidad de falla.

Otro de los beneficios que aporta el análisis probabilístico para el diseño de estructuras geotécnicas, es que permite al diseñador escoger preliminarmente la probabilidad de falla con la que desea diseñar la estructura, según su importancia y vida útil.

Además, este tipo de análisis probabilístico permite conocer la variabilidad de las características de los suelos no saturados típicos de la zona en estudio, lo que contribuiría al diseñador a tener una idea preliminar del tipo de suelo con el que se va a trabajar. Esto gracias a contar con valores promedio y desviaciones estándar de parámetros del suelo, los cuales se pueden obtener a través de una zonificación.

Es necesaria la consideración de este tipo de metodologías, debido a la importancia de las obras con las que se está trabajando, ya que contribuye a la cuantificación de la incertidumbre que generan los datos de entrada para el diseño provenientes de los estudios de suelo realizados.

## Comité Editorial 2017:

· Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD, Coordinador General PITRA, LanammeUCR

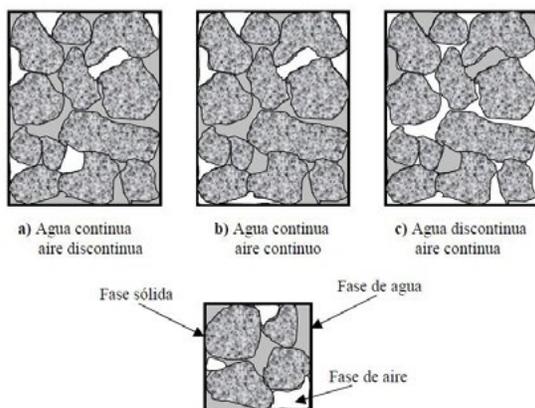
· Ing. Raquel Arriola Guzmán, Unidad de Normativa y Actualización Técnica, PITRA, LanammeUCR

## SUELOS NO SATURADOS

De acuerdo con Fredlund & Monrgenstern (1977), según muestra Barrera & Garnica, 2002, los suelos no saturados se encuentran estructurados por 4 fases; las partículas de suelo conforman la fase sólida, la fase líquida que generalmente es agua, el aire que conforma la fase gaseosa y una última fase que la forma la interacción entre el agua y el aire.

Existe una clasificación para los suelos no saturados que dependen de los procesos que generaron el estado no saturado. Estos procesos influyen en su comportamiento mecánico, y debido a esto, su estructura puede variar considerablemente. Según Barrera & Garnica, 2002, los autores Wroth & Houlby (1985) tomaron como referencia la continuidad del fluido de fase para proponer 3 tipos de suelos no saturados.

- Fase de aire discontinua y fase de agua continua: se presenta en suelos con altos grados de saturación. El aire presente dentro del suelo se encuentra en forma de burbujas discretas. Se puede encontrar este tipo de suelos en zonas muy estrechas de transición entre las zonas saturadas y zonas con un bajo grado de saturación, en suelos naturales. Ver Figura 1.a
- Fase de aire y agua continua: estos suelos generalmente se presentan grados de saturación intermedios, y suelen generarse en rellenos de granos finos compactados, o en zonas de transición en depósitos de suelo natural. Ver Figura 1.b
- Fase de aire continua y fase de agua discontinua: presentan un grado de saturación muy bajo. Este tipo de suelos se puede encontrar en algunos rellenos compactados, o en suelos naturales cercanos a la superficie. Ver Figura 1.c



**Figura 1. Posibles estructuras de suelos no saturados**  
Fuente: Wroth & Houlby, 1985. Tomado de: Barrera & Garnica, 2002

Una de las principales características de los suelos no saturados es el fenómeno de succión, la cual se define como la diferencia de la presión de aire y la presión de agua en los poros del suelo, producto de la interacción de las fases líquida, sólida y gaseosa, y que dependerá de la humedad en el sitio. El flujo del agua a través de los poros es controlado por el gradiente del potencial del agua, y este a su vez puede ser expresado por la sumatoria de las siguientes 3 componentes (Barrera Bucio, 2002):

- Potencial gravitacional, debido a la elevación del nivel de agua con respecto a un nivel de referencia
- Capilar o potencial matricial, debido a la tensión superficial
- Potencial osmótico, debido a la concentración de iones disueltos en el agua
- La definición de succión se muestra en la Ecuación (1).

La definición de succión se muestra en la Ecuación (1).

$$S_w = u_a - u_w \quad (1)$$

Donde

$S_w$  = succión en la fase agua-aire

$u_w$  = presión del agua

$u_a$  = presión del aire

## COMPORTAMIENTO DE DEFORMACIONES DE LOS SUELOS NO SATURADOS

Una de las principales implicaciones que tiene el grado de saturación en los suelos, es la deformación volumétrica. Estas deformaciones pueden ser tanto colapsos como expansión o hinchamiento, y ambos son considerados como inestabilidad estructural.

Existen deformaciones volumétricas irreversibles y se presentan cuando la succión y el esfuerzo medio neto son relativamente bajos (Alanís Araiza, 2012). Además, la teoría de la plasticidad permite describir el comportamiento de las deformaciones irrecuperables en los materiales, los fenómenos de fluencia y dilatancia debido a tensiones de corte (Barrera Bucio, 2002).

Las primeras formulaciones plásticas para representar el comportamiento de un suelo fueron presentadas por Drucker y Prager (1952) y Drucker (1953). De forma complementaria, en la Universidad de Cambridge se crearon los primeros modelos que permitieron repro-

ducir las características de los comportamientos de los suelos (Barrera Bucio, 2002).

Investigadores del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Catalunya desarrollaron un modelo elastoplástico (BBM por sus siglas en inglés de Barcelona Basic Model) de estado crítico para suelos no saturados, que permite estudiar con detalle el comportamiento de estos suelos. Este modelo se basa en la teoría de la plasticidad rigidizable; ley de fluencia (deformaciones plásticas) y la ley de rigidización (deformaciones elásticas) (Barrena Bucio, 2002).

De acuerdo con Barrena Bucio (2002) el modelo BBM permite reproducir gran cantidad de características de los suelos no saturados como lo son:

- Incrementos de la tensión de preconsolidación aparente con incrementos de succión.
- Estado del suelo después de un colapso
- Deformaciones irreversibles en algunas trayectorias de humedecimiento
- Incrementos de la tensión de corte al incrementar la succión
- La existencia de la línea de estado crítico (SCL) para valores de succión constante

Existe gran cantidad de ensayos para analizar el comportamiento esfuerzo-deformación en los suelos no saturados. Algunos estudios han permitido determinar que la rigidez de los suelos aumenta en la medida que aumenta la succión, por lo que podría generar deformaciones plásticas irreversibles. Por otra parte, algunos experimentos muestran que la succión y la rigidez no presentan una relación lineal, por lo que se llega a un valor máximo de rigidez cuando se alcanza cierto valor de succión. Cuando los suelos expansivos se ven afectados por proceso cíclico de humedecimiento y secado, se genera una expansión irreversiblemente en el primer humedecimiento, luego de éste el comportamiento es prácticamente elástico (Barrera Bucio, 2002).

## RESISTENCIA AL CORTE DE SUELOS NO SATURADO

La menor resistencia que puede tener un suelo es la resistencia al esfuerzo cortante en su estado de saturación completa. Barrera & Garnica, 2002, menciona que según Lambe & Whitman, (1959) y Seed & Chan, (1959), el contenido de humedad, el tipo de estructura del suelo y la densidad seca son los principales factores que afectan la resistencia a cortante de un suelo. Varios autores concuerdan en que la succión podría favorecer en

el crecimiento de la resistencia a cortante dependiendo de su régimen de saturación, debido a que este fenómeno aumenta los esfuerzos efectivos de un suelo.

Fredlund, Morgenstern & Widger (1978) sugirieron una relación entre las variables de esfuerzo y la resistencia a cortante de un suelo no saturado. Esta relación se muestra en la Ecuación ( 2 ).

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (2)$$

Donde

$\tau$ = resistencia al corte de un suelo

$c'$ = cohesión de un suelo en condición saturada

$\phi'$ = ángulo de fricción de un suelo en condición saturada

$\phi^b$ = ángulo de fricción interna con respecto a la succión ( $\sigma - u_a$ ) y ( $u_a - u_w$ )= variables de los estados de esfuerzo

La Ecuación ( 2 ) fue definida a partir de los valores de  $c'$ ,  $\phi'$  y  $\phi^b$  obtenidos de ensayos experimentales donde Fredlund, Morgenstern & Widger (1978) demostraron por medio de ensayos triaxiales en muestras compactadas y sin variar el contenido de agua, que  $\phi'$  es igual en condiciones saturadas y en condiciones no saturadas.

Sin embargo, estudios posteriores lograron demostrar la no linealidad de la resistencia al corte ante cambios en la succión en los ensayos triaxiales. Debido a esto, Fredlund sugiere la Ecuación ( 3 ) para lograr ajustar los resultados experimentales con la teórica, como muestra Bogantes, 2003.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + S_w * \theta^k * \tan \phi' \quad (3)$$

Donde

$S_w$ = succión mátrica ( $u_a - u_w$ )

$\theta$  = contenido volumétrico normalizado de humedad en el suelo

$k$  = parámetro de ajuste

Además, existen otras ecuaciones para el cálculo de las tensiones efectivas en suelos no saturados. Bishop & Blight (1963) mencionan que la variación de la tensión intersticial no se atribuye a la variación de la succión, si no que se encuentran asociadas a las deformaciones volumétricas y resistencia del suelo (Alfaro Soto, 2008). La ecuación que propone Bishop (1959) para realizar este cálculo es la siguiente.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

Donde

$\sigma'$  = tensión efectiva en el suelo

$\sigma$  = tensión en el suelo

$u_a$  = presión del aire

$u_w$  = presión del agua

$\chi$  = parámetro relacionado con el grado de saturación del suelo

Con esto se logra demostrar la influencia que tiene el grado de saturación en la variación de los parámetros del suelo, y por ende, la afectación de su resistencia.

## PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA

La estadística es una ciencia que pretende recopilar, presentar, analizar e interpretar datos numéricos, a partir de hechos reales, para así extraer conclusiones lógicamente aceptables. Existe la estadística descriptiva, y se refiere a cuando se desea analizar información de una muestra o población, sin que tenga alguna relación con otras muestras o poblaciones. Por otro lado, está la estadística inferencial, y se utiliza para deducir información relativa a otra muestra o población. (Depool Rivero & Monasterio, 2013)

La probabilidad es una herramienta que permite estudiar la frecuencia de un suceso determinado por medio de una prueba aleatoria, en donde se tiene información sobre todos los resultados posibles bajo condiciones establecidas, además de permitir evaluar la confiabilidad de las conclusiones. (Depool Rivero & Monasterio, 2013)

### Probabilidad de falla

Se define como la razón entre el número de casos que propician la falla y el número de casos posibles.

#### *Índice de confiabilidad*

Es una medida de la cantidad de desviaciones estándar que separa el valor analizado con el valor crítico. Es utilizado para calcular la probabilidad de desempeño de las estructuras, y se determina a partir de las tablas estadísticas asociadas a la distribución de probabilidad seleccionada.

Los datos de entrada para el análisis probabilístico se establecen como variables aleatorias, las cuales son utilizadas para calcular la función de densidad de probabilidad.

#### *Distribución de probabilidad*

Es una función que establece la probabilidad de que cierto evento ocurra. Existen varias distribuciones de probabilidad, algunas de las comunes son la distribución normal estándar, la distribución lognormal, distribución de Poisson y distribución t de Student.

De acuerdo con (Barakat, Alzubaidi, & Omar, 2015), se

pueden establecer ciertos índices de confiabilidad asociados a probabilidades de falla como se muestra en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Índice de confiabilidad asociado a la probabilidad de falla.**

Clase de falla	Consecuencia de la falla	
	Poco seria	Seria
Estructura redundante	$\beta=3,09$ (PF $\approx 10^{-3}$ )	$\beta=3,71$ (PF $\approx 10^{-34}$ )
Advertencia significativa antes de la aparición de la falla en estructura redundante	$\beta=3,71$ (PF $\approx 10^{-34}$ )	$\beta=4,26$ (PF $\approx 10^{-35}$ )
Sin advertencia antes de la aparición de la falla en estructura redundante	$\beta=4,26$ (PF $\approx 10^{-35}$ )	$\beta=4,75$ (PF $\approx 10^{-36}$ )

Fuente: Barakat, Alzubaidi, & Omar, 2015

## MÉTODOS DE DISEÑO PROBABILÍSTICO

Los métodos de diseño probabilístico permiten analizar una variable independiente determinando la distribución de probabilidades a partir de la distribución estadística de variables independientes.

Algunos de los métodos de diseño probabilístico más utilizados en el análisis de estructuras geotécnicas son el método de estimación de puntos de Rosenblueth y el método de series de Taylor.

### Método de estimación de puntos de Rosenblueth

Este método fue propuesto por Rosenblueth en 1975, el cual establece una función de densidades de probabilidad que puede simularse como puntos aleatorios situados a más o menos una desviación estándar del valor promedio.

Su función es determinar el factor de seguridad que existe entre dos variables aleatorias. Si se consideran las variables X y Y, la función que establece Rosenblueth para la determinación del factor de seguridad es la siguiente.

$$F = g(X, Y) \quad (5)$$

La incertidumbre asociada a estas variables se describe a partir de las desviaciones estándar  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  y los valores promedios  $\mu_x$  y  $\mu_y$ .

Las variables pueden ser dependientes o independien-

tes entre sí, esto lo define el coeficiente de variación. Cuando las variables son dependientes, la covarianza se define de la siguiente manera.

$$Cov[X,Y] = E[(X - \sigma_x)(Y - \sigma_y)] \quad (6)$$

$$Cov[X,Y] = 1/n \sum [(X - \sigma_x)(Y - \sigma_y)] \quad (7)$$

En donde la Ecuación (6) se utiliza para funciones continuas, y la Ecuación (7) para funciones discretas.

El coeficiente de correlación de las variables se expresa a través de la Ecuación (8).

$$\rho_{xy} = \frac{Cov[X,Y]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (8)$$

Para determinar la probabilidad de ocurrencia, se utiliza el siguiente grupo de ecuaciones.

$$\begin{aligned} P_{++} &= P_{--} = \frac{1}{2^n} (1 + \rho_{xy}) \\ P_{+-} &= P_{-+} = \frac{1}{2^n} (1 - \rho_{xy}) \end{aligned} \quad (9)$$

Luego se calcula el factor de seguridad realizando variaciones a los parámetros que se desean modificar. Para este cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} F_{++} &= g[(\mu_x + \sigma_x)(\mu_y + \sigma_y)] \\ F_{+-} &= g[(\mu_x + \sigma_x)(\mu_y - \sigma_y)] \\ F_{-+} &= g[(\mu_x - \sigma_x)(\mu_y + \sigma_y)] \\ F_{--} &= g[(\mu_x - \sigma_x)(\mu_y - \sigma_y)] \end{aligned} \quad (10)$$

Una vez determinado los valores de probabilidad de ocurrencia y el factor de seguridad para todos los casos, se procede a determinar el valor esperado del factor de seguridad con la siguiente expresión.

$$E[F] = \mu_x = P_{++} F_{++} + P_{+-} F_{+-} + P_{-+} F_{-+} + P_{--} F_{--} \quad (11)$$

Por último, se procede a determinar la varianza del factor de seguridad con la Ecuación 12.

$$Var[F] = E[F^2] - (E[F])^2 \quad (12)$$

Donde

$$E[F^2] = \mu_F = P_{++} F_{++}^2 + P_{+-} F_{+-}^2 + P_{-+} F_{-+}^2 + P_{--} F_{--}^2 \quad (13)$$

## MÉTODO DE SERIES DE TAYLOR

Este método se basa en la utilización de la Serie de Taylor de la función en la que se desarrolla el valor esperado, con variables aleatorias (Hidalgo Montoya & Pacheco de Assis, 2011). Para variables independientes, el valor esperado de la función se expresa como:

$$E[F] = \mu_F \approx g(E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_n]) + e \quad (14)$$

La función  $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  se determina a partir de los valores promedio de las variables aleatorias. El valor  $e$  corresponde al error del modelo, el cual se considera despreciable ya que es muy pequeño.

Cuando las variables que se están analizando son dependientes entre sí, es decir  $\rho_{xy} > 0$ , el cálculo del valor esperado se puede aproximar de la siguiente forma.

$$E[F] = \mu_F \approx g(E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_n]) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{\partial^2 F}{\partial X_i \partial X_j} Cov(X_i, X_j) + e \quad (15)$$

Donde  $i < j$

Las derivadas parciales de la Ecuación (15), deben ser evaluadas para cada variable en la función seleccionada. Para la solución de estas derivadas parciales, el cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos propone la aproximación por diferencias finitas, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial X_1} &= \frac{g(X_1 + \sigma_1, X_2, X_3, \dots, X_n) - g(X_1 - \sigma_1, X_2, X_3, \dots, X_n)}{2\sigma_1} = \frac{\Delta F}{2\sigma_1} \\ \frac{\partial F}{\partial X_2} &= \frac{g(X_1, X_2 + \sigma_2, X_3, \dots, X_n) - g(X_1, X_2 - \sigma_2, X_3, \dots, X_n)}{2\sigma_2} = \frac{\Delta F}{2\sigma_2} \end{aligned} \quad (16)$$

Una vez realizados estos cálculos, se puede determinar la varianza y la desviación estándar de las variables dependientes con la Ecuación (17).

$$Var[F] = \sigma_F^2 \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k [\Delta F_i]^2 + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k [\Delta F_i \Delta F_j \Delta \rho_{ij}] + V[e] \quad (17)$$

Luego se procede a calcular el índice de confiabilidad:

$$\beta = \frac{E[F] - F}{\sigma_F} \quad (18)$$

Donde

$F$  = factor de seguridad

$\sigma_F$  = desviación estándar

Para determinar la probabilidad de falla es necesario realizar una hipótesis que supone que  $F$  se distribuye de acuerdo a la función de distribución de probabilidad utilizada,  $F \sim$  Función de distribución de probabilidad  $(\mu_f, \sigma F/2)$ .

Por lo tanto, la probabilidad de falla se define como:

$$P_f [ F \leq F_{falla} ] = \text{Función de distribución de probabilidad} (F_{falla}) \quad (19)$$

## APLICACIÓN DEL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO EN LA INFRAESTRUCTURA VIAL

La infraestructura vial es el conjunto de componentes físicos que permiten el transporte de vehículos de manera confortable de un punto a otro, y contribuye con el desarrollo económico y social de la región, por lo que es fundamental la optimización en la inversión de los recursos para su desarrollo y conservación, y que se brinde un buen servicio y funcionamiento de la vía.

Los análisis geotécnicos se encuentran altamente cargados de incertidumbre, a partir de diversas fuentes que lo generan. Una de las principales razones por las que se puede manifestar la incertidumbre es la poca o inadecuada cantidad de muestras debido a limitaciones, tanto de tiempo, espacio o económicas.

Debido a esto, se ha venido buscando métodos que permitan que la variabilidad de los parámetros de resistencia del suelo pueda ser manejada, como lo es a través de técnicas estadísticas y de probabilidad, por medio de la utilización de coeficientes de variación de estos parámetros, los cuales permiten llevar a cabo un análisis probabilístico de la situación.

Si se posee suficiente información geotécnica y geológica de la zona, donde se va a construir una carretera, permitirá que se disminuyan los costos de construcción y conservación, se mejore la calidad de los trabajos y se evite incurrir en errores que generen un incremento en el costo del proyecto.

Por las consideraciones anteriores y a que en la infraestructura vial existen elementos como los muros de retención, y trabajos como la estabilización de taludes, que se ven afectados en gran cuantía por la variación que pueden presentar los suelos; se vuelve necesario aplicar procedimientos que contribuyan con la cuantificación de la incertidumbre en los parámetros de resistencia de los suelos, de forma tal que favorezcan al diseñador en el proceso de diseño conociendo la variabilidad con la que se está trabajando.

## CONCLUSIONES

- Un suelo puede variar su grado de saturación dependiendo de las condiciones que se presenten a su alrededor, y esto puede generar afectaciones en los parámetros de resistencia del suelo; por lo que es muy importante tomar en cuenta estas posibles variaciones en los cálculos de diseño de las estructuras. Esto se demuestra observando los cambios que sufren los factores de reducción al variar los parámetros para la realización del análisis probabilístico.

- Los resultados que ofrece esta metodología permiten que el diseñador pueda conocer los posibles cambios que podrían presentar las condiciones del suelo, y de esta manera tomar decisiones más informadas con respecto al diseño de las estructuras, ya que se cuantifican las incertidumbres con las que se están trabajando, conociendo preliminarmente la probabilidad de falla de la estructura. Además, permite conocer la variabilidad de las características de los suelos típicos de la zona.

- Los métodos probabilísticos son herramientas que contribuyen en el análisis y la toma de decisiones ante posibles problemas geotécnicos que se puedan presentar, debido a las variaciones del suelo y la incertidumbre que conlleva trabajar con suelos no saturados.

- El coeficiente de variación que se obtiene en el proceso del análisis probabilístico, muestra la afectación que generan los cambios en los parámetros de resistencia del suelo, en los cálculos del diseño geotécnico de las estructuras. Esto permite ver la importancia de tomar en cuenta estas afectaciones, y por ende, la realización de los cálculos de la probabilidad de falla.

- En la infraestructura vial, la optimización de los recursos es de gran importancia en la construcción y conservación de estas estructuras, ya que su adecuado uso favorece el desarrollo de la zona permitiendo obras que satisfagan a los usuarios a través de un buen servicio. El uso de metodologías que propicien una buena utilización de estos recursos en la fase de diseño, como lo es el análisis probabilístico de las estructuras geotécnicas, se vuelve una herramienta de gran ayuda para la cuantificación de la incertidumbre a la hora de la toma de decisiones.

## BIBLIOGRAFÍA

Alanís Araiza, A. O. (2012). Deformación volumétrica en suelos no saturados. Querétaro, México.

Alfaro Soto, M. Á. (2008). Geotécnia en suelos no saturados. Colombia.

Asociación Costarricense de Geotécnia. (2012). Código de Cimentaciones de Costa Rica. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Barakat, S., Alzubaidi, R., & Omar, M. (2015). Probabilistic-based assessment of the bearing capacity of shallow foundations. *Arabian Journal of Geosciences* , 6441-6457.

Barrera Bucio, M. (2002). Estudio experimental del comportamiento hidro-mecánico de suelos colapsables. Barcelona.

Barrera Bucio, M., & Garnica Anguas, P. (2002). Introducción a la mecánica de suelos no saturados en vías terrestres. Sanfandila, Querétaro, México.

Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices*. California: Prentice-Hall, Inc.

Depool Rivero, R., & Monasterio, D. (2013). Probabilidad y Estadística. Aplicaciones a la Ingeniería. Universidad Nacional Experimental Politécnica.

Fredlund, D. G., Morgentern, N. R., & Widger, R. A. (1978). *The Shear Strength of Unsaturated Soils*. Canada.

Hidalgo Montoya, C. A., & Pacheco de Assis, A. (2011). Herramientas par análisis por confiabilidad en geotécnia: la teoría. *Revista Ingenierias Universidad de Medellín*.



LanammeUCR

**LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**

**PROGRAMA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE  
PITRA**

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, PhD.

*Coordinador General*

Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA

*Subcoordinador*

**UNIDADES**

**Unidad de Auditoría Técnica (UAT)**

Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc

*Coordinadora*

**Unidad de Seguridad Vial y Transporte (USVT)**

Ing. Diana Jiménez Romero, MSc, MBA

*Coordinadora*

**Unidad de Normativa y Actualización Técnica (UNAT)**

Ing. Raquel Arriola Guzmán

*Coordinadora*

**Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP)**

Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD.

*Coordinador*

**Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional (UGERVN)**

Ing. Roy Barrantes Jiménez

*Coordinador*

**Unidad de Gestión Municipal (UGM)**

Lic. Carlos Campos Cruz

*Coordinador*

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Katherine Zúñiga Villaplana / Óscar Rodríguez Quintana

Boletín técnico: ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE ESTRUCTURAS GEOTÉCNICAS / Octubre, 2017