

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería
Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Modelación físico-numérica del talud aguas abajo y cálculo de factor de seguridad en el dique auxiliar de la presa de tierra Alacranes

Autor: Pablo Andrés Luna Piedra

Tutor: Dr. C. Michael Álvarez González

Santa Clara, junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Contruccion

Academic Department of
Hydraulic Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Physic and numerical modeling of downstream slopes and factor safety estimate of auxiliary embankment in Alacranes earthen dams

Author: Pablo Andrés Luna Piedra

Thesis Director: Ph. D. Michael Álvarez González

Santa Clara, june, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria

Dedico este trabajo especialmente a:

Mis padres y hermana: Que han sido imprescindibles en el transcurso de mi vida de estudiante y por sus grandes sacrificios brindándome apoyo en todo momento para poder lograr las metas propuestas.

Mi familia en general: Que se sienten muy identificados con mi carrera profesional y de una forma u otra han aportado sus granos de arena para que fuese posible este logro.

Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a Dios, a mis padres y mi familia, a mis amistades con las cuales hemos compartido momentos inolvidables que nunca se olvidarán, a mi tutor Dr. C. Michael Álvarez González por su gran ayuda brindada y su increíble sacrificio y atención hacia mí, y a todos los profesores que estuvieron involucrados en mi formación profesional a los cuales les estoy enormemente agradecido.

Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis de estabilidad del talud aguas abajo en el dique auxiliar de la presa Alacranes y se recalcula el Factor de Seguridad en el mismo utilizando el software GeoStudio 2007, empleando varios de los métodos clásicos más utilizados en esta cuestión y añadiendo condiciones climatológicas extremas debido a la tormenta tropical Alberto, con el fin de modelar correctamente la falla ocurrida en esta obra. A partir de los resultados obtenidos se comparan los valores de Factor de Seguridad con los ya calculados en una anterior investigación en la misma zona y se analizan los resultados lógicamente. Este proceso se realiza teniendo en cuenta una estructura metodológica y una revisión bibliográfica previa realizada en el tema que facilita la interpretación lógica de los resultados obtenidos.

Palabras claves: Modelación, presa de tierra, estabilidad de taludes

Abstract

In the present investigation a stability analysis of the slope downstream in the auxiliary dam of the Alacranes Dam is carried out and the Safety Factor is recalculated in it using the software GeoStudio 2007, using several of the most used classical methods in this matter and adding extreme weather conditions due to Tropical Storm Alberto, in order to correctly model the failure occurred in this work. Based on the results obtained, the Safety Factor values are compared with those already calculated in a previous investigation in the same area and the results are analyzed logically. This process is carried out taking into account a methodological structure and a previous bibliographical review carried out in the subject that facilitates the logical interpretation of the results obtained.

Keywords: Modeling, earth dam, slope stability

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. BASES TEÓRICO-CONCEPTUALES Y ESTADO DEL ARTE SOBRE LA MODELACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRAS	5
1.1 INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES.....	5
1.1.1 PATOLOGÍAS EN PRESAS DE TIERRA	7
1.2 PRINCIPALES MÉTODOS Y EXPERIENCIAS EN EL CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA.....	13
1.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADA AL CÁLCULO Y DISEÑO INGENIERIL EN TALUDES DE PRESAS DE TIERRA	19
1.3 MÉTODOS ESTOCÁSTICOS APLICADOS A LA MODELACIÓN DE TALUDES. MÉTODO DE MONTE CARLOS	21
1.4 ELEMENTOS DEL SISTEMAS DE VIGILANCIA TÉCNICA PARA EL CONTROL GEOMÉTRICO DE LAS PRESAS DE TIERRA	22
CONCLUSIONES PARCIALES.....	23
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS A UTILIZAR EN LA MODELACIÓN DEL TALUD	25
2.1. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS PROVENIENTES DEL SISTEMA DE CONTROL DEL EMBALSE OBJETO DE ESTUDIO.....	25
2.1.1. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS Y LOS NIVELES DE AGUA	25
2.1.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR TÉCNICAS ESTOCÁSTICAS DE PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICO DE LOS SUELOS. MÉTODO DE MONTE CARLOS	32
CONCLUSIONES PARCIALES	34
CAPÍTULO 3: MODELACIÓN Y RECÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL DIQUE AUXILIAR PRESA ALACRANES	35
3.1. ANTECEDENTES EN LA MODELACIÓN DEL TALUD EN EL DIQUE AUXILIAR DE LA PRESA ALACRANES.	35

3.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS EN EL PROCESO DE RECÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD AGUAS DEBAJO DE LA PRESA	
ALACRANES.....	37
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
ANEXO 1	53
ANEXO 2.....	61
ANEXO 3.....	64

Introducción

INTRODUCCIÓN

Las presas de tierra son una de las obras más importantes en la rama de la ingeniería hidráulica por su repercusión en el desarrollo de un país, una falla en su funcionamiento puede causar desastres mortales en poblaciones. A partir de los años de servicio que acumula de su vida útil se pueden presentar diferentes fenómenos, averías o daños que pueden afectar en menor o mayor medida el adecuado comportamiento de este tipo de obra.

El estudio de las filtraciones y la estabilidad de taludes es un aspecto tan importante como el mismo proceso del diseño (B.O.E, 1998), el conocer cómo se manifiestan en un área determinada, estando sometida a diferentes estados de carga como un proceso aleatorio de la fluctuación de los niveles de agua y los procesos de deformación como respuesta del material ante estas diversas condiciones bajo las cuales está sometida la obra es el punto de partida para nuevas investigaciones y resultados alcanzados por varios autores (Sherald, *et al.*, 1963; Vanantwerp, 1970; Armas, 1990; Chrzanowski, *et al.*, 1993; Finch, 1997; Ayes, Obras hidráulicas I, 2002, Obras hidráulicas II, 2002; Rojas, 2002; Bulley, *et al.*, 2003; Hongquan, 2004; Oral, 2010; Hernández, 2012; Álvarez, Álvarez, *et al.*, Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio presa Zaza, 2015; L. Hernández, 2015; Dhandre, *et al.*, 2016; Li, *et al.*, 2017; M. Álvarez, 2018).

En este análisis es imprescindible conocer los principales factores que influyen de acuerdo con la zona donde se realizará la obra, se hace necesario un análisis estricto de las propiedades de los suelos y la estructura de los materiales a emplear en el diseño, y chequear esto para los distintos estados de cargas: final de construcción y explotación. (Armas, 1990; Chen, *et al.*, 1990; Craig, 1995; Braja, 2001; Assis, 2004; Dhandre, *et al.*, 2016).

En Cuba ha sido necesario potencializar el desarrollo en la investigación científica en este campo, ya que después del triunfo de la revolución cubana se hace necesario incrementar el potencial hidráulico en todo el territorio nacional. Antes de 1959 solo se contaban en el territorio nacional con 13 pequeños embalses distribuidos en cuatro provincias que almacenaban alrededor de 3 000 hm³ de agua, sin embargo a fines de 2 000 se contaba con 241 embalses con una capacidad de almacenamiento de 8810 hm³ (Aspiolea, 2001), este

número sigue creciendo en la actualidad con la puesta en marcha de nuevos proyectos destinados a satisfacer las demandas socioeconómicas para el correcto funcionamiento y desarrollo sostenible de las entidades productivas y de servicios. Es por esto que, debido a su gran capacidad de embalse, fácil construcción y otros beneficios que brindan a la economía y la población ha sido de gran interés el estudio y la construcción de presas de cortinas de tierra (M. Álvarez, 2018).

La modelación matemática de los taludes incluye la definición de diversas propiedades de los elementos que componen al modelo y su objetivo es analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales. Esto implica la recolección de datos y la suposición de otras propiedades, como son las propiedades físico-mecánicas de los materiales incluyendo el suelo de cimentación y las propiedades geométricas de las distintas secciones (Recarey, 1999; J. Álvarez, *et al.*, 2012; A. Hernández, 2014; Álvarez, Álvarez, Azorín, *et al.*, 2015).

Son varios los métodos para realizar el estudio del comportamiento de una estructura de forma general, los cuales dependen de la profundidad de los análisis que se vayan a llevar a cabo dada por la complejidad y los disponibles. Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática, actualmente en desarrollo de la ingeniería aplicada al campo de la geotecnia en correspondencia con la labor de los investigadores.

Este desarrollo ha permitido la aparición y modernización de nuevos y variados métodos de modelación de fenómenos naturales, logrando con esto una mayor aplicación a obras reales en el que se disminuyen los grados de simplificación de los modelos virtuales para lograr una correspondencia de los resultados alcanzados muy próxima a la respuesta real de los materiales. Es por ello que un mejor entendimiento de los fenómenos y problemas básicos de la ingeniería que se generan en una adecuada interpretación, y caracterización de la interacción de las cargas de las estructuras y los materiales que las componen (Recarey, 1999; Mesa, *et al.*, 2017). Todas estas técnicas se implementan para efectuar el análisis de cualquier tipo de obras, es por eso que la modelación ha adquirido un carácter de método científico general (L. Álvarez, 1998).

Gracias a las novedosas técnicas empleadas en la actualidad, existen herramientas digitales para representar y modelar estos fenómenos reales logrando una simulación de los factores que actúan en la estructura y su repercusión en ella. Estas técnicas de modelación son capaces de simular prácticamente cualquier estructura por más compleja que esta sea en un tiempo y costo razonable con gran precisión bajo condiciones extremas en criterios de laboratorios virtuales, donde se ha podido demostrar en anteriores experiencias profesionales sus altas potencialidades y facilidades de empleo en términos del tipo de problema a estudiar por lo que se puede considerar que los efectos resultan viables (Vanantwerp, 1970; Chrzanowski, *et al.*, 1986; L. Álvarez, 1998; Rojas, 2002; Assis, 2004; Quindi, *et al.*, 2004; Barrios, 2010; Fernández, 2010; A. Hernández, 2014; Álvarez, Álvarez, Azorín, *et al.*, 2015; Álvarez, Álvarez, *et al.*, Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio presa Zaza, 2015, Simulación físico-numérica para evaluar el comportamiento sísmico resistente en presas de tierra, 2015; G. d. I. C. Muro, *et al.*, 2016; M. Álvarez, *et al.*, 2017; M. Álvarez, 2018).

Campo de investigación y objeto de estudio

La presente investigación se desarrolla en el campo de la Ingeniería Hidráulica aplicada a la modelación físico-numérica de los taludes aguas abajo del embalse objeto de estudio (dique auxiliar presa alacranes).

Problema de investigación

¿Cómo recalcular el factor de seguridad (FS) del talud aguas abajo de la presa objeto de estudio por medio de un modelo físico-numérico para condiciones hidrometeorológicas extremas y determinar las correcciones geométricas a la sección transversal del talud como acción de reparación durante el proceso de explotación del embalse?

Hipótesis:

Si se logra recalcular el FS del talud aguas abajo de la presa objeto de estudio para condiciones hidrometeorológicas extremas en un análisis físico-numérico del comportamiento real de los materiales empleados en el proceso constructivo, será entonces posible determinar las correcciones geométricas adecuadas en el proceso de rehabilitación de la sección transversal del talud en su estado de explotación.

Objetivo general:

Modelar el comportamiento de la estabilidad del talud en el dique auxiliar de la presa Alacranes con el estado tenso-deformacional plano utilizando un modelo no lineal elástico.

Objetivos específicos:

1. Realizar una revisión bibliográfica de la documentación especializada en el campo que se desarrolla la presente investigación.
2. Identificar los distintos métodos y formulaciones de la modelación de patologías en presas y estabilidad de taludes en presas de tierra y paredes en suelo.
3. Realizar una modelación físico-numérica de la estabilidad de los taludes empleando el programa de computación GeoStudio 2007 para el dique auxiliar de la presa Alacranes.

La presente investigación estará estructurada de la siguiente forma:

- Introducción.
- Capítulo 1: Elementos teórico-conceptuales sobre la modelación de taludes en presas de tierras y paredes en suelo.
- Capítulo 2: Caracterización estadística de los datos a utilizar en la modelación del talud.
- Capítulo 3: Modelación y recalcu del factor de seguridad del dique auxiliar presa Alacranes.
- Conclusiones.
- Recomendaciones.
- Bibliografía.
- Anexo.

**Capítulo 1. BASES TEÓRICO-
CONCEPTUALES Y ESTADO DEL
ARTE SOBRE LA MODELACIÓN DE
LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN
PRESAS DE TIERRAS**

CAPÍTULO 1. BASES TEÓRICO-CONCEPTUALES Y ESTADO DEL ARTE SOBRE LA MODELACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRAS

1.1 INTRODUCCIÓN Y ASPECTOS GENERALES

La necesidad del agua desde épocas muy remotas ha sido una de las mayores inquietudes del ser humano por la gran importancia que presenta este vital líquido en todas las esferas de la vida. En la antigüedad el hombre para sobrevivir tuvo que controlar la fuerza del agua a través de la construcción de barreras sobre los ríos para almacenar, controlar o derivar el agua mediante la canalización y basar así la economía en la agricultura.

Estos sistemas de construcción de barreras fueron imprescindibles en la evolución y el conocimiento de las civilizaciones y adoptando grandes escalas cada vez más con la necesidad y el desarrollo de la práctica. En definición, estas barreras, denominadas cortinas, generan lagos artificiales llamados embalse, y en conjunto forman un sistema que se conoce como presa.

Con el paso del tiempo estos sistemas fueron ganando tamaño y complejidad según la experiencia y la necesidad antes expuesta, es por ello que en el año 1795 se creó el primer modelo físico hidráulico gracias al ingeniero Luis Jerónimo en un tramo del río Garona (España- Francia). En 1891 se funda en Dresden (Alemania) a raíz de los grandes descubrimientos producidos anteriormente el primer laboratorio de investigaciones hidráulicas, lo que contribuyó a la investigación y formación de ingenieros en esta rama (Velázquez 2016).

En este tipo de obra el suelo ha sido el material más utilizado por su fácil obtención, pero a la vez presenta grandes complejidades debido a su variedad y múltiples propiedades físicas y mecánicas, variables en el tiempo y espacio las cuales son difíciles de entender y medir. Ya en el siglo pasado con el desarrollo de la mecánica de suelos los científicos hicieron grandes esfuerzos para dar solución a los problemas y así aplicar al diseño de presas normas y criterios que tomaran en cuenta las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constitutivos. Esta acumulación de conocimientos logró alcanzar en la actualidad obras de alta complejidad que marcan hitos en múltiples campos de la ingeniería (Gutierrez, 2009)

Nuestro país no está al margen de esto y por ello después del Triunfo de la Revolución Cubana se ha proyectado y construido una gran cantidad de presas de materiales locales. En 1964 en el Segundo Aniversario de la creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH) el Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz (1964) pronunció un discurso dándole inicio a un plan llamado Voluntad Hidráulica donde se comenzó a construir un gran número de embalses a lo largo de todo el territorio nacional, que en la actualidad alcanza el número de 242 presas administradas por el INRH. (González, 2017)

Las presas de tierras tienen una gran importancia para el desarrollo del país y entre sus funciones principales se puede mencionar el suministro de agua a las industrias, población y agricultura, el desarrollo de la pesca, el turismo y la navegación, la producción de energía eléctrica, el control de inundaciones.

Las presas de tierra poseen ventajas y desventajas las cuales se pueden resumir de la siguiente forma:

Ventajas de las presas de tierra:

- Aplicable en distintos tipos de sitio (valles amplios o gargantas estrechas).
- Aplicable a un amplio rango de condiciones de cimentación, desde rocas competentes hasta formaciones de suelos blandos y comprensibles o permeables.
- Usa materiales de la zona, minimiza la necesidad de importar o transportar grandes cantidades de material.
- El diseño es flexible, muchas posibilidades de aprovechar los materiales y las condiciones.
- La construcción es mecanizada y continua.
- Los costos unitarios del terraplén suben más lentamente que los del concreto.
- Bien diseñada se puede ajustar con seguridad a un apreciable grado de asentamiento-deformación.

Desventajas de las presas de tierra:

- Muy vulnerables por sobrevertido.
- Hay que garantizar realce para crecidas.
- Vertedero suficiente.

- Vertedero separado.
- Vulnerable filtración y erosión interna en la presa o en la fundación.

1.1.1 PATOLOGÍAS EN PRESAS DE TIERRA

La presencia de patologías estructurales y sus posibles interacciones conlleva al deterioro de las estructuras, este deterioro, puede cambiar la apariencia de éstas, afectando su comportamiento bajo condiciones de servicio o su seguridad. Las evidencias del deterioro pueden ser visibles tales como grietas o deformaciones excesivas y normalmente pueden identificarse a través de inspecciones rutinarias o de mantenimiento.

En este sentido, pueden ocurrir fallas en el embalse. Una falla es un movimiento, fractura o mal funcionamiento de alguna parte de la presa, de manera que ésta ya no cumple con su objetivo principal de diseño, la retención del embalse. Aunque si no se realiza el monitoreo y la mantención necesaria estas fallas pueden convertirse en catastróficas muchas veces, con consecuencias y daños irreversibles.

Como resultado de múltiples estudios Y. González (2017) enunció el siguiente orden de ocurrencia de fallas graves o catastróficas en presas de materiales locales a nivel mundial:

1. Rebase de la cortina.
2. Sifonamiento mecánico.
3. Agrietamiento transversal.
4. Deslizamiento del talud aguas abajo.
5. Sismos.
6. Licuación.
7. Pérdidas por filtración.

Tabla 1.1: Orden de ocurrencia de fallas: (González, 2017).

Causa	Porcentaje
Rebosamiento	30%
Filtración a través de la presa o en el cimiento	25%
Deslizamientos	15%
Fugas en conductos	13%
Erosión de taludes	5%

Causa	Porcentaje
Otras, o combinación de varias causas	7%
Desconocida	5%

En más recientes investigaciones realizadas en presas en Cuba (Molina, *et al.*, 2017) a partir del estudio de 52 casos de presas dañadas, en las 16 provincias del país, muestran que el orden actual de ocurrencia de las causas de falla, es el siguiente:

1. Deslizamiento de taludes.
2. Rebase de la cortina.
3. Sifonamiento.
4. Pérdidas por filtraciones.
5. Agrietamiento.

A continuación se caracterizan los tipos de fallas según criterios propuestos por varios autores (Cuevas, 2013; G. Muro, 2016; Armas, 2018; Duarte, 2018):

- **Rebase de agua por la cortina**

Ocurre cuando el nivel del agua embalsada supera el nivel de la corona del terraplén, provocando la erosión del cuerpo de la misma y provocando el fallo inmediato de la estructura, ya que sus materiales no están preparados para funcionar como vertedor. La principal causa de este tipo de falla es la insuficiencia del vertedor debido a una mala avenida de diseño. Otras causas pueden ser el asentamiento excesivo del cimiento y el terraplén, y el inadecuado sistema de control del nivel del agua del embalse este tipo de falla es la más peligrosa ya que una vez ocurrido no es posible contenerlo (González, 2017).

- **La falla por sifonamiento**

Ocurre al producirse la filtración, el agua ejerce una fuerza de arrastre sobre las partículas. Las partículas en el interior del suelo uniforme son retenidas por la coacción de las que las rodean, luego si la filtración aflora al exterior estas pueden ser arrastradas al exterior si el gradiente es suficiente, lo cual puede desencadenar un efecto progresivo creando huecos tubulares que pueden arruinar la obra. Un factor que contribuye a este fenómeno es la compactación del terraplén que deja alguna capa del mismo suelta y floja.

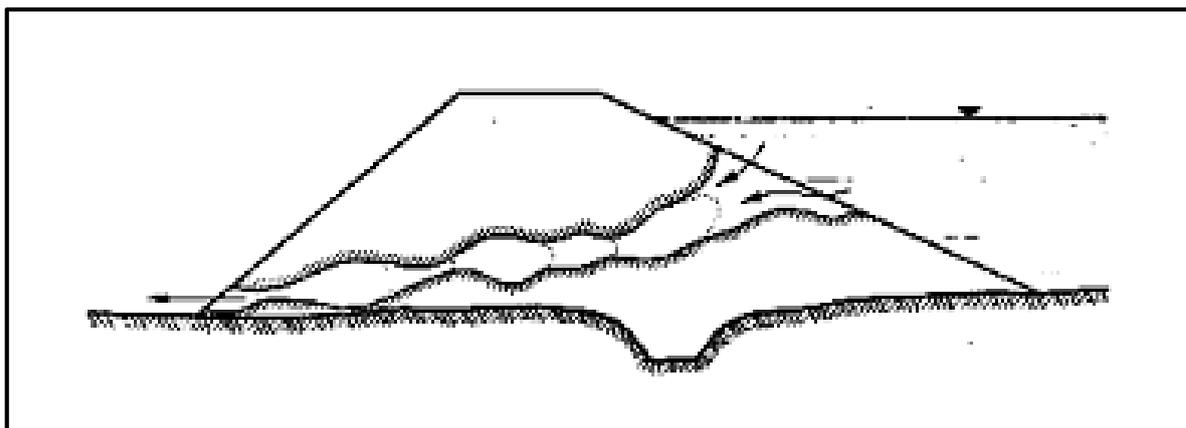


Figura 1.1: Vista del sifonamiento mecánico (Velázquez 2016)

- **La falla por agrietamiento**

Se origina al producirse en la cortina, debido a la deformación, zonas de tracción, que aparecen sea por deformación del propio cuerpo del terraplén o del terreno de cimentación. Estas grietas se pueden apreciar a simple vista por inspecciones rutinarias a la presa pueden ser muy variables. Las grietas pueden aparecer paralelas o transversales al eje de la cortina con anchos abiertos de hasta 15 cm ó 20 cm, son más comunes anchos de grietas de 1 cm ó 2 cm. Las grietas más peligrosas son las que ocurren transversalmente al eje de la cortina ya que crean una zona de concentración de flujo. También pueden aparecer grietas interiores las cuales son invisibles en la superficie.

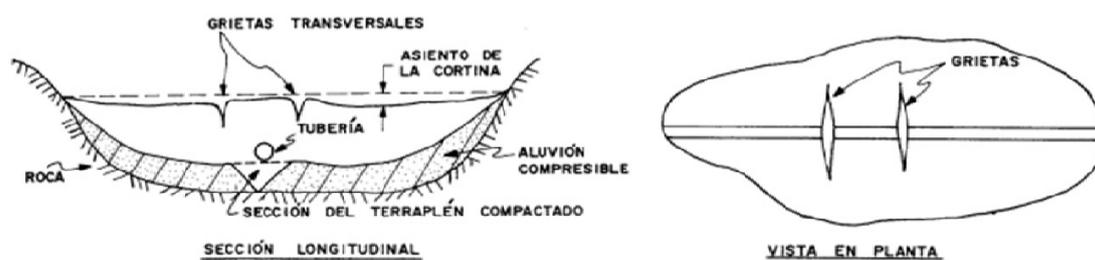


Figura 1.2: Grietas transversales (Quevedo, 2017)

- **La falla por estabilidad de talud**

Es un deslizamiento de tierra debido a que el peso de una masa de suelo es mayor que su propia resistencia a cortante en un plano favorable al deslizamiento ejerciendo como principal fuerza la gravedad. En este caso se genera un plano llamado superficie de falla cuya geometría real solo se puede apreciar cuando esta ocurre, aunque generalmente es circular. Luego se puede afirmar que esta falla ocurre fundamentalmente por dos causas fundamentales que son el

aumento de los esfuerzos actuantes en una superficie y disminución de los esfuerzos resistentes a cortante en dicha superficie

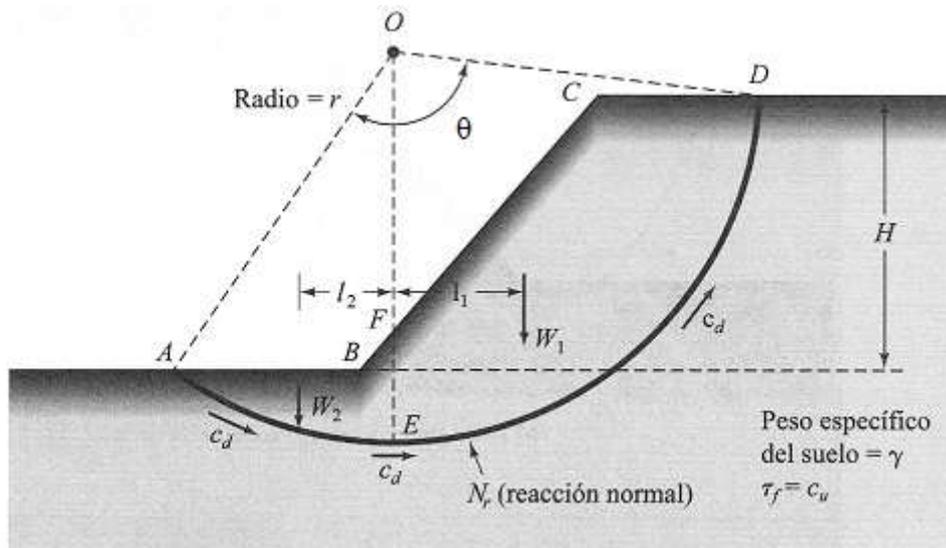


Figura 1.3: Análisis de estabilidad de un talud, vista de la superficie de falla (Duarte, 2018).

Este fenómeno puede ocurrir durante tres etapas de la vida útil de la presa las cuales son:

1. Final de construcción.
2. Durante su operación.
3. Cuando se produce un desembalse rápido.

- **Final de construcción**

Este tipo de falla ocurre antes de poner en explotación la presa, por tanto, la misma está vacía. Es poco frecuente que ocurra y nunca han sido catastróficas, los equipos de construcción se encuentran aún en la obra lo que facilita su reparación. Este tipo de falla se ha presentado en presas cimentadas sobre arcillas blandas con una gran parte de esa superficie de falla sobre ese material. Es una falla profunda y puede ser rápida o lenta dependiendo si el material de la cimentación es homogéneo o presenta estratificaciones que favorecen este movimiento

- **Fallas durante la explotación**

Esta falla ocurre sobre todo de dos tipos: profundas, con superficie de falla invadiendo generalmente terrenos de cimentación arcilloso, y superficiales, afectando solo pequeños volúmenes del talud y el talud afectado siempre es el de aguas abajo ya que la falla se produce luego que se ha establecido la línea de corriente superior (LCS) y las filtraciones por debajo de esta.

Sobre esta falla (Quevedo, 2017) establece las siguientes generalidades:

- El deslizamiento no alivia las presiones neutras, lo que trae consigo que ocurran otras fallas ulteriores, al presentar taludes más escarpados, pudiendo llegar al desbordamiento
- Es común que estas fallas ocurran con relativa lentitud, especialmente en arcillas con velocidades de un metro por día durante varios días o semanas.

La causa fundamental de este tipo de falla es producto de una línea de corriente superior muy alta y por tanto altas presiones de poros que implican una disminución de la resistencia a cortante del material.

- **Fallas por desembalse rápido**

Este fenómeno ocurre si el nivel de agua del embalse desciende con rapidez y el material que constituye el cuerpo de la presa no drena con facilidad, se mantienen las presiones en la zona afectada por el cambio de nivel de agua a la vez que desaparece el efecto estabilizador de la presión del agua sobre el parámetro del talud aguas arriba. Este fenómeno no se repite ya que en el primer deslizamiento en un vaciado rápido se disipa gran parte de las presiones neutras.

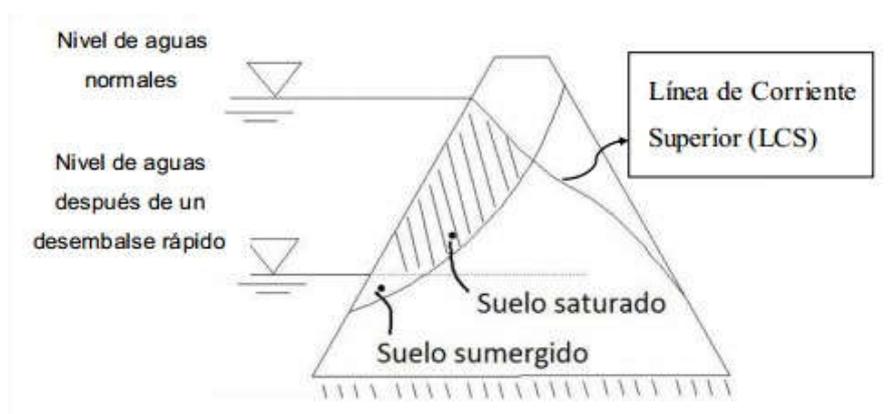


Figura 1.4: Desembalse rápido, paso del suelo sumergido a saturado (Velázquez 2016)

- **Fallas por sismos**

En este caso de falla las presas se verifican bajo dos escenarios: el sismo de operación normal y el sismo de seguridad, que generalmente coincide con el máximo creíble para el emplazamiento de la presa. Sometida al sismo de operación normal la presa debería resistir con daños menores, sin embargo, con la verificación del sismo de seguridad el objetivo es comprobar que la presa no ponga en peligro vidas humanas. Los sismos originan más frecuentemente grietas longitudinales, que como ya conocemos no son en la mayoría de los casos peligrosas, en la corona y asentamientos de la misma. Hay ciertos indicios que permiten pensar que los sismos que causan más daños a presas tienen mayores períodos (menores frecuencias) que los que causan la máxima destrucción en edificios. Por esto, presas muy próximas al epicentro de un temblor pueden salir mucho mejor libradas que otras colocadas a distancias mucho mayores.

- **Fallas por licuación**

Este fenómeno ocurre cuando se está en presencia de un suelo licuable, luego que se encuentre saturado y que ocurra un sismo o terremoto. Está asociado a limos y arenas no plásticas, las arenas sueltas con $D_{10} < 0,1$ mm y coeficiente de uniformidad, $C_u < 5$ y los limos con $I_p < 6\%$ son los materiales más peligrosos, tanto en la cortina como en el terreno de cimentación de una presa de tierra.

La forma de evitar este tipo de falla está en el estudio ingeniero-geológico correcto de los materiales que constituyen el cimiento y de los préstamos que se seleccionen para la construcción del terraplén o cortina. Ante la presencia de estos materiales propensos a la licuación se debe variar la ubicación del cierre y buscar otros préstamos de materiales más plásticos.

- **Fallas por pérdidas por filtración**

Esta falla constituiría como grave, aunque no sea catastrófica ya que se afecta el objetivo principal de la obra que es retener el agua y almacenarla. Estas filtraciones son debidas generalmente a malos estudios de la geología del vaso del embalse, los suelos con presencia de carso o cavernas son muy propensos a este tipo de fallo debido a la permeabilidad que poseen.

Las fallas ocurren predominantemente en los primeros años de la vida de la presa. Casi una tercera parte de las fallas ocurrieron durante el primer año y más de la mitad ocurrieron durante los primeros 5 años.

Tabla 1.2: Distribución de las fallas en función de la edad de la presa (González, 2017)

N° de años desde el final de la construcción	Falla por Rebase %	Falla por filtración %	Falla por deslizamiento %	Falla por Fuga en conducto %
0-1	9	16	29	23
1-5	17	34	24	50
5-10	9	13	12	9
15-20	30	13	12	9
20-30	13	12	12	5
30-40	10	6	11	4
40-50	9	6	0	0
50-100	3	0	0	0

1.2 PRINCIPALES MÉTODOS Y EXPERIENCIAS EN EL CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA

Este tema ha sido estudiado a través de la historia por muchos autores que han aportado sus experiencias y conocimientos llegando a realizar importantes descubrimientos, plasmando sus teorías y métodos durante el transcurso de los años y hasta la actualidad. Esto comenzó cuando en 1776 Coulomb preconizó la superficie de deslizamiento plana, hipótesis que perduró hasta principios del siglo pasado por lo prestigioso y autoritario que era el autor. Constituyó el primer paso para el análisis de estabilidad de taludes sin utilizar métodos empíricos.

No fue hasta 1845 que Collin expuso por primera vez una superficie de falla curva e imaginó mecanismos de falla similares a los que se consideran en la actualidad, esta hipótesis era más acertada que la de Coulomb, sin embargo, la impecable trayectoria del mismo en la mecánica de suelos opacó inicialmente los planteamientos del primero citados en los estudios presentados según Barbier (2017). Luego otros autores siguieron presentando sus teorías y métodos, y adaptando los ya existentes a los nuevos conocimientos, se pueden mencionar cronológicamente: Fellenius (1927), Fellenius (1936), Janbu (1954), Bishop (1955), Morgenstern y Price (1965), Spencer (1967), U.S. Army Corps of

Engineers (1970), Horta (1970), Anddes Asociados (2013), entre otros muchos más (Hernandez, 2014).

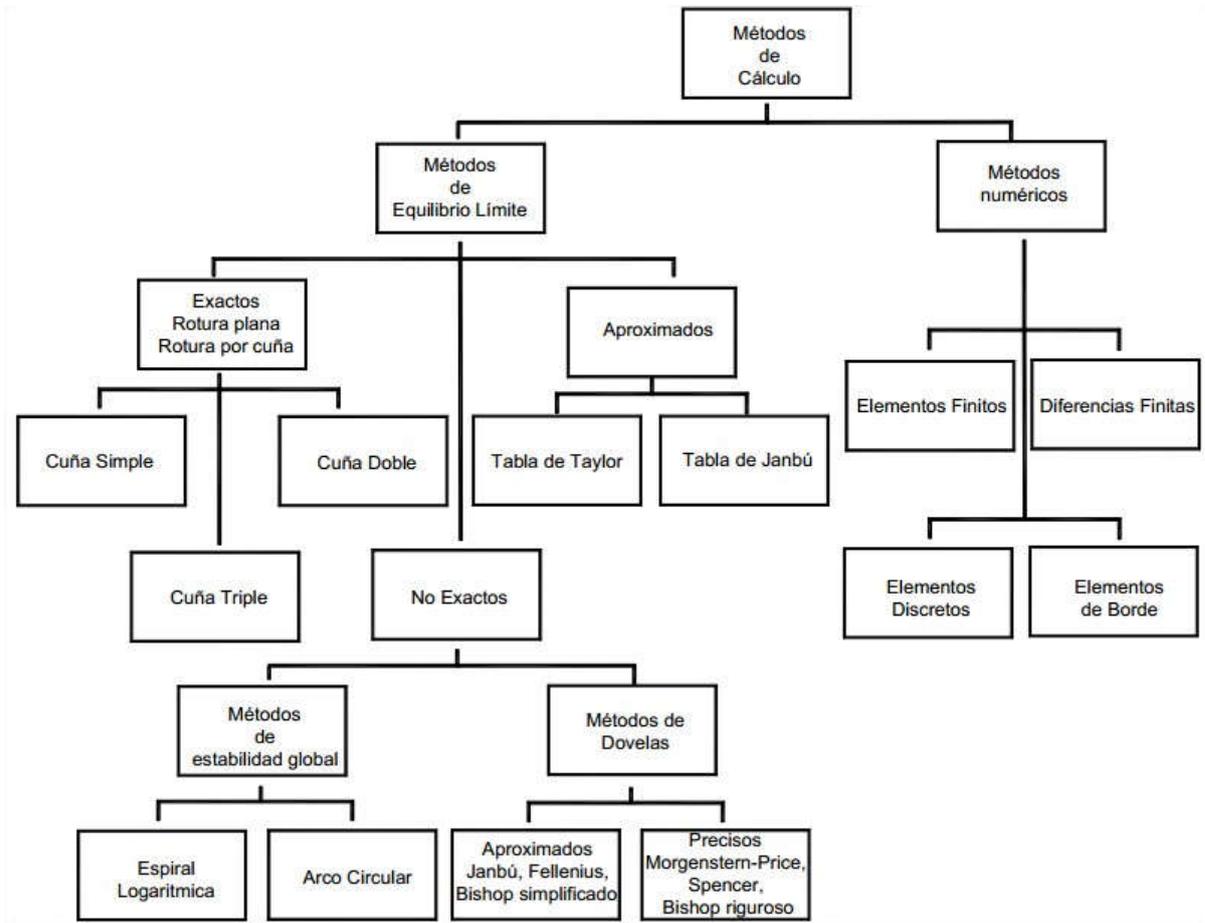


Figura 1.5: Representación de los métodos de cálculo de estabilidad de talud (Azorin, 2014).

- **Definición de Factor de seguridad**

Estos métodos están dirigidos principalmente a calcular un FS contra la falla de un talud, el cual se puede definir como el valor resultante de dividir la resistencia al corte disponible del suelo, a lo largo de una superficie crítica de deslizamiento, por la resistencia a corte requerida para mantener el equilibrio:

El FS en un talud tiene que ser mayor a 1, si es igual a 1 el talud se encuentra en equilibrio, pero puede fallar en cualquier momento y si es inferior a 1 indica que el movimiento a lo largo de la superficie de deslizamiento es posible. A continuación, se muestra una tabla con los factores de seguridad recomendados a tener en cuenta en el diseño de taludes, ver tabla 1.3.

Tabla 1.3. (Barbier, 2017).

Factor de seguridad	Significación
Menor que 1.0	Inseguro
1.0-1.2	Seguridad dudosa
1.3-1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudoso para presas
1.5 o mayor	Seguro para presas

El análisis de taludes en presas de tierra está orientado a obtener el FS del mismo, por medio de métodos y formulaciones matemáticas. Entre los grupos de métodos se encuentran los métodos de equilibrio límite que se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. No tienen en cuenta las deformaciones del terreno, y suponen que la resistencia al corte se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la curva de rotura (Gonzalez, 2013).

Estos métodos son basados en el método general de las dovelas, por lo que se necesita conocer la superficie de falla crítica a la cual se asocia el FS mínimo. Para su determinación necesariamente hay que aplicar un proceso iterativo, tanteando distintas superficies de fallas, con su radio y centro correspondiente, hasta que se encuentre la de factor seguridad mínimo, lo cual resulta muy difícil y extenso.

El método de Ostrovski es uno de los más utilizados para la determinación de esta superficie de falla y parte de las recomendaciones dadas para el radio a usar y la determinación del centro crítico.

Tabla 1.4. Radios recomendados para el emplear el método de Ostrovski (Duarte, 2018).

Talud	R/H			
	1:1	1:2	1:3	1:4
R_m	1,65	1,95	2,60	3,60
R_{máx}	2,20	2,50	3,30	4,70
R_{mín}	1,10	1,40	1,90	2,50

Con el radio medio (R_m) se determina geoméricamente el centro crítico como se puede apreciar en el siguiente esquema

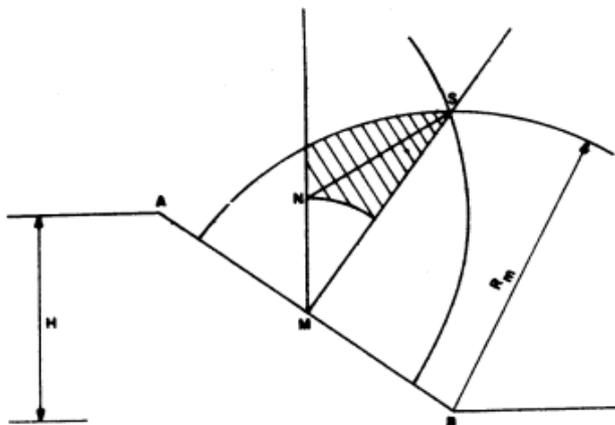


Figura 1.6. Elementos del método de Ostrovski (Duarte, 2018).

El centro crítico se encontrará en la recta NS y se busca a lo largo de esta recta hasta el encontrar el FS mínimo. Luego se determinan los factores de seguridad para ese punto en $R_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{i}n}$.

De manera simplificada se explican a continuación los principales métodos utilizados en la actualidad para la modelación de estabilidad de taludes:(Armas, 2018) (ver Anexo 1 para sus formulaciones).

- **Método de las dovelas de Fellenius**

Conocido también como Método Sueco, Método de las Dovelas o Método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el FS. Este método supuso que ($\beta = \alpha$), o sea, la resultante de las fuerzas que actúan en las caras verticales de las rebanadas es paralela a la línea de deslizamiento no tiene en cuenta la fuerza entre dovelas Supuso que la presión de contacto es similar al peso de cada rebanada. Este método se aplica para suelos c y Φ .

- **Método de Bishop**

Bishop (1955) presentó un método utilizando dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas., toma como hipótesis para poder solucionar el análisis de la estabilidad de taludes utilizando el enfoque general del método de las dovelas que $\beta = 0$, las fuerzas entre dovelas son horizontales, lo que significa que no toma en cuenta la fricción entre las dovelas, siendo $\Delta x = 0$ y por tanto ΔT tiene la dirección horizontal como ΔE . La solución rigurosa de Bishop es muy compleja y por esta razón se utiliza una versión simplificada de su método en la que plantea que la resultante de las fuerzas a ambos lados de una dovela es horizontal y que el factor de seguridad encontrado es el mismo para todas las fallas.

Por otra parte la resistencia al cortante utilizada en el análisis del método es la resistencia solicitada en lugar de la resistencia máxima, la relación entre una y otra es igual al inverso de factor de seguridad.(Benavides, 2015). Este método satisface el equilibrio de momentos y tiene soluciones mucho más exactas y en comparación con métodos de más precisión los valores de factor de seguridad no son significativamente diferentes. Este método analiza solo superficies de falla circulares, por lo que sería su mayor restricción.

Bishop desprecia la fricción lateral en la cara de la dovela, y Fellenius admite un β mayor a θ , siendo ambas hipótesis condiciones extremas del comportamiento del suelo

El método simplificado de Bishop es uno de los métodos más utilizados actualmente para el cálculo de FS de los taludes. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario.

- **Método de Janbu**

Janbu en presenta un método de dovelas para superficies de falla curvas, no circulares. Este método se basa en la suposición que las fuerzas entre las dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante, establece un factor de corrección el cual depende de la curvatura de la superficie. Confeccionó ábacos que se basaban en círculos críticos a pie de talud para el cálculo del factor de seguridad

- **Método de Morgenstern-Price**

Asume que existe una función entre las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas, esta característica lo convierte en un método más riguroso que el de Spencer, esta función puede ser constante como en el método de Spencer o pudiera considerarse como otro tipo de función, sin embargo, dicha función tiene poco efecto sobre el cálculo del FS cuando se satisface el equilibrio estático y los resultados obtenidos son muy similares a los del método anterior. El método de Morgenstern y Price es muy preciso y prácticamente aplicable a cualquier geometría o perfil de suelo.

- **Método de Spencer**

Se basa en que las fuerzas entre dovelas son paralelas entre sí, por lo que tienen el mismo ángulo de inclinación, este parámetro se toma como una incógnita que se calcula al solucionar las ecuaciones de equilibrio. Este método satisface el equilibrio de fuerzas y el de momentos y su uso no está restringido solo a superficies circulares. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad.

- **Método de Elementos finitos**

Este método es uno de los métodos de solución numérica, el cual puede modelar en forma bidimensional o tridimensional. Este divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos, estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos, de hace entonces una formulación de los desplazamientos que presentan los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla que se obtiene refleja un fenómeno progresivo donde los elementos fallan simultáneamente.

Este método tiene la limitante de que en la práctica es muy difícil definir la relación esfuerzo-deformación para los depósitos de suelos naturales, además se tiene poco conocimiento de los esfuerzos reales insitu que se requieren para incorporar al modelo. El Método de Elementos Finitos (MEF) es hoy el más utilizado y probablemente, el modelo numérico más versátil para el análisis de

estabilidad de taludes, como se mencionó anteriormente se puede aplicar este método tanto para modelos en 2D y en 3D, lo que representa una ventaja sobre los demás métodos.

1.2.1 ESTADO ACTUAL DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA APLICADA AL CÁLCULO Y DISEÑO INGENIERIL EN TALUDES DE PRESAS DE TIERRA

La modelación puede ser utilizada en casi todos los problemas. Modelar una estructura es idealizar una estructura real por medio de un modelo teórico factible de ser analizado mediante procedimientos de cálculo disponibles. La modelación incluye la definición de diversas propiedades de los elementos que componen al modelo. Esto implica la recolección de datos y la suposición de otras propiedades, como son las propiedades elásticas de los materiales incluyendo el suelo de cimentación y las propiedades geométricas de las distintas secciones.

Este método es muy ventajoso ya que permite predecir o visualizar posibles fallas en las presas de tierra y poder actuar a tiempo en el mantenimiento y reparación de estas anomalías.

Como se ha mencionado anteriormente la principal causa de falla en presas de tierra en Cuba, según estudios recientes, es el deslizamiento de taludes. En Cuba ha ocurrido falla por esta patología siendo el más significativo el de la presa «Las Cabrerías» que llegó a convertirse en un fallo catastrófico.

Gracias a las nuevas técnicas tecnológicas desarrolladas en la actualidad existen varios programas de computación diseñados para la modelación de taludes y calcular el factor de seguridad utilizando los métodos existentes antes expuestos. Uno de los programas más utilizados es el GeoStudio para este tipo de situaciones.

Este programa permite realizar los cálculos de estabilidad de taludes a través de una gran variedad de métodos: Ordinario (Fellenius), Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, Cuerpo de Ingenieros Americanos, Lowe-Karafiath, Sarma, Método de equilibrio límite generalizado y Método de los elementos finitos. La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adapta prácticamente a cualquier geometría

Con la utilización de Slope/W se puede realizar una modelación de la estabilidad del talud aguas debajo de la zona de estudio de la cortina de la presa, para

evaluar el FS ante los diferentes escenarios que se pretenden evaluar en los modelos físico-matemáticos de las secciones de estudio. Este software también dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura: malla de centros y límites, por bloques, etc. Se puede modelar las acciones del agua en el terreno a través de los varios sistemas; además, el programa presenta una gran cantidad de modelos de comportamiento de los suelos.

En la figura 1.7 se muestran las distintas funcionalidades del programa y las más usadas a problemas comunes de la ingeniería.

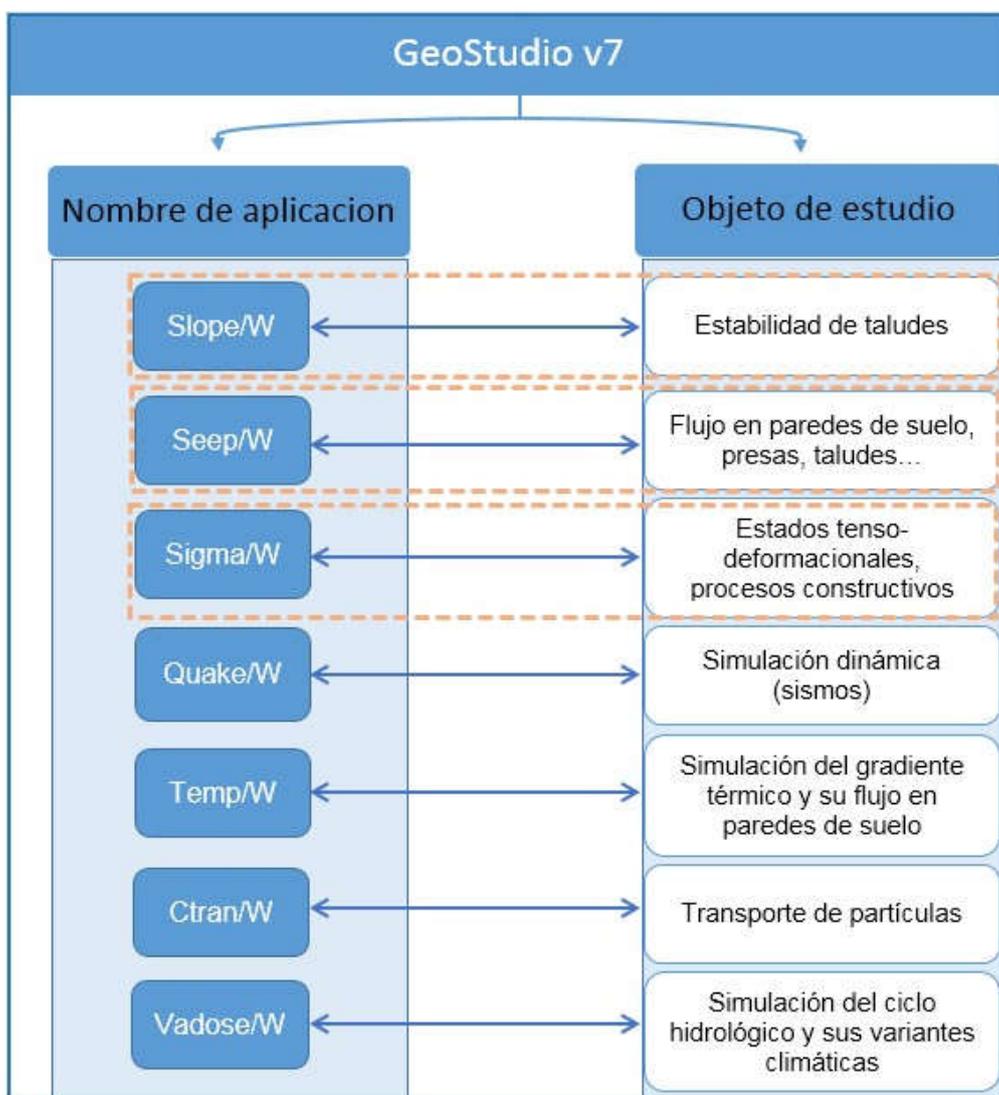


Figura 1.7. Representación gráfica del programa computacional GeoStudio v7 y su relación a problemas de la ingeniería más comunes (Fuente: elaboración propia)

1.3 MÉTODOS ESTOCÁSTICOS APLICADOS A LA MODELACIÓN DE TALUDES. MÉTODO DE MONTE CARLOS

El análisis estocástico se basa en un procedimiento matemático que emplea una solución basada en números aleatorios y que se base en el uso de la estadística de probabilidades y da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico (C. de A., 2016).

Generalmente en estadística, los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que presentan alguna componente aleatoria como característica básica. Pero en el método de Monte Carlo, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo (C. de A., 2016).

A veces la aplicación del método de Monte Carlo se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

La simulación de Monte Carlo fue creada para resolver integrales que no se pueden solucionar por métodos analíticos, para resolver estas integrales se usaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, el cual es usado para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos, donde el tiempo no juega un papel importante.

El método fue llamado así por el principado de Mónaco por ser «la capital del juego de azar», al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo data aproximadamente de 1944 con el desarrollo de la computadora electrónica. Sin embargo, hay varias instancias (aisladas y no desarrolladas) en muchas ocasiones anteriores a 1944.

El método permite resolver un problema simulando datos originales a través de la generación de números aleatorios. Su aplicación correcta depende de tres cuestiones fundamentales:

- a) la existencia de una situación del mundo real de naturaleza probabilística, factible de ser simulado mediante un proceso aleatorio,
- b) un modelo que represente una imagen de la realidad, lo cual en términos del método se traduce a poder determinar con certeza la adecuada distribución de probabilidades de la variable en cuestión,
- c) y por último, un mecanismo generador de números aleatorios (Perez, 2012).

Para el uso de este método se deberán cumplir las siguientes características como condiciones básicas según se listan a continuación y se formulan en el anexo 2:

- Criterio de Exactitud: consiste en que la muestra obtenida debe ajustarse a la distribución de la variable que se está simulando para el presente caso una distribución normal.
- Criterio de Eficiencia: la necesidad de intentar minimizar el número de operaciones necesarias para generar los valores de las variables a fin de reducir en costo computacional.
- Criterio de Robustez: los métodos diseñados han de servir para cualquier valor de los parámetros de la distribución de la variable a simular, por lo que la cantidad de datos deberá de ser lo suficientemente grande como para determinar su sensibilidad y variabilidad ante grandes y pequeños cambios numéricos.

1.4 ELEMENTOS DEL SISTEMAS DE VIGILANCIA TÉCNICA PARA EL CONTROL GEOMÉTRICO DE LAS PRESAS DE TIERRA

Los Sistemas de Vigilancia Técnica y el monitoreo de las filtraciones en la cortina de una presa de tierra se consideran de interés primario en el proceso de la explotación del embalse, que unido a la geotecnia permite estimar un comportamiento bajo determinadas incertidumbres de la cortina del embalse ante la naturaleza estocástica de las fluctuaciones del nivel de agua a las cuales está sometida (B.O.E, 1998; Ayes, Obras hidráulicas I, 2002, Obras hidráulicas II, 2002; M. Álvarez, 2018).

Es muy importante una correcta instalación y distribución espacial de la instrumentación y de los sensores a emplear en el complejo hidráulico ante

posibles fallas durante el proceso de monitoreo a partir de Sistemas Automatizados para la Vigilancia Tecnológica de los Embalses. En el caso particular de las filtraciones, se instrumentan vertedores totalizadores en determinadas secciones aguas debajo del talud para registrar el volumen de agua que pasa por el área que se monitorea en la sección que colecta el vertedor. Creando así un registro histórico de los gastos medidos en diferentes momentos y escenarios de consideración para el monitoreo técnico del embalse (M. Álvarez, 2018).

Se realiza, además, un registro de las variaciones del nivel freático de los piezómetros y pozos de alivio en el cuerpo de la cortina y al pie del talud para poder establecer una correlación histórica entre los niveles de agua del embalse y su tiempo de retardo, surgencia, permanencia y reducción de la LCS en el interior de la cortina del embalse según los criterios propuestos por B.O.E. (1998)

CONCLUSIONES PARCIALES

Basado en los argumentos previamente expuestos en los acápite previos se proponen las siguientes conclusiones parciales:

1. Se logró enunciar las principales patologías en presas de tierra que pueden estar presentes y en consecuencia puedan provocar un fallo del talud en la cortina. Además, se pudo realizar una caracterización teórica de los principales métodos de análisis de estabilidad de taludes que se aplican a ejemplos prácticos de la ingeniería en el campo de la estabilidad de taludes.
2. La existencia de diversos métodos en la solución a problemas de estabilidad de taludes implicó una revisión de los antecedentes generales y métodos más utilizados en la ingeniería a nivel nacional e internacional, por lo que se puede afirmar que estos métodos generalmente brindan resultados diferentes entre sí, y en ocasiones contradictorios numéricamente, lo que refleja una incertidumbre aun no resuelta ante la toma de una decisión práctica característica los análisis de estabilidad del talud a pesar de que no se niegan entre si cada uno de los métodos previamente comentados.

3. Se logró fundamentar el estado actual de las modelaciones de taludes, así como caracterizar el programa computacional GeoStudio v7 y sus distintas funcionalidades útiles en el tema, el cual será utilizado posteriormente en esta investigación

**CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN
ESTADÍSTICA DE LOS DATOS A
UTILIZAR EN LA MODELACIÓN
DEL TALUD**

CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS A UTILIZAR EN LA MODELACIÓN DEL TALUD

2.1. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS PROVENIENTES DEL SISTEMA DE CONTROL DEL EMBALSE OBJETO DE ESTUDIO

El Embalse «Alacranes» se encuentra situado al Sur Suroeste del Poblado de Sagua La Grande provincia Villa Clara, a 7,0 Km de distancia aproximadamente entre las coordenadas geográficas siguientes: en el hombro izquierdo E 589897,7594, N 276180.5900; y en el hombro derecho E 592077,7907, N 323045,9883. Comenzó en el año 1969 y terminó en 1972. Esta obra represa el río Sagua la Grande.

El objetivo de este embalse es proporcionar agua para el riego de 19600 ha de caña y 11000 ha de pastos en los sistemas Armonía y Macum, en las cercanías del área de estudio, así como abasto a la industria Química de Sagua. Posteriormente se le adicionó la tarea de transferir 101 hm³ de agua al sistema Sagua la Chica para el riego de 15000 ha de aquel sistema; con este objetivo se construyó en la década del 90 el Traslase Alacranes-Pavón.

Tabla 2.1. Datos fundamentales de la Presa Alacranes.

	Cota (m)	Volumen (hm ³)	Área del embalse (km ²)
N.A.M.	36.00	680.0	114.0
N.A.N.	32.32	352.40	74.60
N.M.	23.00	14.00	0.277

Fuente: Descripción por ficha técnica descriptiva del embalse suministrada por el Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos.

2.1.1. CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES CLIMATOLÓGICAS Y LOS NIVELES DE AGUA

En este acápite se realizará un breve análisis del comportamiento de las variables climatológicas para todo el 2018 que incide en específico en los meses de mayo y junio donde se manifestó la falla local del dique auxiliad de la Presa Alacranes.

La temperatura media de del año 2018 fue de 27.3 °C, valor que estuvo cercano a la norma con una anomalía de -0.2 °C. Las temperaturas máximas y mínimas fueron de 31.6 °C y 22.9 °C respectivamente. Estos valores representan una anomalía de -0.5 °C en la máxima y 0.1 °C en la mínima, comportamiento que está en el intervalo de los valores normales. La marcha diaria de las temperaturas máximas y mínimas extremas mostró valores que oscilaron alrededor de los valores normales durante el transcurso del mes (figura 2.1). Se reportó un récord de temperatura mínima en la estación de Cayo Coco en la provincia Ciego de Ávila con 20.2 °C (20.5 °C récord anterior).

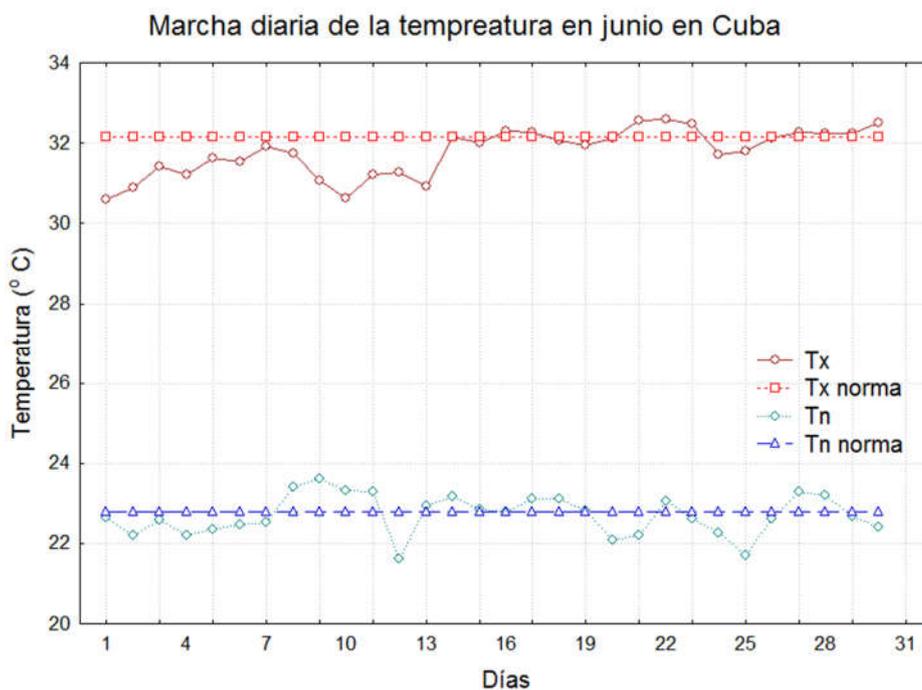


Figura 2.1. Comportamiento de las temperaturas extremas en Cuba, expresadas en °C, para junio 2018 (Fuente: INSMET)¹.

Las anomalías estandarizadas de la temperatura media reflejan valores en la norma en gran parte del país, excepto en algunos lugares donde las anomalías estuvieron ligeramente por debajo (figura 2.2). Las anomalías estandarizadas de las temperaturas mínimas tuvieron un comportamiento similar al mostrado por las temperaturas medias, aunque se observaron áreas con valores ligeramente por encima de sus valores normales (figura 2.3). Las anomalías de las

¹ Disponible en: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=ccCLIMA&TB2=/clima/CC/CCJUNIO2018.HTM&TB3=2018#home>

temperaturas máximas estuvieron ligeramente por debajo de la norma en la mayor parte del país (figura 2.4).

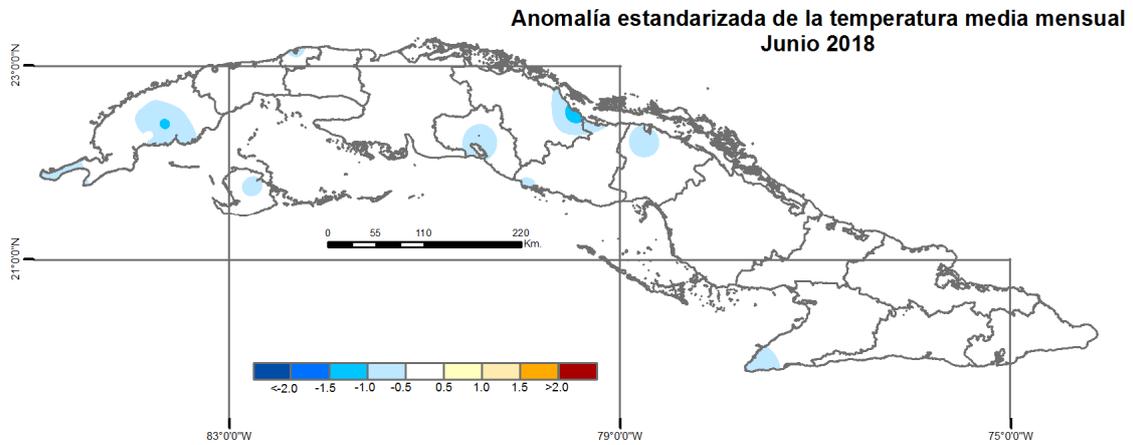


Figura 2.2. Anomalías estandarizadas de la temperatura media mensual de junio de 2018, referidas a la norma 1971-2000 (Fuente: INSMET).

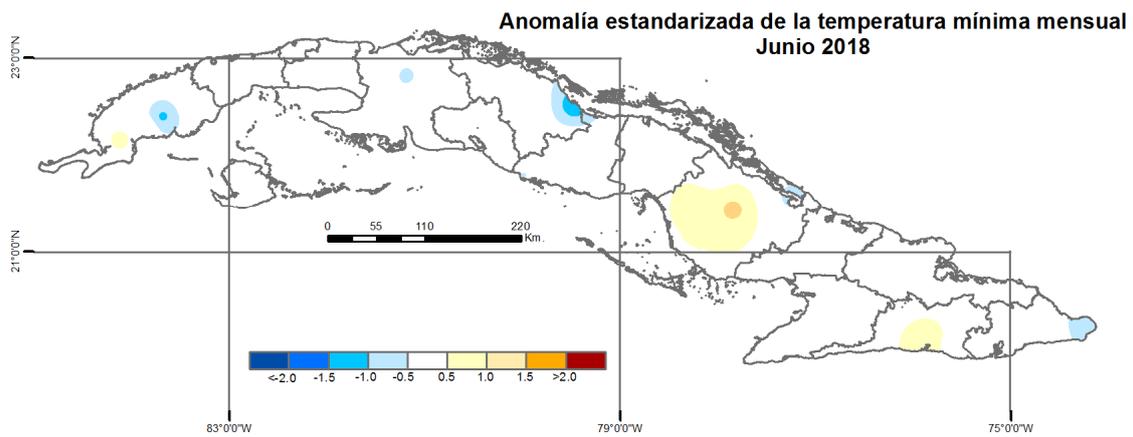


Figura 2.3. Anomalías estandarizadas de la temperatura mínima media mensual de junio de 2018, referidas a la norma 1971-2000 (Fuente: INSMET).

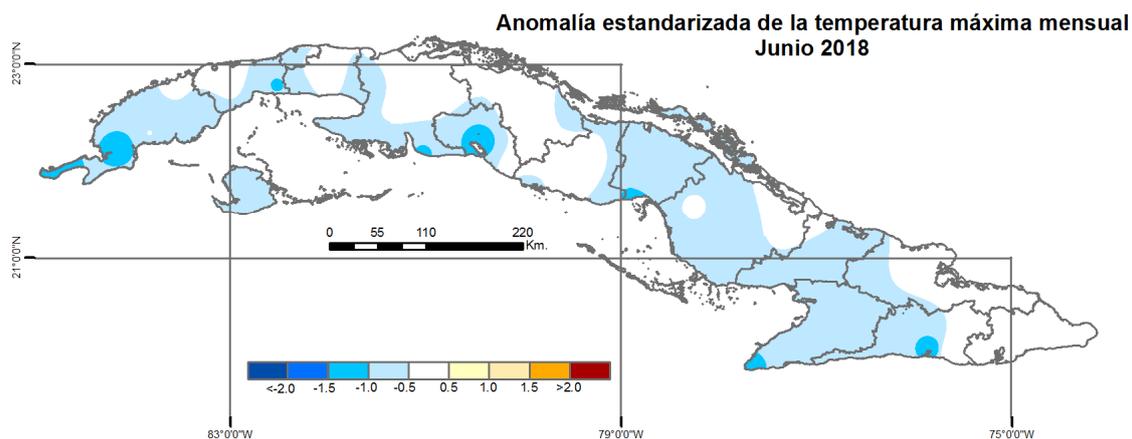


Figura 2.4. Anomalías estandarizadas de la temperatura máxima media mensual de junio de 2018, referidas a la norma 1971-2000 (Fuente: INSMET).

- **Condiciones bioclimáticas**

Las condiciones bioclimáticas medias de junio se caracterizaron por presentar anomalías positivas de la temperatura efectiva (TE), siendo más significativas desde La Habana hasta Camagüey. En correspondencia, las sensaciones calurosas propias del verano se extendieron a todo el territorio con relación a mayo. En la estación de Casablanca se reportaron 9 días con condiciones de calor intenso (según el indicador CCI), frecuencia muy cercana a la norma mensual. Predominó la categoría 2 de CCI, lo cual es indicativo de la persistencia de las sensaciones calurosas durante todo el día, principalmente en la segunda quincena del mes. Esta situación ayudó a la sensación de mucho calor por parte de la población.

- **Indicadores climáticos extremos**

El indicador acumulado de precipitación en cinco días consecutivos (Rx5d) resultó de interés en cinco de las nueve estaciones meteorológicas de referencia de las regiones occidental y central del país en el pasado mes de junio. En Punta del Este y Yabú resultó ser el más alto de los registros de la serie 1980-2018 con 483.2 y 203.2 mm respectivamente (figura 2.5). Lo contrario sucedió en las estaciones de Camagüey y Punta Lucrecia donde ocuparon el cuarto valor más bajo de la serie. En el resto de las estaciones analizadas este indicador no fue significativo.

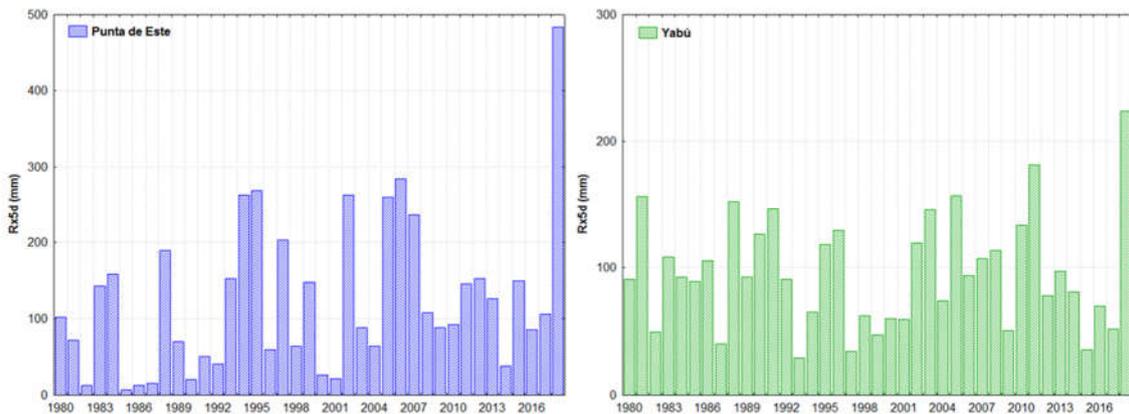


Figura 2.5. Acumulado máximo de precipitación en cinco días consecutivos para el mes junio desde 1980-2018 en las estaciones Punta del Este (izquierda) y Yabú (derecha) (Fuente: INSMET).

- **Comportamiento de las Lluvias**

Junio, segundo mes del período lluvioso en Cuba y el de mayor acumulados con 184 mm como promedio, culminó con lluvias por debajo de su valor normal en todo el país. Para Cuba, constituyó el 6^{to} menos lluvioso con un acumulado de 118.9 mm, lo que representa una anomalía de -1.28 (figura 2.6). De manera tal que los déficits clasificaron en la categoría de moderado. La región oriental fue la menos favorecida con solo 70.3 mm como promedio, representando una anomalía de -1.73 y constituye el tercer junio más seco para dicha región desde 1961 hasta la fecha (figura 7). En las regiones occidental y central, aunque en menor medida, los acumulados de la lluvia también estuvieron por debajo de sus valores normales para el mes y constituyeron el 10mo y 8vo déficit más bajo de igual período, respectivamente. En términos generales, este comportamiento contribuyó a acentuar la tendencia a la reducción de los acumulados de las lluvias del mes en los últimos años.

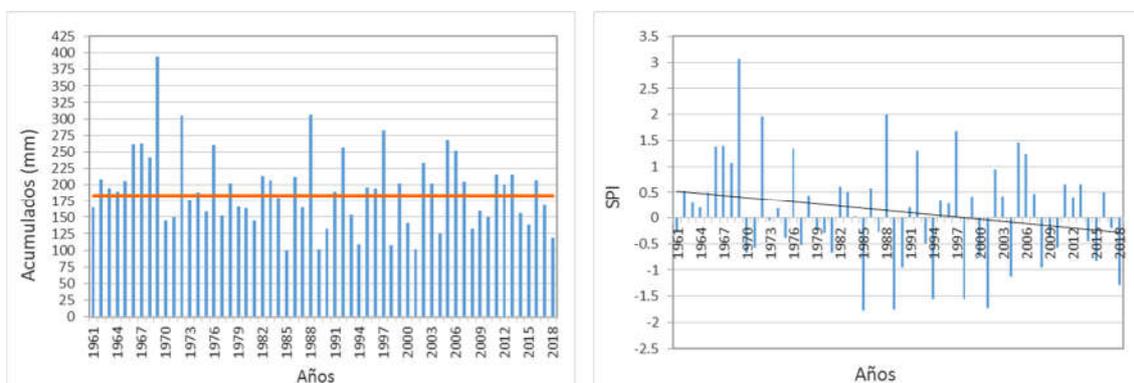


Figura 2.6. Acumulado de precipitación en mm (izq.) y expresados según el SPI (der.) para Cuba para junio durante el período 1961-2018 (Fuente: INSMET).

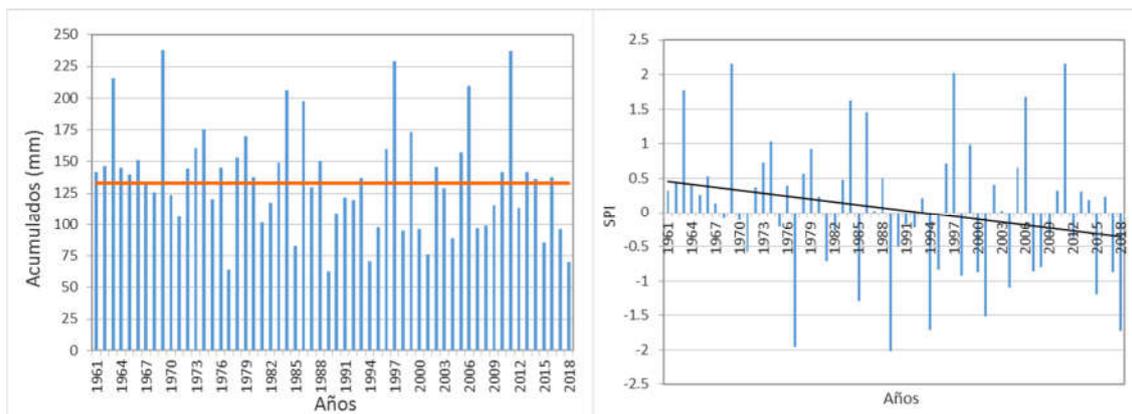


Figura 2.7. Acumulados de precipitación para la región oriental (der.) para junio durante el periodo 1961-2018 (Fuente: INSMET).

- **Características de los niveles de agua**

En el caso particular de la presa Alacranes, se realizó una representación histórica para el año 2018 (ver figura 2.8), objeto de estudio en el que se realizó la caracterización climatológica y sus correspondientes valores registrados en los niveles de agua.

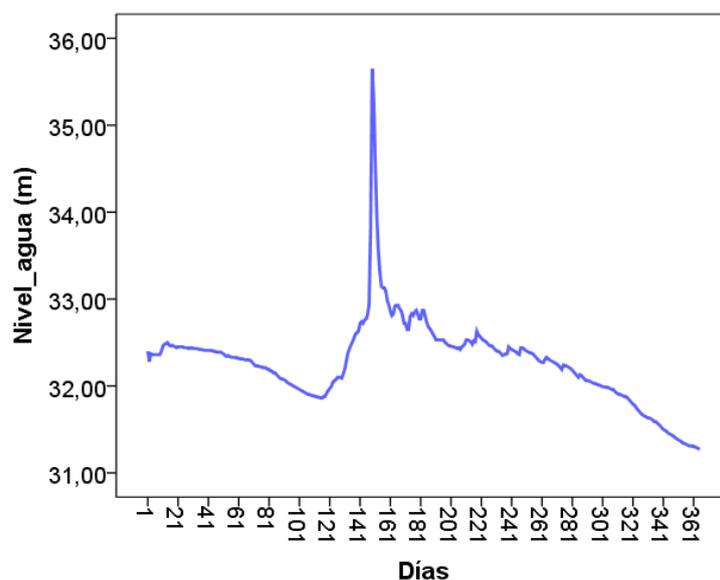


Figura 2.8. Representación de los niveles de agua diario para todo el año 2018 de la presa Alacranes, (Fuente: elaboración propia).

En este proceso se registra un valor pico correspondiente a la tormenta tropical Alberto, coincidente además con los datos previamente graficados en la caracterización del clima.

Para poder comprender el comportamiento probable y la frecuencia con la que fueron registrados estos niveles de agua se aplicaron pruebas de hipótesis para

determinar si los datos poseen una distribución normal (Kolmogorov-Smirnova y Shapiro-Wilk) con resultados significativos para la cota del nivel de agua correspondiente a la media de 32.27 m (ver anexo 3 tabla 2.2 y 2.3).

Los resultados previamente comentados fueron representados en un gráfico de frecuencias para una distribución normal asociada al proceso estadístico que caracteriza las fluctuaciones de los niveles de agua según las experiencias y criterios propuestos en sus estudios por Álvarez (2018) (ver figura 2.9).

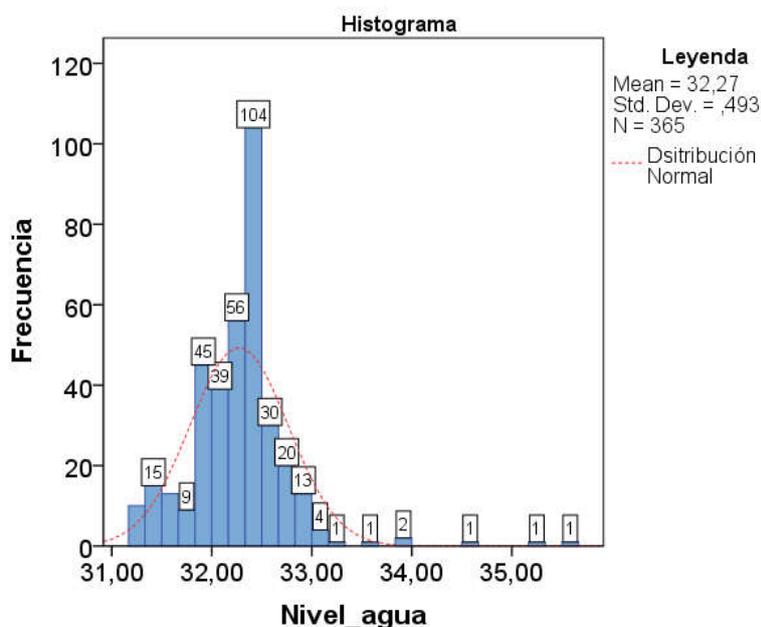


Figura 2.9. Gráfico de frecuencias para los niveles de aguas del 2018 en la presa Alacranes (Fuente: Elaboración propia).

Al realizar una revisión superficial se identifican valores de 104 registros muy similares para un nivel de aguas de 32.27 m como valor central y una serie de eventos extremos (6 registros) que corresponden a lluvias localmente fuertes en la cuenca y una tormenta tropical. Al realizar un análisis más profundo y ser representado este estudio descriptivo en un gráfico de bigotes (ver figura 2.10) se muestra el comportamiento de los eventos extremos para un intervalo del 95% de confianza con respecto al promedio histórico de los niveles da agua registrados en el embalse

Es por ello que se identifican cuatro días que componen un evento de sequía correspondiente a los días 362 al 365 y siete días como eventos de lluvias localmente intensas correspondientes a los días 148 al 154.

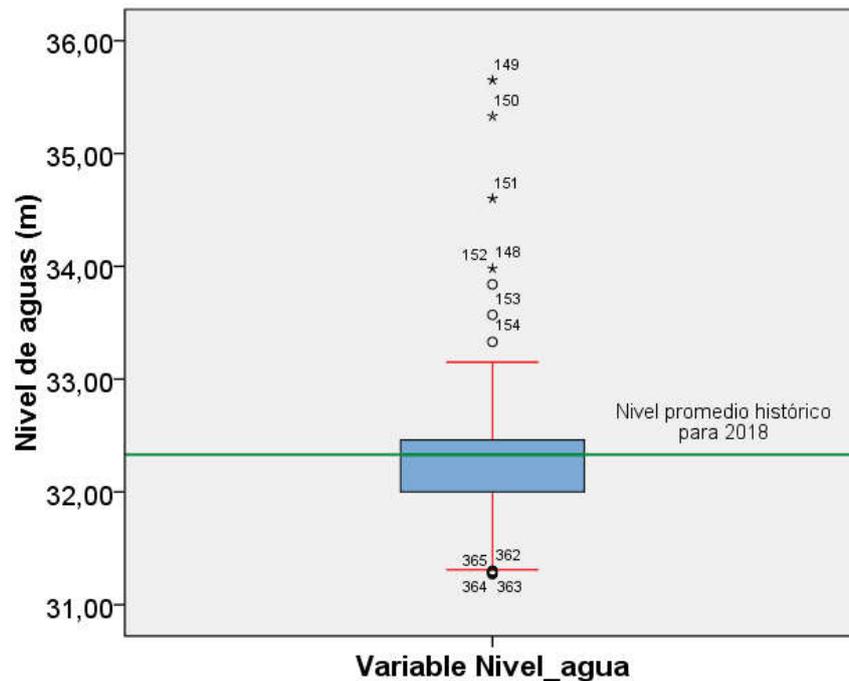


Figura 2.9. Gráfico de bigotes para los niveles de agua e la presa Alacranes (Fuente: Elaboración propia).

2.1.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR TÉCNICAS ESTOCÁSTICAS DE PARÁMETROS FÍSICO-MECÁNICO DE LOS SUELOS. MÉTODO DE MONTE CARLOS

En este acápite se realiza un análisis estadístico por medio de técnicas estocásticas de los parámetros físico-mecánicos de las propiedades del suelo que compone el dique auxiliar en el segundo cierre de la presa Alacranes.

Para realizar este estudio se decide a criterio del autor aplicar la técnica de Monte Carlos solo en el ángulo de fricción del material de la cortina para determinar cuan sensible y probables es la falla ante un nivel de aguas máximas sostenido por un periodo de 2 días y un alto grado de saturación de los suelos y capa vegetal del dique auxiliar.

Para ello se realizan inicialmente 2 000 iteraciones para obtener similar número de valores probables del ángulo de fricción interna del material para una media de 28° con una desviación estándar de ± 5 . Luego de ejecutada las corridas de datos se muestran los resultados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Valores obtenidos luego de aplicada las técnicas de Monte Carlos.

Nombre	Máximo	Mínimo	Media	Varianza	Desv. Est.	Des./Media
Fi	44.95	12.72	27.90	24.39	4.94	18%

Para comprobar de que los datos se hayan generado de acuerdo a una distribución normal en la que se le asigna una probabilidad inicial constante para los valores generados donde se contrasta una curva de normalidad a los datos tal y como se muestra en la figura 2.10.

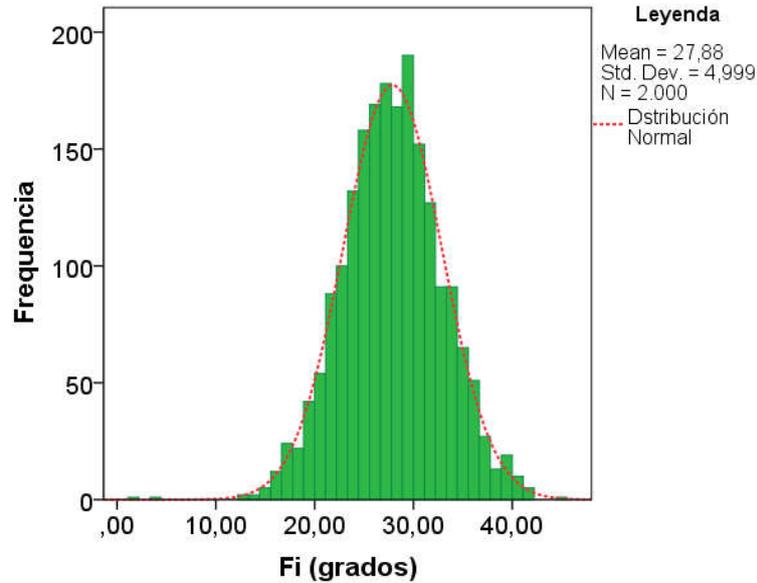


Figura 2.10. Gráfico de frecuencia para verificar la correspondencia de generación de 2000 datos aleatorios para Fi con una distribución normal.

Al regenerar los datos en el Geostudio bajo las mismas condiciones se obtiene una curva de comportamiento probable (ver figura 2.11) muy similar a la anterior por lo que reafirma que la generación realizada por el Método de Monte Carlos se corresponde con los datos previamente caracterizados.

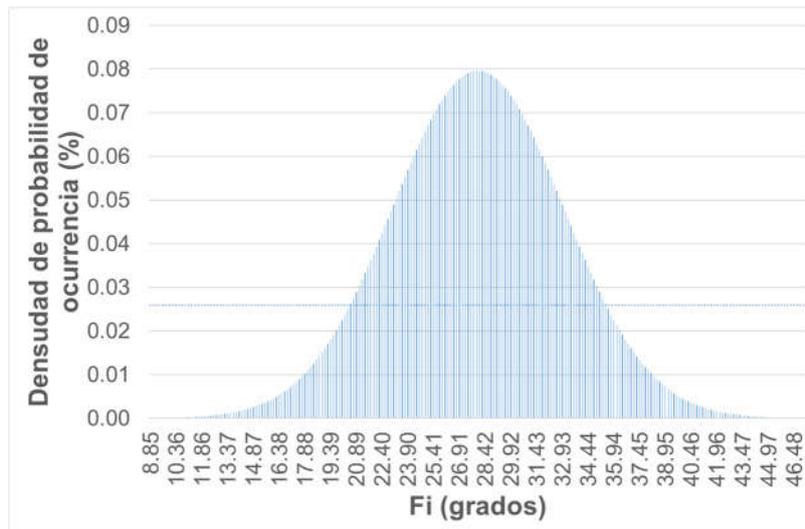


Figura 2.11. Gráfico de frecuencia para verificar la correspondencia de generación de 2000 datos aleatorios para F_i con una distribución normal en el GeoStudio.

CONCLUSIONES PARCIALES

Luego de haber desarrollado el capítulo se proponen las siguientes conclusiones:

1. Se logró cara caracterizar el clima como para todo el año 2018 como una condición necesaria a considerar en el proceso de modelación de la falla local del talud aguas abajo en el dique auxiliar de la presa Alacranes.
2. Al realizar una comparación entre las zonas donde ocurrieron las precipitaciones localmente fuertes, se identifica la zona central en áreas pertenecientes a la cuenca hidrográfica que tributa a la presa Alacranes.
3. Al realizar una generación de datos aleatorios del ángulo de fricción del material, por medio de las técnicas de Monte Carlos, se corrobora que para unos 2 000 datos el comportamiento de la data es homogénea y presenta una distribución uniforme según las pruebas estadísticas realizadas.

**Capítulo 3. MODELACIÓN Y
RECÁLCULO DEL FACTOR DE
SEGURIDAD DEL DIQUE AUXILIAR
PRESA ALACRANES**

CAPÍTULO 3: MODELACIÓN Y RECÁLULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD DEL DIQUE AUXILIAR PRESA ALACRANES

3.1. ANTECEDENTES EN LA MODELACIÓN DEL TALUD EN EL DIQUE AUXILIAR DE LA PRESA ALACRANES.

En el caso particular del dique auxiliar se poseen referencias de la ocurrencia de dos fallas locales recientes una en el 2014 y otro más reciente en el 2018. Todos anteceditos de fuertes lluvias o eventos extremos (ver fotografía 3.1).



Figura 3.1. Fallas locales del talud en el dique auxiliar de la presa Alacranes (a la izquierda en 2014 y a la derecha en 2018).

A partir del primer fallo se realiza una reparación del dique con la colocación de una banquetta en el talud aguas abajo y con las experiencias publicadas por Hernández (2014), se decide utilizar la misma geometría, propiedades físico-mecánicas de los materiales utilizados en la cortina y solo cambiar los parámetros o elementos relacionados a las condiciones de borde. Además de variar aleatoriamente el valor angular del ángulo de fricción del material de la cortina.

Para el proceso de modelación se considera utilizar las recomendaciones propuestas por Hernández (2014, p. 43) dado que se ajusta totalmente al proceso objeto de estudio que se modeló. Es por ello que los tipos de elementos finitos utilizados, así como su dimensión, densidad de malla y geometría de las capas de suelo son iguales geoméricamente y por su distribución espacial acorde a la investigación a la cual se afilia este modelo.



Figura 3.2. Diagrama base para la realización de una modelación (Fuente: Hernández, 2014).

Por lo que al utilizar los modelos propuestos se considera necesario representar las diferencias entre ambas modelaciones a partir de que fue utilizado un mismo diagrama de base, pero problemas de contornos diferentes (ver figura 3.3).



Figura 3.3. Procedimiento a seguir para el proceso de modelación (izquierda: estudio propuesto por Hernández (2014), derecha modificación al proceso de modelación).

El caso de variar los esquemas a seguir, responden a que la ocurrencia de modelar la falla del talud no solo para un evento extremo, sino poder conocer a lo largo de un periodo determinado cómo se comporta la estabilidad del talud ante las inclemencias del tiempo, en cuyo periodo se consideran eventos extremos según la caracterización realizada las variables climatológicas previamente comentadas en acápite previos.

Esta solución no pudo ser alcanzada en los estudios anteriores por lo que se utilizaron las recomendaciones realizadas para poder abordar este nuevo enfoque acorde a la complejidad del fenómeno que se pretendió modelar.

3.2. RESULTADOS DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS EN EL PROCESO DE RECÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DEL TALUD AGUAS DEBAJO DE LA PRESA ALACRANES

En el primer paso se realizó una modelación de las presiones que ejercen los niveles de agua en el embalse y dada la complejidad numérica de la implementación en el modelo requerido para utilizar la totalidad de los 356 registros de las fluctuaciones de los niveles de agua durante el año, se decidió utilizar solo el nivel de aguas alcanzada durante la tormenta tropical Alberto como nivel crítico constante en un escenario de peligro, a pesar de que se recomienda a modo de experiencia profesional por parte de los expertos en el tema de realizar siempre las modelaciones para los niveles de aguas normales del embalse y si se dispone de un registro total implementarlo acorde a la cronología documentada.

Este supuesto asumido, posee su fundamentación para poder comprender el evento extremo y eliminar la influencia de un llenado rápido en el embalse que en realidad fue uno de los múltiples procesos que ocurrieron en el periodo objeto de estudio. Además, como se realiza a nivel de pregrado, se considera válido el poder implementar un enfoque diferente como una forma alternativa de solución a un problema de ingeniería básica.

- **Modelo de Filtraciones**

Al realizar el modelo de las filtraciones se parte de establecer las zonas de interacción de la columna vertical de empuje del agua y la zona potencial de salida del flujo de agua (ver figura 3.4) quedan definidas teóricamente las condiciones de frontera para determinar la posición teórica de la Línea de Corriente Superior (LCS) en el interior del dique (ver figura 3.5) para poder determinar cuál zona se encuentra totalmente saturada y cual no. Además, se logra obtener la presión de empuje ejercida hacia el interior del dique por el nivel de agua (ver figura 3.6), el cual coincide con los datos obtenidos de campo en un levantamiento topográfico realizado a la zona de la falla.

Como el ejercicio académico está enfocado al recalcular del FS del talud aguas abajo, no se consideró realizar control o análisis al proceso de filtraciones dado que este dique no posee sistema alguno para controlar las secciones de gasto

que constituyen pérdidas por estar el nivel de aguas normales por debajo de la cota de aguas normales del embalse.

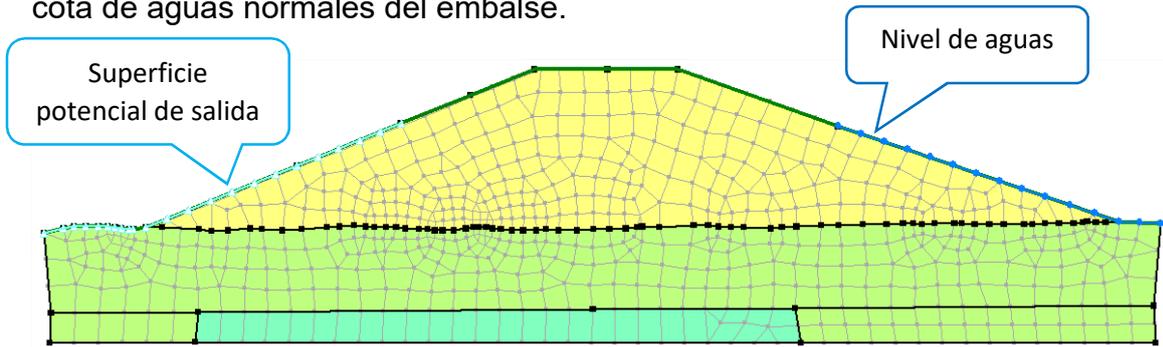


Figura 3.4. Modelación de las filtraciones en el dique auxiliar de la presa Alacranes.

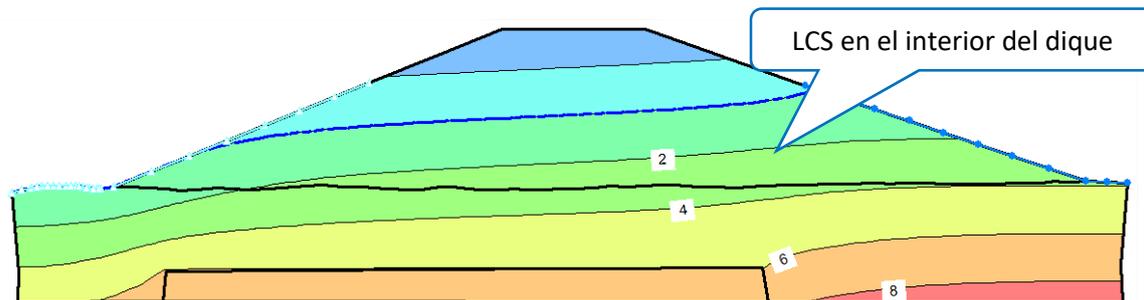


Figura 3.5. Posición de la LCS en el dique auxiliar de la presa Alacranes.

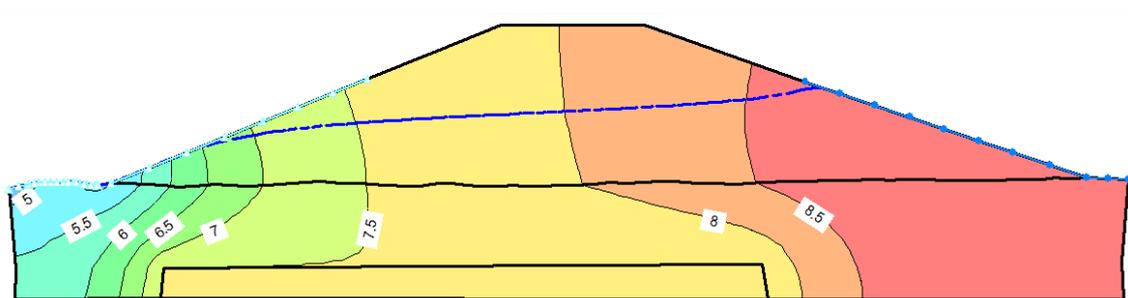


Figura 3.6. Resultados de las presiones totales de empuje generadas por los niveles de agua en el dique auxiliar de la presa Alacranes.

- **Modelo de las condiciones climáticas**

En la figura 3.7 se ilustra el diálogo de entrada de los datos climáticos necesarios para la ejecución del modelo para poder establecer las condiciones de frontera a las cuales estará sometida la superficie del modelo. Es de notar que para este caso se dificultó el proceso de implementación dado que las experiencias relacionadas a procesos similares son escasas a nivel nacional e internacional.

Por lo que los requisitos necesarios válidos para la ejecución del modelo dependen de la veracidad e integridad de los datos climatológicos disponibles para poder combinar similares épocas en cuanto a temperatura máxima y

mínimas diaria, humedad relativa máxima y mínima diaria, velocidad del viento, precipitación y periodo de lluvia en caso de lluvias localmente intensas.

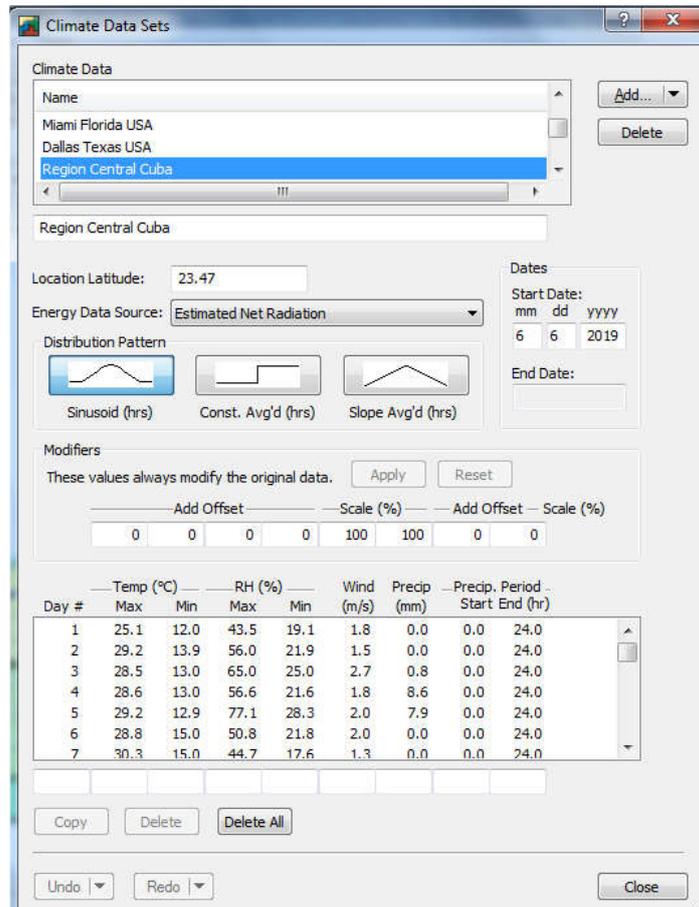


Figura 3.7. Tabla de información utilizada para la introducción de los datos climáticos al modelo.

El modelo de interacción entre las variables del clima y la estructura son representados en la figura 3.8 en la cual se define con la línea de color verde la superficie que interactúa con las variables climatológicas, además de las condiciones previamente calculadas en el modelo de filtraciones que son incluidas al inicio de cada iteración de cálculo que realiza el programa para poder comprender y visualizar la influencia de poseer una LCS constante al proceso de saturación de los suelos durante fuertes lluvias.

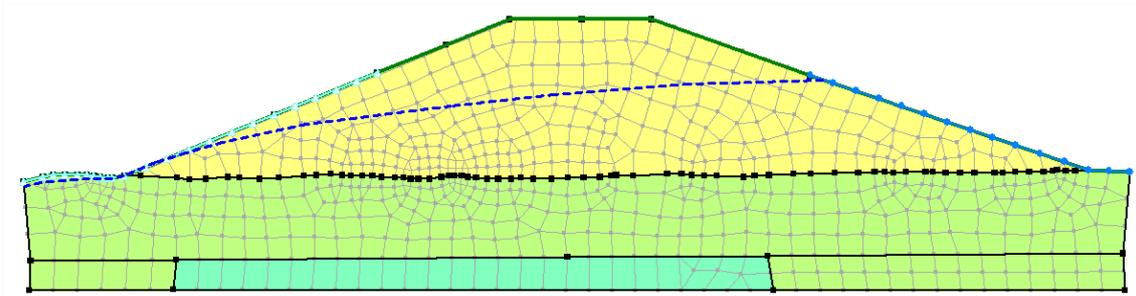


Figura 3.8. Modelo asumido de interacción del clima para el dique auxiliar de la presa Alacranes.

Al concluir la ejecución del modelo se obtiene el comportamiento de las presiones del aire en el interior del dique, así como las zonas donde se concentran las mayores presiones. Es de notar que son coincidentes precisamente en la zona en la que ocurre la falla local y al evaluar la profundidad de la misma desde la superficie se identifica una coincidencia total con valores promedios de 0.60 m hasta 1.00 m similar a los datos registrados en el levantamiento topográfico que sirvió de base para la presente investigación (ver figura 3.9). Además, posee una coincidencia de que la base de la falla se registra en la zona por donde hace su salida la LCS que fue verificada su cota con los datos topográficos en campo y son totalmente coincidentes.

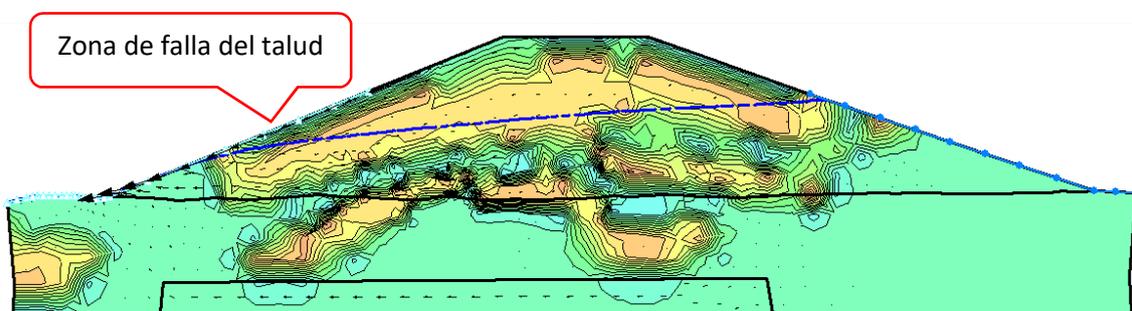


Figura 3.9. Distribución de las presiones del aire contenida en el interior del dique auxiliar de la presa Alacranes.

- **Modelo para el recálculo de la estabilidad del talud**

Para el proceso de cálculo de la estabilidad del talud fueron utilizados los métodos de Morgenstern-Price, Fellenius, Bishop y Jambu con las siguientes particularidades del proceso de implementación (ver figura 3.10):

1. Al conocer las posiciones de inicio, fin y profundidad de las fallas se utiliza la opción del programa computacional para ubicar la entrada y salida de la región de falla del talud.

2. Son asumidos los valores de presión de poro y empuje hidrostático del modelo anterior, así como la posición de la LCS y la red de flujo asociada a la misma en el interior del dique previo a cada iteración.
3. Se asumen las presiones de los gases en el interior de la estructura provenientes del modelo anterior (de interacción de las variables climatológicas) para cada iteración diaria a realizar. Así como el proceso de saturación de las capas superficiales ante la ocurrencia de las fuertes lluvias.
4. Se realizó un análisis probabilístico de la ocurrencia de la falla del talud para una variación estocástica por medio del Método de Monte Carlo para un total de 2 000 datos del ángulo de fricción interna del material con un análisis de sensibilidad espacial entre las superficies de falla y distribución de las dovelas (ver figura 3.11).

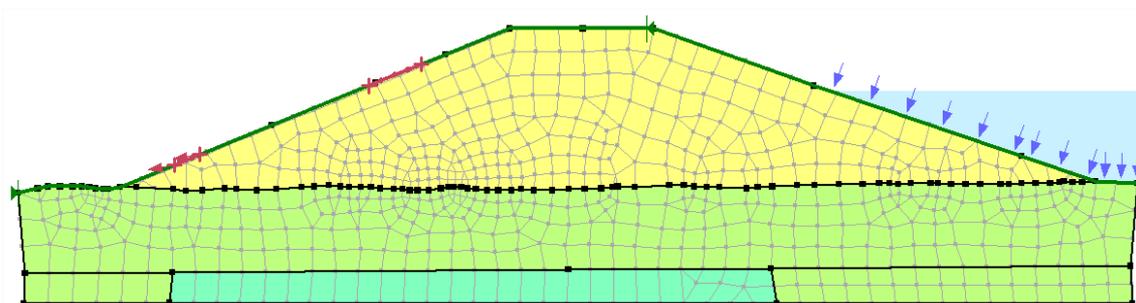


Figura 3.10. Representación gráfica del modelo para el cálculo del FS del talud seco en el dique auxiliar de la presa Alacranes

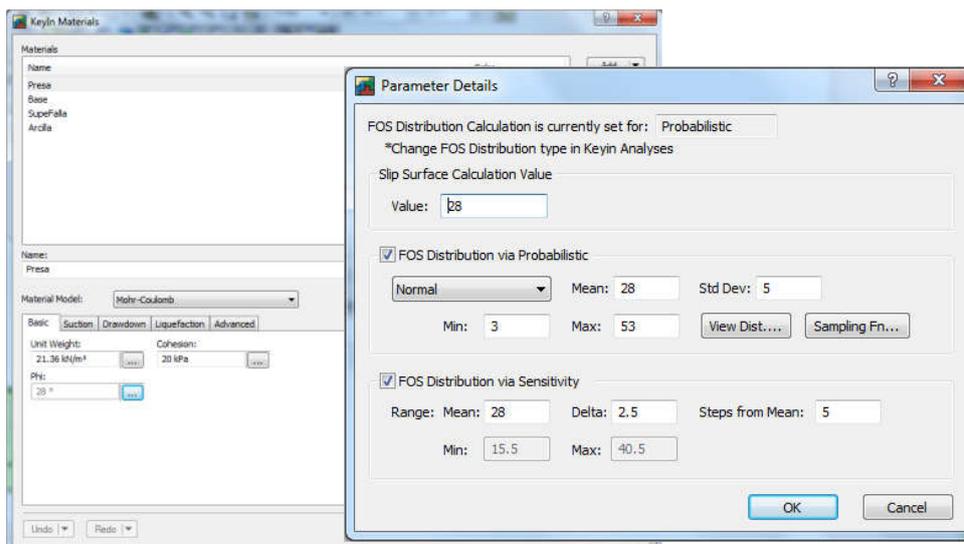


Figura 3.11. Técnica de generación de datos aleatoria utilizada en el Geostudio para el ángulo de fricción interna del material del dique auxiliar de la presa Alacranes.

Al concluir los resultados del proceso de iteración se alcanzaron los siguientes resultados ilustrados por cada uno de los métodos (ver figuras 3.12-15)

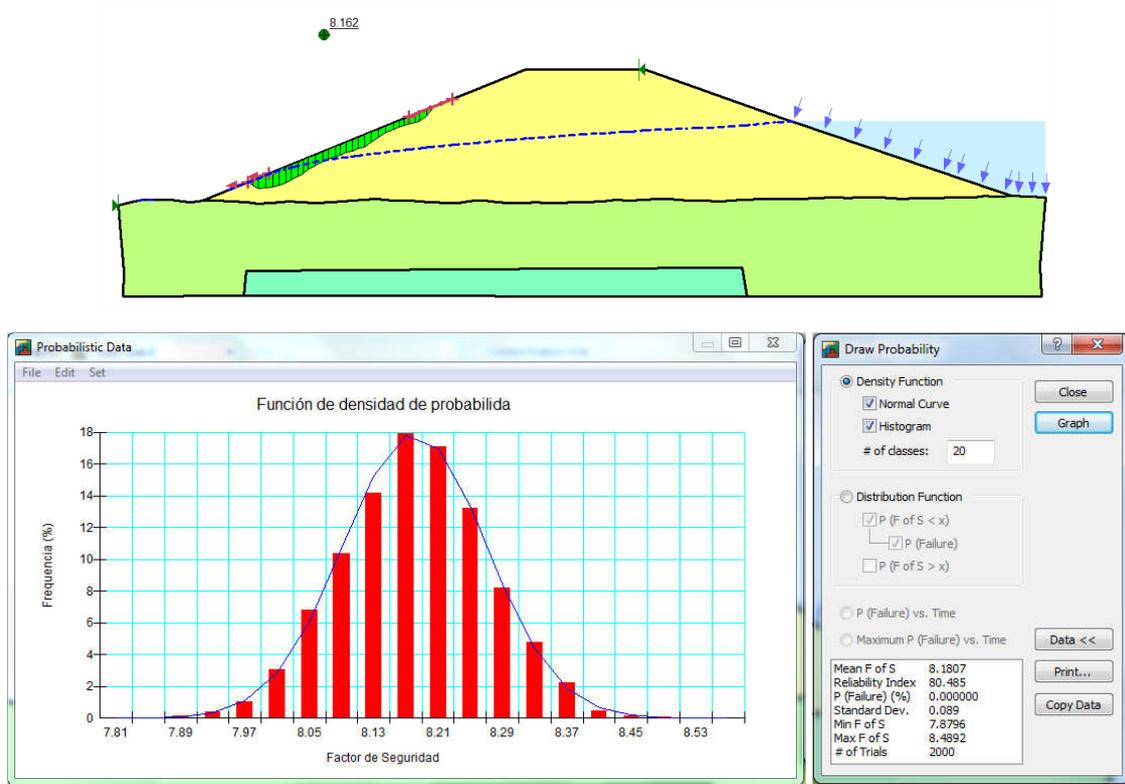


Figura 3.12. Recálculo del FS del talud seco del dique por el Método Fellenius y su función de densidad de probabilidad.

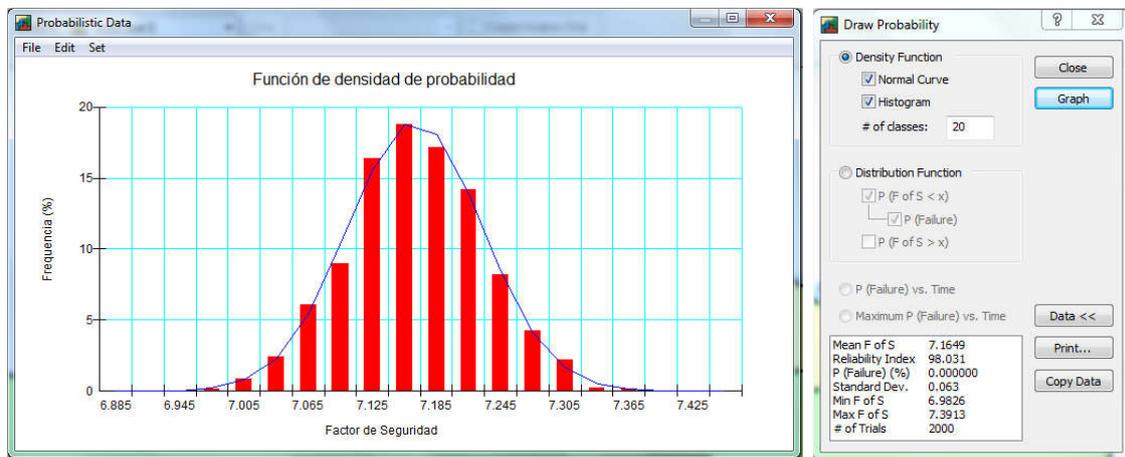


Figura 3.13. Recálculo del FS del talud seco del dique por el Método Bishop y su función de densidad de probabilidad.

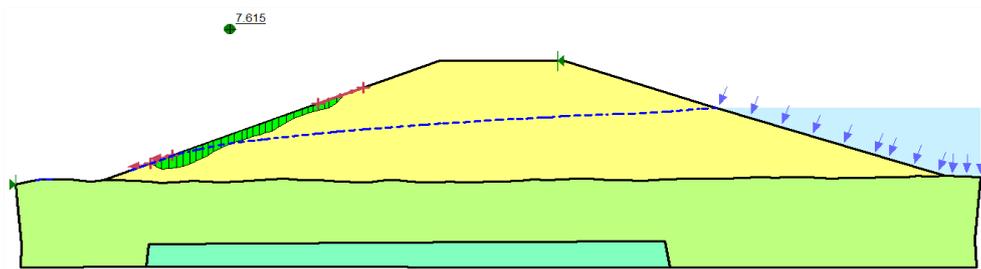
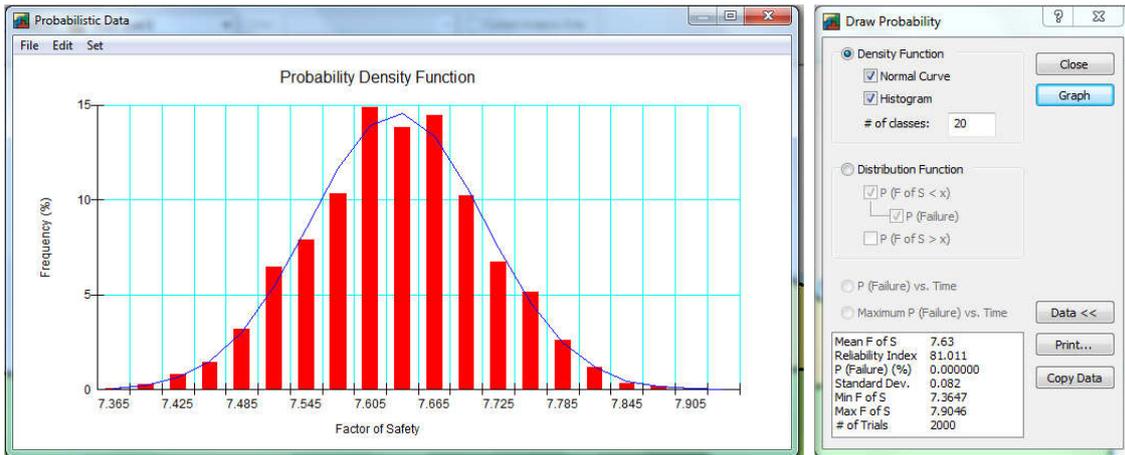


Figura 3.14. Recálculo del FS del talud seco del dique por el Método Jambu y su función de densidad de probabilidad.

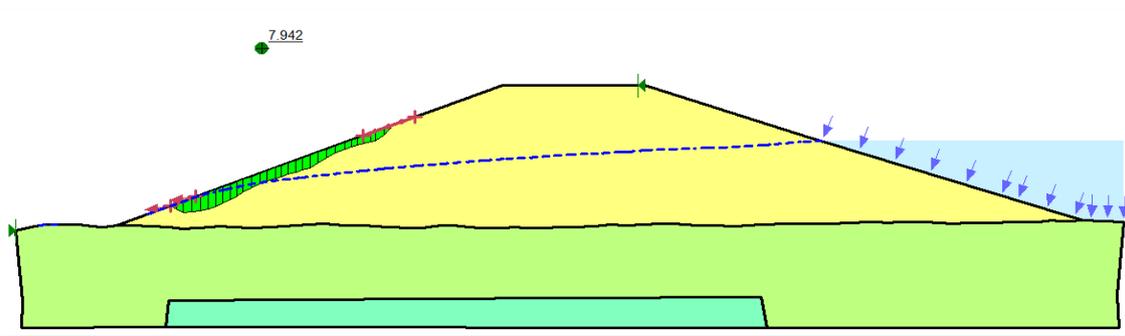
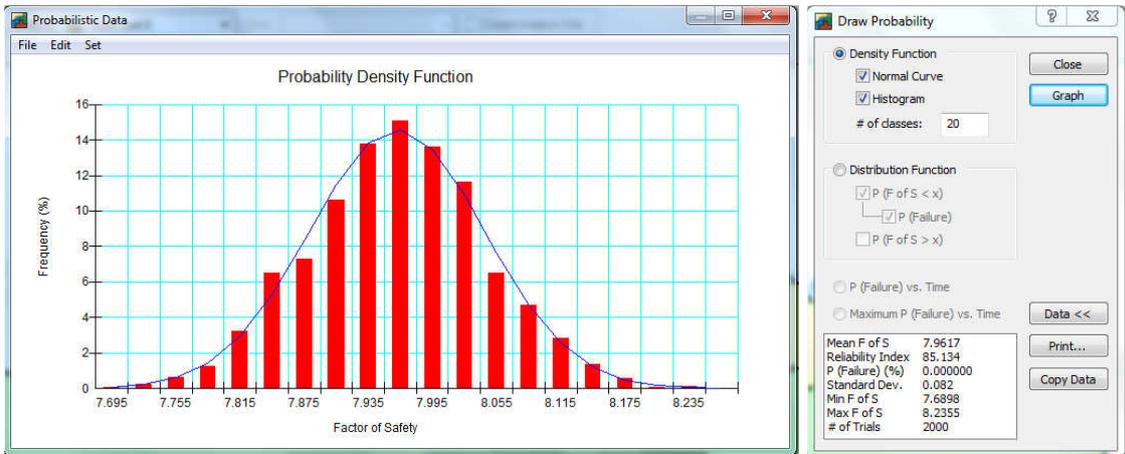


Figura 3.14. Recálculo del FS del talud seco del dique por el Método Morgenstern-Price y su función de densidad de probabilidad.

Para poder comprender mejor la influencia del proceso de variación se realiza una tabla resumen que contiene los datos de FS obtenido y su probabilidad de ocurrencia, comparada con los resultados alcanzados por Hernández (2014) (ver tabla 3.1)

Tabla 3.1. Resumen del proceso de recálculo del FS en el talud seco del dique auxiliar de la presa Alacranes.

Método	FS¹	FS²	Probabilidad (%)	FS (Hernández, 2014)
Morgenstern-Price	7.942	1.448	85.134	1.579
Fellenius	8.162	1.322	80.485	1.424
Bishop	7.152	1.465	98.031	1.568
Jambu	7.615	1.374	81.011	1.484

Nota:

- El FS¹ fue calculado acorde a los supuestos inicialmente establecidos en este acápite.
- El FS² fue calculado bajo las mismas condiciones que fueron realizados los estudios de estabilidad por Hernández en cuanto a la localización de las posibles fallas.

Al realizar una comparación entre las diferencias numéricamente significativas que se obtienen para similares métodos, se evidencia que las condiciones iniciales impuestas para el modelo a partir de los supuestos permiten ubicar correctamente la falla superficial del talud con respecto a la ocurrencia en el terreno. No siendo así el valor lógico esperado del FS¹ en el talud seco del dique el cual teóricamente se debería de deteriorar tal y como ocurre con el FS².

Es por ello que el hecho de no haber realizado una modelación no lineal en la que fuese posible relacionar los niveles de agua y variables climatológicas implica que surjan estos valores técnicamente incompatibles. Además, como la falla es tan superficial se afecta el FS¹ al ser los radios de falla tan grandes, lo cual no ocurre en el FS².

Los resultados alcanzados se consideran útiles, pues a pesar de obtener un FS numéricamente incoherente se logra obtener una ubicación exacta de la falla local del talud registrada en campo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Al concluir el presente trabajo investigativo se proponen las siguientes conclusiones:

1. Fueron identificados las principales patologías que afectan la estabilidad de taludes en presas de tierra, así como sus métodos más comunes para el cálculo del FS asociado al programa computacional GeoStudio v7.
2. Fue realizada una caracterización estadística de las variables climatológicas y de los niveles de aguas registrados en la presa Alacranes, a pesar de que por el elevado grado de complejidad en cuanto al proceso de implementación computacional del modelo físico-numérico se decidió simplificar la relación nivel de agua-clima a un valor constante del volumen contenido en el embalse.
3. Se realizó un estudio de sensibilidad para 2 000 valores del ángulo de fricción del material que se utilizó en la construcción de la cortina a partir del Método de Monte Carlo implementado en el GeoStudio v7.
4. Fueron calculados las probabilidades de ocurrencia de falla del talud acorde al FS asociado a la variación espacial del ángulo de fricción del material utilizado en el dique auxiliar de la presa Alacranes.

RECOMENDACIONES

Se recomiendan las siguientes sugerencias:

1. Implementar un modelo en el que se realice una correcta relación clima-nivel de agua sobre una base común de tiempo.
2. Recomendar los resultados alcanzados a las instituciones responsables del diseño, mantenimiento y operación de este embalse.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, M. (2018). Pronóstico de deformaciones en cortinas de presas de tierra. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
2. Álvarez, J., Mesa, M. y Recarey, C. (2012). Técnicas de calibración numérica para problemas de ingeniería. Ciudad de La Habana, Cuba: Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría» (ISPJAE) de La Habana, Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), de la Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas.
3. Álvarez, L. (1998). La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara.
4. Álvarez, M. (2018). Pronóstico de deformaciones en cortinas de presas de tierra. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría» (ISPJAE) de La Habana, Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, La Habana, Cuba.
5. Álvarez, M., Álvarez, L., Azorín, R. y Hernández, A. (2015). La estabilidad de taludes, experiencias en su análisis y solución en la ingeniería. La Habana, Cuba: Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC), Palacio de las Convenciones (CUBAGUAS 2015).
6. Álvarez, M., Álvarez, L. y Martínez, J. E. (2015). Simulación de patologías a obras hidráulicas, caso de estudio presa Zaza. La Habana, Cuba: Palacio de Convenciones, GEOCIENCIAS' 2015.
7. Álvarez, M., Álvarez, L. y Martínez, J. E. (2015). Simulación físico-numérica para evaluar el comportamiento sismo resistente en presas de

- tierra. Palacio de las Convenciones, La Habana, Cuba: VI Convención Cubana de Ciencias de la Tierra GEOCIENCIAS´2015, Evento: Sismología y Riesgos asociados.
8. Álvarez, M., Álvarez, L. y Vazquez, R. (2017). Visualización científica de datos geodésicos en presas de tierra, caso Embalse Palmarito. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38, 86-100.
 9. Armas, R. (1990). Guidelines for the design of earth dams: priority and sequence. Ciudad de La Habana, Cuba: Civil Engineering Faculty, Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría» (ISPJAE) of La Habana.
 10. Armas, R. (2018). Modelación de la línea de corriente superior de la cortina-canal del embalse Boquerones Universidad Central "MartaAbreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
 11. Aspiolea, J. (2001). Breve panorámica de los recursos hidráulicos en Cuba. En INRH (Ed.), *Voluntad Hidráulica* (pp. 16). Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).
 12. Assis, M. (2004). Fundamentos de geología de ingeniería y sus aplicaciones a obras civiles. Documento presentado en: la conferencia Preámbulo al «III Congreso Panamericano de Enseñanza-Aprendizaje de Ingeniería Geotecnia», Colegio de Ingenieros Civiles y Asociación Costarricense de Geotecnia.
 13. Ayes, G. (2002). *Obras hidráulicas I Texto básico, Primera Parte*. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico para la Educación Técnica y Profesional «Hector A. Pineda Zaldivar», Facultad de Tecnología, Departamento de Construcción.
 14. Ayes, G. (2002). *Obras hidráulicas II Texto básico, Primera Parte*. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Superior Pedagógico para la Educación Técnica y Profesional «Hector A. Pineda Zaldivar», Facultad de Tecnología, Departamento de Construcción.

15. Azorin, R. (2014). Análisis de Estabilidad de Taludes mediante técnicas de modelación numérica en 3D utilizando Plaxis 3D Foundation (V1.6). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
16. B.O.E. (1998). Obras hidráulicas. *Construcciones civiles. Presas. Subpresión. Estabilidad y deslizamiento. Materiales. Desagües profundos. Desvío de ríos. Excavaciones y cimientos.* Disponible en:
17. Barbier, Y. (2017). Modelación de la estabilidad del talud aguas abajo en la cortina del cierre principal del embalse Alacranes., Universidad Central "Marta abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
18. Barrios, I. (2010). Evaluación de las patologías existentes en una obra Hidráulica: Caso de Estudio Embalse «Palmarito». Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
19. Benavides, J. (2015). Estudio de Métodos de análisis de estabilidad de taludes para la elaboración de un software con fines educativos Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia.
20. Braja, D. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Cuarta ed.). California State University, Sacramento, Mexico: International Thomson Editores, S. A. de C. V.
21. Bulley, B., Wark, B. y Somerford, M. (2003). Dams in the darling range The Engineering Geology or Perth. Australia: Australian Gemechanics Symposium.
22. Castro, F. (1964). Discurso pronunciado por el Comandante Fidel Castro Ruz, Primer Ministro del Gobierno Revolucionario y Primer Secretario del Partido Unido de la Revolución Socialista de Cuba, en la conmemoración del II Aniversario de la Creación del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos Departamento de versiones taquigráficas del Gobierno Revolucionario. Ciudad de La Habana, Cuba: Editorial Periódico «Granma».

23. Colectivo de Autores. (2016). Técnicas de Monte Carlo. Breve descripción matemática. Algunos matemáticos que han contribuido a la historia del método Monte Carlo
24. Craig, J. (1995). Instrument of embankment dams and levees Engineering and Desing. Washington, DC, United States of America: Department of the Army U.S., Army Corps of Engineers.
25. Cuevas, Y. (2013). Análisis de las deformaciones en cortinas de presas de tierra: Caso de Estudio Embalse «Palmarito». Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas Santa Clara, Cuba.
26. Chen, Y., Chrzanowski, A. y Secord, J. (1990). A strategy for the analysis of the stability of reference points in deformation surveys. CISM Journal ACSGC, Vol. XLIV No. 2, pp. 141-149.
27. Chrzanowski, A. y Chen, Y. (1986). An overview of the physical interpretation of deformation measurements. MIT Deformation Measurements Workshop.
28. Chrzanowski, A. y Szostak-Chrzanowski, A. (1993). Enhancement of deformation modelling in engineering and geosciences by combining deterministic and generalized geometrical analyses. CSCE-SCGC.
29. Dhandre, N. M., Kamalasekaran, P. D. y Pandey, P. (2016, 17-19 Nov. 2016). Dam parameters monitoring system. Paper presented at the 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE).
30. Duarte, A. (2018). Propuesta de predimensionamiento a partir del análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra en Cuba. Universidad Central "Mart Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
31. Fernández, L. (2010). Evaluación de las patologías existentes en una obra Hidráulica: Caso de Estudio Embalse «Alacranes». Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
32. Finch, J. W. (1997). Monitoring small dams in semi-arid regions using remote sensing and GIS. Journal of Hydrology, 195(1-4), 335-351.

33. Gonzalez, A. L. y. J. (2013). Análisis cuantitativo de la estabilidad en taludes y laderas., Universidad de las Californias Internacionales, Baja California, México
34. González, Y. (2017). "Las fallas en presas de tierra.Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje". Universidad Tecnológica de la Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
35. Gutierrez, R. (2009). Diagnóstico de patologías en presas de tierra y propuestas de soluciones. Caso de estudio "Presa Minerva y Gramal". Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Santa Clara, Cuba.
36. Hernandez, A. (2014). Metodología para el analisis de estabilidad de taludes. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
37. Hernández, A. (2014). Análisis de Estabilidad de Taludes mediante técnicas de modelación numérica en 3D utilizando Plaxis 3D Foundation (V 1.6). Trabajo de Diploma Ingeniería Civil Universidad Central «Marta Abreu» Las Villas, Santa Clara, Villa Clara.
38. Hernández, F. (2012). Asentamientos permanentes por sismo en presas de tierra y enrocamiento, Tomado de: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/5601>
39. Hernández, L. (2015). Modelación de las filtraciones en obras hidráulicas, caso de estudio: Presa Zaza. Ingeniero Hidráulico, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Ciudad de Santa Clara, Villa Clara, Cuba.
40. Hongquan, W. (2004). Calculation & Analysis on Electromagnetic Dam Magnetic Field of Twin-roll Strip Continuous Casting. Disponible en:
41. Li, Y. y Wang, Y. (2017, 25-26 March 2017). Design and implementation of reservoir dam safety monitoring platform based on ASP.NET. Paper presented at the 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC).
42. Mesa, M., Recarey , C., Tejeda, E. y Lamas, F. (2017). Empleo de la modelación para el diseño de terraplenes altos de carretera. Tesis

- presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría» (ISPJAE) de La Habana, Centro de Investigación de Mecánica Computacional y Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMCNI), Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Universidad de Granada, Granada, España, Ciudad de La Habana, Cuba.
43. Molina, S., Álvarez, O. y Gonzalez, Y. (2017). Análisis y solución de la patología en pesas de Cuba: Estado del Arte. Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
 44. Muro, G. (2016). Evaluación de riesgos y simulación de soluciones técnicas para filtraciones, caso de estudio: Presa zaza. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara.
 45. Muro, G. d. I. C., Álvarez, M. y Alvarez, L. (2016). Evaluación de riesgos y simulación de soluciones técnicas para filtraciones, caso de estudio: Presa Zaza. Santa Clara, Villa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas (UCLV), Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara (IPH VC).
 46. Oral, Y. Z. (2010). Deformation Behaviour Of A Clay Cored Rockfill Dam In Turkey.
 47. Perez, J. (2012). Estimación de la capacidad de carga última de un puente metálico ferroviario. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
 48. Quevedo, G. (2017). Conferencias de la asignatura Presas de Tierra. Universidad central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
 49. Quindi, R. y Armas, R. (2004). Estudio del fallo por estabilidad de la loma «El Volcán» en la autopista Habana-Melena, Cuba. Ciudad de La Habana, Cuba: Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echeverría» (ISPJAE) de La Habana.
 50. Recarey, C. (1999). Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en

Ciencias Técnicas, Facultad de Construcciones, Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

51. Rojas, T. (2002). Las obras hidráulicas mesoamericanas en la transición novohispanas (Versión preliminar) (pp. 20). Buenos Aires, Argentina: XIII Economy History Congress, Session 17 «Transferencia de técnicas, modos de producción y uso del agua en Europa y América Latina (desde la Antigüedad hasta el siglo XX».
52. Sherald, J. y Woodward, R. (1963). Earth and earth-rock dams. Ciudad de La Habana, Cuba: Edición Revolucionaria, Instituto del Libro.
53. Vanantwerp, R. (1970). Stability of Earth and Rock-Fill Dams (Inclusive of Change 1) Engineer Manual, Engineering and Design. Washington DC, United States of America: U.S. Army Corps of Engineers
54. Velázquez , A. (2016). Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.

ANEXOS

ANEXO 1. FORMULACIONES Y MÉTODOS MÁS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

A continuación se enumeran las principales fórmulas de los métodos que serán utilizados en esta investigación para el análisis de estabilidad de taludes:

- **Método de Fellenius:**

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 tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas, no son consideradas por Fellenius.

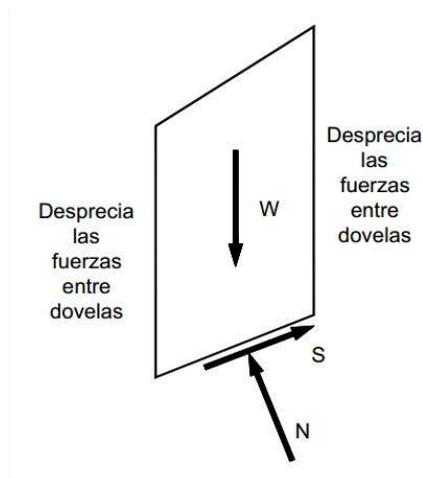


Figura 1. Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método ordinario o de Fellenius.

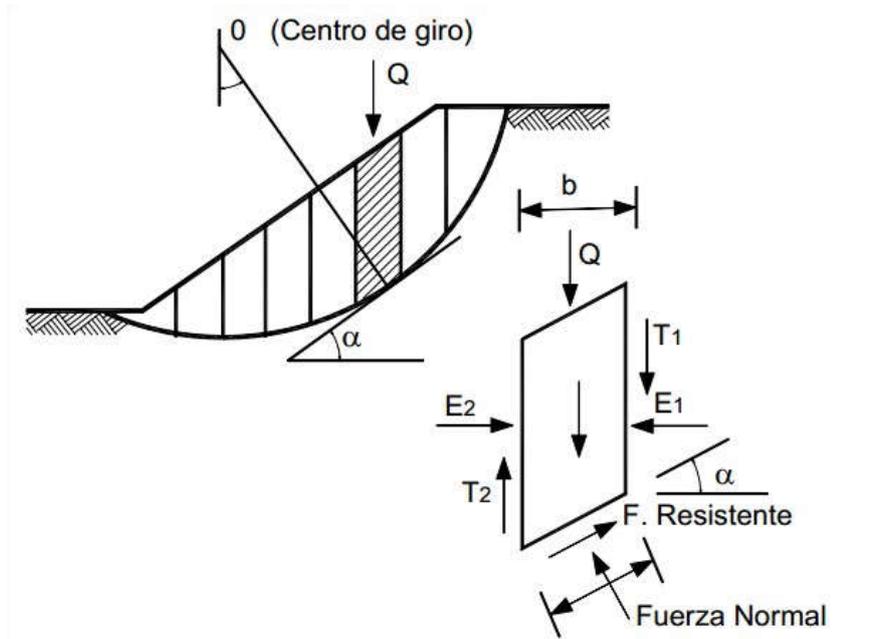


Figura 2. Fuerzas actuantes sobre la dovela en el método de las dovelas.

Fellenius supuso que la presión de contacto (N) era similar al peso de cada rebanada (W), consideró la hipótesis de que $\beta = \alpha$, por tanto, tenemos que:

$$\bar{N} = W \cdot \cos \alpha - U \quad (1.1)$$

Donde:

N: presión de contacto

W: peso de la dovela

α = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

U: presión de poros

Con esta hipótesis el problema tiene una solución muy sencilla, pero dicha hipótesis es cierta cuando la resultante de las fuerzas que actúan en las caras verticales de las dovelas es paralela a la línea de deslizamiento

Si se sustituye se obtiene:

$$F = \frac{R \sum [c' \cdot \delta_s + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot \delta_s) \tan \phi']}{\sum W \cdot X} \quad (1.2)$$

α = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada.

W = Peso total de cada tajada.

u = Presión de poros = $\gamma_w \times h_w$

b = Ancho de la tajada

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

Algunos autores recomiendan que el método ordinario no se utilice para diseño, sino solamente como una base de referencia. Generalmente, el método ordinario da factores de seguridad menores que otros métodos

- **Método de Bishop:**

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 tangente a la superficie de falla.
- Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas

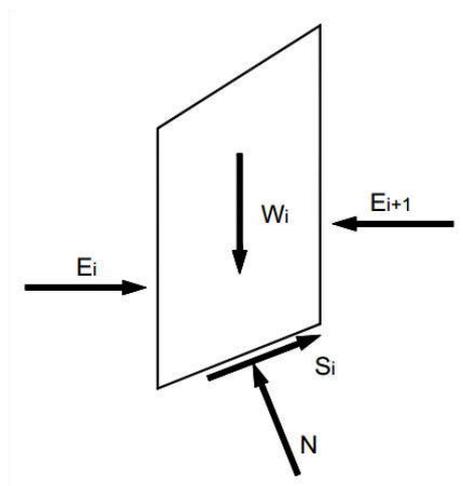


Figura 3. Fuerzas que actúan sobre una dovela en el método de Bishop

Tomando la hipótesis de las ecuaciones generales del método de las dovelas para la determinación de \bar{N} y F queda de la siguiente forma:

$$\bar{N} = \frac{(W - c' \cdot b \cdot \tan \alpha - ub) \cdot \sec \alpha}{F} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}} \quad (1.3)$$

$$FS = \frac{R \sum \left\{ [c' \cdot b + (W - ub) \cdot \tan \phi'] \cdot \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}} \right\}}{\sum W \cdot X} \quad (1.4)$$

Simplificando quedaría:

$$FS = \frac{R \sum c' \cdot \delta_s \cdot n}{\sum W \cdot X} + \frac{R \sum (W - ub) \cdot \varepsilon \cdot \tan \phi'}{\sum W \cdot X} \quad 1.5$$

Donde:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}} \quad 1.6$$

$$\varepsilon = n \cdot \sec \alpha \quad 1.7$$

El método de Bishop conduce a un análisis iterativo, ya que el factor de seguridad queda en ambos miembros de la ecuación, por lo que en este se recomienda iniciar los cálculos considerando FS=1. Este proceso iterativo se repite hasta que el factor de seguridad obtenido se encuentre en el intervalo de tolerancia.

- **Método de Janbu:**

En este método se plantea que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no toma en cuenta el efecto del cortante, pero las superficies de falla no son necesariamente circulares, por lo que en este método Janbu propone un factor de relación que depende de la curvatura de la superficie de falla f_0 , cabe mencionar que dichos factores son aproximados y fueron obtenidos mediante procedimientos empíricos que se basan en análisis de 30 a 40 casos. Este método solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos.

En algunos casos, la suposición de f_0 puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Sin embargo, para algunos taludes la consideración de este factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis.

Ecuación modificada de Janbu:

$$FS = \frac{f_0 \sum \{ [C' * b + (W - ub) * \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha * m\alpha} \}}{\sum (W * \tan \alpha)}$$

1.8

Donde:

f_0 = depende de la curvatura de la superficie de falla:

$$m\alpha = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{FS} \right)$$

1.9

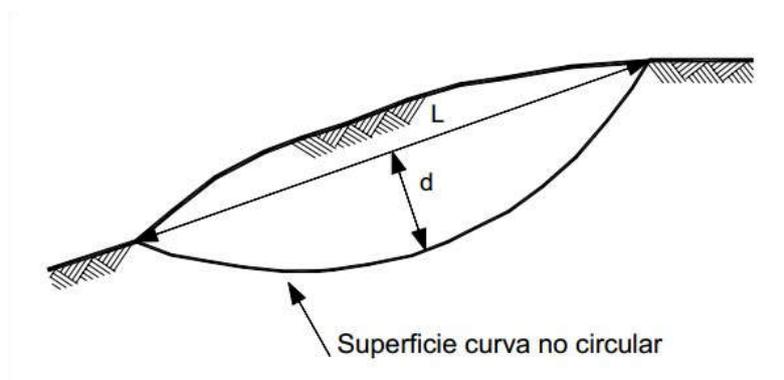
b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

C' , ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w \times h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela.



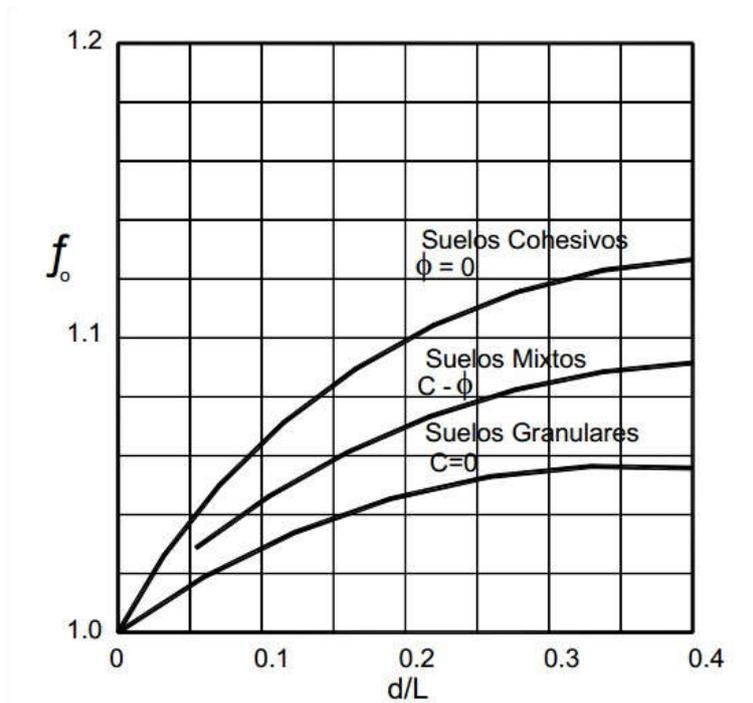


Figura 4. Diagrama para determinar el factor f_0 para el método de Janbu.

- **Método de Elementos finitos:**

Las aplicaciones que utilizan el MEF, calculan las tensiones y deformaciones en el seno de una masa de terreno haciendo una discretización de la misma con elementos de formas variadas, siendo las más sencillas triangulares o rectangulares. Generalmente, las mallas analizadas contienen elementos de tamaño uniforme con anchos (w) y alturas (h) iguales. Cada elemento se caracteriza a efectos de deformaciones sus módulos de elasticidad y de Poisson en los casos más sencillos, pudiendo complicarse el estudio cuando se adoptan relaciones tenso-deformacionales de tipo no lineal.

Estos elementos se interconectan en sus nodos y en los bordes predefinidos. El método típicamente utilizado, es la formulación de desplazamientos que presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente.

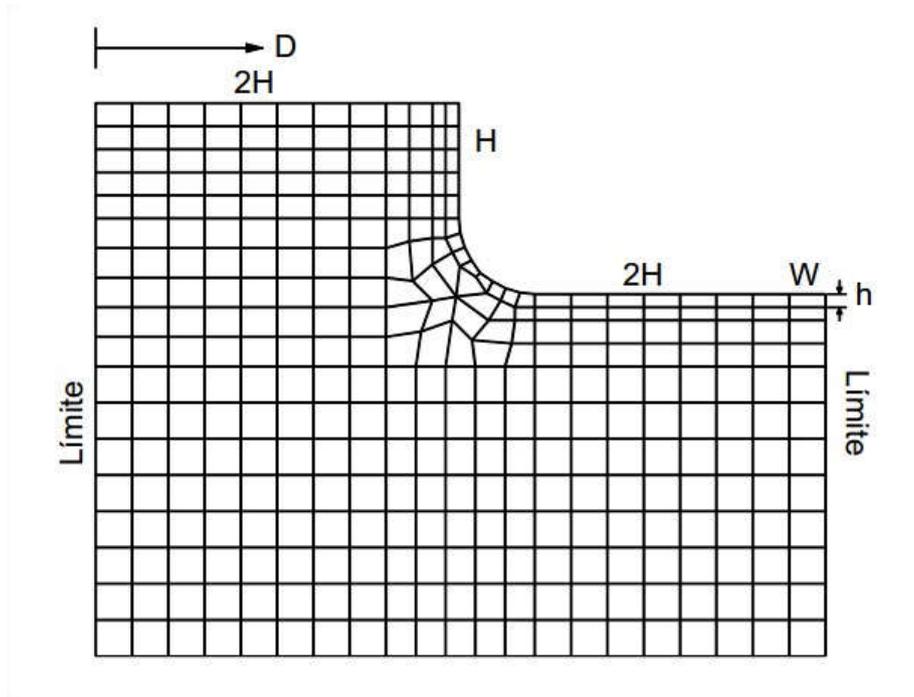


Figura 5. Malla típica 2D para el análisis de un talud vertical por elementos finitos.

La idea básica del método es dividir la geometría del problema en elementos pequeños (triángulos, cuadriláteros, etc.) dentro de los cuales la solución puede considerarse conocida. La hipótesis principal consiste en suponer que dentro de un determinado elemento, el desplazamiento viene dado por la ecuación (Álvares, 2018)

$$\{f\} = [K] * \{q\}$$

1.10

Donde:

$\{F\}$ → Vector de las cargas exteriores aplicadas en los nodos fronteras del continuo,

$[K]$ → Matriz de rigidez de la estructura

$\{q\}$ → Vector de desplazamientos nodales.

ANEXO 2. FORMULACIONES CLÁSICAS DEL MÉTODO DE MONTE CARLOS PARA UNA DISTRIBUCIÓN NORMAL

La idea básica del método de Monte Carlo consiste en escribir la integral requerida como el valor esperado de alguna función con respecto a alguna distribución de probabilidad, lo cual sugiere una solución "estadística" al problema de integración. Para motivar la discusión consideremos el siguiente ejemplo.

Sea $f: \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{R}_+$. supongamos que existe $M > 0$, tal que $0 \leq f(\theta) \leq M$ para todo $\theta \in [a, b]$ y que se desee calcular la integral

$$I = \int_a^b f(\theta) d\theta.$$

2.1

El valor de esta integral no es más que el área bajo la curva $\phi = f(\theta)$ para $\theta \in [a, b]$. Dicha gráfica queda inscrita en el rectángulo $\mathcal{R} = [a, b] \times [0, M]$

Sea

$$p(\theta, \phi) = \frac{1}{M(b-a)} \mathbf{I}_{\mathcal{R}}(\theta, \phi).$$

2.2

Entonces $p(\theta, \phi)$ corresponde a la función de densidad (respecto a la medida de Lebesgue) de una distribución uniforme sobre el rectángulo \mathcal{R} . La integral I puede entonces estimarse simulando una muestra $(\theta_1, \phi_1), \dots, (\theta_N, \phi_N)$ de $p(\theta, \phi)$ y contando cuántos de estos valores caen bajo la curva $\phi = f(\theta)$.

Específicamente sea

$$N_f = \sum_{i=1}^N \mathbf{I}_C(\theta_i, \phi_i),$$

2.3

donde $C = \{(\theta, \phi) \in \mathcal{R} : a \leq \theta \leq b, 0 \leq \phi \leq f(\theta)\}$

$$\hat{I}_1 = M (b - a) \frac{N_f}{N}$$

2.4

es un estimador insesgado de I . En efecto, cada observación (θ_i, ϕ_i) corresponde a un ensayo Bernoulli con probabilidad de éxito $I/\{M (b - a)\}$, por lo que $E(N_f) = NI/\{M (b - a)\}$.

Más aún la varianza de este estimador

$$\text{Var}(\hat{I}_1) = \frac{I}{N} \{M (b - a) - I\}.$$

2.5

Este método es de carácter general, por lo que se puede adaptar en cada caso de estudio a la distribución para la cual se desea generar valores aleatorios. En este caso utilizaremos una distribución continua, denominada Normal (Gaussiana)

La función de densidad de una variable aleatoria que sigue una distribución normal es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

2.6

y la función de distribución es igual a: $F(x) = (1/2)(1 + \text{erf}(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}))$ 2.7

Los parámetros de esta distribución son:

Moda: μ

Mediana: μ

Media: μ

Varianza: σ^2

Ecuación de regresión: $\text{erf}^{-1}(2F_i - 1) = x_i / \sqrt{2} \sigma - \mu / \sqrt{2} \sigma,$

donde las x_i están ordenadas en orden ascendente, $F_i = i/N$, y $i = 1, 2, \dots, N$

Máxima verosimilitud: $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2$

A continuación, se presenta un algoritmo para obtener valores de una variable que sigue una distribución normal.

Entrada: Parámetro de localización μ , cualquier número real; parámetro de escala $\sigma > 0$

Salida: $x \in (-\infty, \infty)$

(1) Independientemente generar $U_1 \sim U(-1, 1)$ y $U_2 \sim U(-1, 1)$

(2) Hacer $U = U_1^2 + U_2^2$ (nótese que la raíz cuadrada no es necesaria aquí)

(3) Si $U < 1$, devolver $X = \mu + \sigma U_1 \sqrt{-2 \ln U / U}$; en caso contrario, regresar al paso 1

Notas: Si $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, entonces $\exp(X) \sim LN(\mu, \sigma^2)$, la distribución lognormal.

ANEXO 3. PRINCIPALES RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS NOVELES DE AGUA EN LA PRESA ALACRANES.

Tabla 1. Estadística descriptiva de los Niveles de agua en la Presa Alacranes (año 2018).

Estadígrafos		Estadística	Error Std.
	Media	32,2727	0,2579
	95% Intervalo de confianza para	32,2220	
	LCI	32,3234	
	LCS	32,2561	
	5% Media truncada	32,3300	
	Mediana	24,3	
	Varianza	4,9274	
Nivel_agua	Desviación Std.	3,127	
	Mínimo	35,65	
	Máximo	4,38	
	Rango	4,6	
	Rango intercuartil	1,734	1,28
	<i>Skewness</i>	10,836	2,55
	<i>Kurtosis</i>		

Resultado de la prueba de frecuencias según los registros de los niveles de agua para el año 2018.

Nivel_agua Stem-and-Leaf Plot

Frequency Stem & Leaf

```

5,00 Extremes  (= < 31,30)
11,00  313 . 11123446789
8,00   314 . 02345689
7,00   315 . 0246799
9,00   316 . 123345679
5,00   317 . 13589
17,00  318 . 13566777888888999
28,00  319 . 0000112223445566677788899999
26,00  320 . 00111223334445566667788899
21,00  321 . 000001223344556778999
31,00  322 . 0011111222333334455677778889999
51,00  323 . 000001111112233333344555566666677777788899999999
70,00  324 .
000000011111112222223333333344444444444455555555666666677777888999
23,00  325 . 0011112223333333335779
10,00  326 . 0013335568
10,00  327 . 2222346777
16,00  328 . 0011123335677779
    
```

6,00 329 . 233348
 1,00 330 . 9
 3,00 331 . 335
 7,00 Extremes (>=33,33)

Stem width: ,10
 Each leaf: 1 case(s)

Tabla 2. Test de Normalidad

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	df	Sig.	Estadístico	df	Sig.
Nivel_agua	1,42	365	0,00	8,62	365	0,00