

**OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO,
MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

**ANDRÉS FELIPE SAYAGO ALZATE
LUIS MIGUEL MÚNERA GUERRA**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011**

**OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO,
MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS**

**ANDRÉS FELIPE SAYAGO ALZATE
LUIS MIGUEL MÚNERA GUERRA**

**Trabajo de grado presentado para optar al título
de Ingeniero Civil**

**Asesor: Jorge Guerra Londoño
Ingeniero civil**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011**

Nota de aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, mayo de 2011

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	8
1. OBJETIVOS	10
1.1 OBJETIVO GENERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS	11
2.1 ANÁLISIS DE MUROS DE CONTENCIÓN.....	11
2.1.1 Tipos de estructuras de contención	11
2.1.3 Predimensionamiento del muro de contención en voladizo	13
2.1.4 Determinación de empuje del suelo (teoría de Rankine)	14
2.1.5 Incremento dinámico de presión por el efecto sísmico – Mononobe- Okabe	15
2.1.6 Estabilidad de muros de contención	16
2.1.7 Diseño estructural del muro de contención	17
3. ALGORITMOS GENÉTICOS.....	18
3.1 ¿QUE SON LOS ALGORITMOS GENÉTICOS?	18
3.2 CONCEPTOS BÁSICOS	21
3.3 ESTRATEGIA OPERATIVA.....	22
3.4 DEFINICIÓN Y DIFERENCIA ENTRE BÚSQUEDA Y OPTIMIZACIÓN	23
4. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA.....	24
4.1 ENTRADAS DEL PROGRAMA.....	24
4.2VARIABLES DEL SISTEMA	25
4.3PROCEDIMIENTO.....	26
4.3.1 Las combinaciones de genes se realizan de la siguiente manera	29
5. MANUAL DEL USUARIO	32
5.1 ENTRADA DE DATOS	32
5.2 OPCIÓN DE TRABAJO	33
5.3 PRIMERA CORRIDA	33
5.4 MUROS FIJOS	35

5.5 ORDENAR VALORES	35
5.6 PROCESO DE ITERACIONES FITNESS.....	36
5.7 PROCESO DE MUTACIÓN.....	37
5.8 CUADRO DE COSTOS	37
5.9 PESTAÑAS DE SALIDA	38
5.10 BARRA DE ESTADO	41
6. LIMITACIONES DEL PROGRAMA.....	43
7. CONCLUSIONES	44
BIBLIOGRAFÍA	50

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Muro de contención de gravedad.....	11
Imagen 2. Muro de contrafuerte.....	12
Imagen 3. Muro de contención en voladizo	12
Imagen 4. Genética.....	18
Imagen 5. Diagrama de flujo de Algoritmos Genéticos.	26
Imagen 6. Vista de los genes generados por el programa.....	28
Imagen 7. Procedimiento de los operadores genéticos (crossover)	28
Imagen 8. Vista del proceso de mutación del Programa.....	31
Imagen 9. Vista de entrada de datos del Programa.....	32
Imagen 10. Vista de opciones de trabajo del Programa.	33
Imagen 11. Vista manejo primera corrida del Programa.....	34
Imagen 12. Vista generación 100 primeros muros aleatorios	34
Imagen 13. Vista generación muros fijos.	35
Imagen 14. Vista ordenar valores.	36
Imagen 15. Vista iteraciones fitness.	36
Imagen 16. Vista Porcentaje de mutación.	37
Imagen 17. Vista Cuadro de costos.....	38
Imagen 18. Vista resultados geometría	39
Imagen 19. Vista resultados factores de seguridad	39
Imagen 20. Vista resultados materiales.	40
Imagen 21. Vista resultados costos.	40
Imagen 22. Vista resultados costo total.	41
Imagen 23. Barra de estado	41
Imagen 24. Parámetros iniciales.....	415
Imagen 25. Costos iniciales	415
Imagen 26. Resultados Costo de excavación modificado.....	416
Imagen 27. Costo de concreto modificado.....	416
Imagen 28. Resultados de la modificación del concreto	416

Imagen 29. Costo de excavación modificado	417
Imagen 30. Resultado de la modificación de la excavación.....	417
Imagen 31. Datos iniciales para evaluación del sismo.....	418
Imagen 32. Resultados de la evaluación del sismo	418
Imagen 33. Incrementos con respecto al muro sin sismo	49

INTRODUCCIÓN

Este proyecto debe realizarse y su importancia radica en que Colombia es un país con una topografía agreste en la cual la mayoría de las obras de infraestructura van acompañadas con estructuras de contención, las cuales deben cumplir con las necesidades requeridas y al mismo tiempo adaptarse a una economía y unos presupuestos que limitan las obras, por lo que surge la necesidad de diseñar y construir muros de contención eficientes y económicos, sin sacrificar su capacidad y funcionalidad.

Los muros de contención son empleados en casi todos los proyectos de obras civiles donde existe la necesidad de contener grandes volúmenes de tierra cuando esta no garantiza su estabilidad, obras civiles tales como terraplenes en vías, taludes, edificaciones, entre otros.

Colombia es un país altamente sísmico, por lo tanto, las estructuras que diseñemos no pueden ser ajenas a la necesidad de resistir los esfuerzos impuestos por los eventos sísmicos.

Para esto se realizará un software de optimización de muros de contención en voladizo, basados en la metodología de algoritmos genéticos, combinando la economía y la eficiencia a la hora de la construcción de la estructura de contención.

Actualmente es común que la solución estructural de la estabilidad de taludes, por medio de muros de contención en voladizo, se realice mediante análisis de diferentes alternativas de solución hasta encontrar una que satisfaga las condiciones de esfuerzos y casi nunca este proceso obedece a un diseño y mucho menos a el diseño adecuado desde el punto de vista estructural y de costo.

El software comercial que se encuentra comúnmente en el mercado sólo realiza el diseño estructural después de encontrar un predimensionamiento que satisfaga los requerimientos de estabilidad global del sistema, pero las dimensiones encontradas pudieran ajustarse de tal forma que el costo de construcción se minimice sin afectar la estabilidad de la estructura.

En 1929 el naturalista Charles Darwin presento su teoría de la evolución de las especies donde habla de cómo todas las especies que habitan en nuestro planeta se han venido adaptando al entorno que las rodeas, esto se ha presentado porque las especies se encargan de pasar solo los mejores genes a la siguiente generación por lo que se creó la supervivencia del más fuerte, esto sentó las bases que luego sirvieron a John Holland en los años 70 para desarrollar algoritmos que emularan la selección natural y mediante este proceso poder desarrollar búsquedas eficientes y efectivas del mejor individuo que sea solución al problema planteado. En este momento donde la tecnología ha tomado tal alcance y el desarrollo de los computadores han permitido acelerar procesos, este sistema de optimización ha tomado un gran auge en áreas como las financieras, científicas e ingenierías.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Al diseñar este algoritmo genético de optimización emulando la evolución de las especies se espera que nos permita realizar un diseño estructural de un muro de contención en voladizo de una manera óptima en la parte estructural y económica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A partir de unas condiciones geotécnicas y geométricas existentes, ajustar el diseño a los requerimientos de ley, al tiempo que se optimiza el costo de la futura construcción.
- Realizar análisis comparativos en el diseño estructural de los muros de contención en voladizo cuando se tiene en cuenta en el diseño la condición de carga sísmica o no.
- Implementar los algoritmos genéticos en la ingeniería civil y abrir nuevas puertas para otras aplicaciones que permitan el aprovechamiento de esta valiosa herramienta, la cual se ha ido desarrollando durante varios años en otros campos y de una manera muy incipiente en la ingeniería civil.

2. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

2.1 ANÁLISIS DE MUROS DE CONTENCIÓN

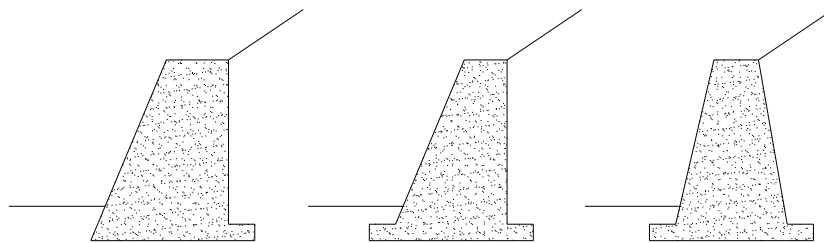
2.1.1 Tipos de estructuras de contención

Para solucionar los diferentes problemas de contención de terrenos se implementan varios tipos de estructuras las cuales se diferencian por su funcionamiento, acá mencionamos algunas a continuación.

- **Muro de contención de gravedad:** Estructura de contención cuya resistencia se obtiene debido a su propio peso, se caracteriza por la ausencia de refuerzo en acero, por otro lado, no es recomendable para grandes alturas desde el punto de vista económico, ver imagen 1.

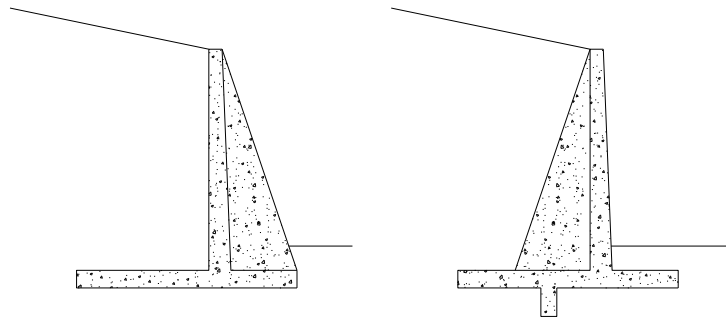
-

Imagen 1. Muro de contención de gravedad



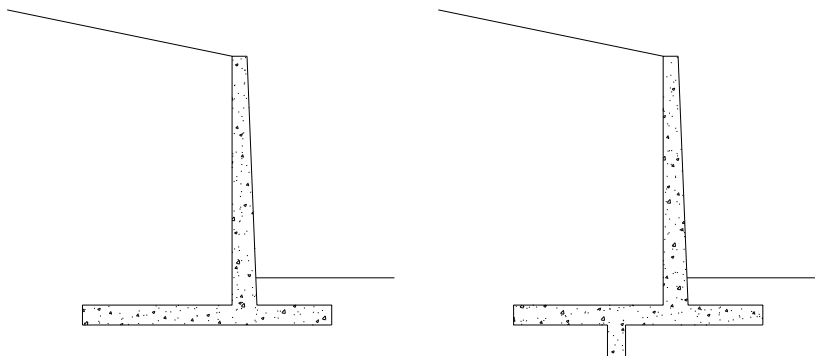
- **Muro de contrafuerte:** Para alturas mayores a 8m se recomiendan ya que son una versión mejorada de los muros de gravedad y los muros de voladizo, donde los contrafuertes le proporcionan al muro una resistencia adicional. Por otro lado, generalmente el costo de este tipo de muros se ve incrementado debido a el refuerzo y volumen de concreto adicional de los contrafuertes.

Imagen 2. Muro de contrafuerte



- **Muro de contención en voladizo:** están contruidos de concreto reforzado, se componen de un vástago apoyado sobre una losa, en ocasiones es necesario diseñar una llave en la losa para estabilizarlo y evitar deslizamientos, es una solución que resulta económica para alturas no más de 8m. esto tipo de muro es al cual se le realizara el análisis y en el cual estará basado todo el proyecto. Véase Imagen3.

Imagen 3. Muro de contención en voladizo



Existen otros tipos de muros no convencionales como los de tierra armada, con elementos prefabricados, entre otros, los cuales se encuentran por fuera del alcance de este proyecto.

2.1.2 Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10

La Norma colombiana de diseño y construcción sismo resistente NSR-10 nos habla de muros de contención y algunos otros aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar y construir un muro de contención, en sus capítulos:

- C 10 FLEXIÓN Y FUERZA AXIAL
- C 14 MUROS DE CONTENCIÓN
- C.14.1 ALCANCES
- C.14.3 REFUERZO MÍNIMO
- H.4.2 ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN
- H.4.3 EXCAVACIONES

Por otro lado en 1995 el entonces ministerio de obras públicas pretendió crear una ley que regulara el diseño de puentes y de obras complementarias en las vías del país, pero esta nunca fue convertida en ley, pero no obstante el INVIAS (Instituto Nacional de Vías) hace obligatorio el diseño de estas obras por medio del Código Colombiano de Puentes para las vías principales del país, la cual sirve como fuente indispensable de información para los ingenieros estructurales del país y de la cual nos hemos referenciado para obtener un diseño óptimo en el muro de contención en voladizo.

2.1.3 Predimensionamiento del muro de contención en voladizo

Los muros de contención se diseñan para suplir una necesidad específica, es decir cada estructura de contención tiene un fin único y debe ser adaptado las características del terreno, entre ellas las más importantes son su altura h , longitud L , facilidad en la construcción y tipos de materiales a utilizar.

Luego de obtener estos parámetros entra a primar el criterio y la experiencia del ingeniero para hacer un predimensionamiento de toda la estructura, con el cual se hacen los primeros análisis para verificar lo referente con la estabilidad del muro, viabilidad económica y diseño para con esto comenzar ajustar las dimensiones del muro de contención.

2.1.4 Determinación de empuje del suelo (teoría de Rankine)

En el año 1857, W.J. Macquorn Rankine realizó investigaciones con las cuales propuso la determinación del empuje activo de tierra sobre un muro, cuando la parte superior del muro se mueve lo suficiente como para que se genere un estado de equilibrio plástico, la cual es una presión activa que genera un empuje total E_a , para esto se tiene como hipótesis las siguientes condiciones, el empuje que se aplica en el tercio inferior de la altura "H", no existe fricción entre la cara del suelo y el muro, se trabaja con un suelo de relleno granular sin cohesión y la cara interna del muro forma un ángulo de 90° con el terreno.

$$E_a = \frac{1}{2}(\gamma * H^2) * K_a$$

K_a = Coeficiente activo de Rankine

Para $\beta = 0$
$$K_a = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

En los casos en los cuales el terreno se eleva con un ángulo β con respecto a la horizontal.

Para $\beta > 0$
$$K_a = \cos \alpha * \frac{\cos \alpha - \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}}{\cos \alpha + \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi}}$$

2.1.5 Incremento dinámico de presión por el efecto sísmico – Mononobe-Okabe

Los efectos dinámicos, los cuales son producidos por los sismos, se simulan mediante empujes de tierra asociados a las fuerzas inerciales de las masas de tierra, apoyada directamente sobre la cara interior del muro. Se considera un estado activo de presión de tierras cuando los desplazamientos del relleno permiten desarrollar la resistencia al corte del relleno.

Cuando la estructura de contención es lo suficientemente flexible para desarrollar desplazamientos en la parte superior, esta presión activa se ve incrementada por los efectos sísmicos, este incremento de presión se denomina incremento dinámico del empuje activo.

Este efecto dinámico se calcula a partir del planteamiento de Mononobe N, (1929). Este coeficiente está incluyendo los efectos estáticos más los dinámicos, al aplicarlos como una fuerza total en un mismo sitio, sin embargo, al considerar la cuña del terreno como un triángulo invertido con su centro de gravedad a los 2/3 de la altura, medidos desde la base, separando el efecto dinámico del estático para obtener varios punto de aplicación de las cargas.

Este incremento del empuje activo se puede calcular de la siguiente manera.

$$\Delta E_{ae} = \left(\frac{\gamma * H^2}{2} \right) * (K_{ae} - K_a) * (1 - K_v)$$
$$K_{ae} = \frac{\sin^2(\psi + \phi + \theta)}{\cos \theta \sin^2 \psi \sin(\psi - \delta - \theta) \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) * \sin(\phi - \beta - \theta)}{\sin(\psi - \delta - \theta) * \sin(\psi + \beta)}} \right)^2}$$
$$\theta = \arctan \left(\frac{K_h}{1 - K_v} \right)$$

$$K_h = 0.50 * A_0$$

$$K_v = 0.70 * K_h$$

K_{ae} = Coeficiente de presión dinámica activa

K_h = Coeficiente sísmico horizontal

K_v = Coeficiente sísmico vertical

2.1.6 Estabilidad de muros de contención

Una estructura de contención puede fallar por 3 aspectos, deslizamiento en su base, por el volteo respecto al talón y por falla en la capacidad del suelo que soporta la base.

- Revisión por volteo: las fuerzas resultantes por la presión de tierra, la sobre carga y el empuje dinámico generan en el plano de la base del muro unos esfuerzos que tratan de hacer que la estructura gire alrededor de su talón, por lo que se emplea un factor de seguridad que se expresa como.

$$FS_{volteo} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o}$$

$\sum M_o$ = Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a voltear el muro con respecto a la esquina del talón.

$\sum M_R$ = Suma de los momentos de las fuerzas que tienden a resistir el volteo con respecto a la esquina del talón.

- Revisión por deslizamiento en la base del muro: las fuerzas de empuje hacen que el muro deslice sobre su base.

$$FS_{deslizamiento} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d}$$

$\sum F_R$ = Suma de las fuerzas horizontales resistentes.

$\sum M_R$ = Suma de las fuerzas horizontales de empuje.

- Revisión por capacidad de carga: el contacto de la base del muro con el suelo transmite unas cargas verticales las cuales se deben revisar por la carga última del suelo, estas cargas son las presiones máxima y mínima que ocurren debido a las cargas verticales en el sistema.

$$FS_{capacidad} = \frac{q_u}{q_{max}}$$

q_u = carga admisible del suelo.

q_{max} = Carga transmitida por la estructura

2.1.7 Diseño estructural del muro de contención

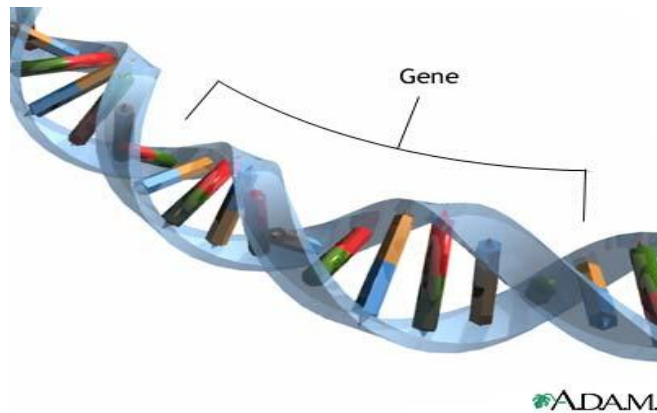
El diseño de estructural se ha llevado a cabo siguiendo el libro del ingeniero Roberto Rochel Awad, Hormigón Reforzado, trabajando el vástago como una viga a flexión empotrada en la base y siguiendo todos los requerimientos de la NSR-10.

Para la base del muro se trabajó el mismo procedimiento, teniendo en cuenta una de las combinaciones de carga más críticas con un factor de mayoración para las cargas fijas o muertas de 1.6 y un factor de 1.2 para las cargas vivas y los efectos dinámicos debidos al efecto de un sismo.

3. ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 ¿QUE SON LOS ALGORITMOS GENÉTICOS?

Imagen 4. Genética



Fuente: <http://bloghogwarts.com/2007/12/22/la-magia-y-la-genetica/>

Los algoritmos genéticos han sido inspirados en el principio de la evolución de las especies estudiado por Darwin y la genética. Estos se basan en mecanismos de búsqueda paralela y adaptativa mediante el principio de supervivencia y reproducción del más apto.

Por lo que el principio de selección privilegia a los individuos de mayor longevidad, por ende con mayor probabilidad de reproducción, esto es, permite que estos individuos presenten mayores oportunidades de transmitir sus códigos genéticos para las próximas generaciones.

De acuerdo a estos principios los AG buscan la mejor solución a un determinado problema mediante la evolución de las poblaciones caracterizada por cromosomas artificiales, cada uno de los cuales representa una posible solución al problema, estos pasan por un proceso de evolución que comprende selección,

recombinación sexual y mutación. Haciendo que cada ciclo de evolución se seleccionen los cromosomas más aptos en términos de costo.

Por otro lado, son computacionalmente simples y poderosos en la búsqueda de la mejor solución, en otras palabras Optimización.

“Estos algoritmos se diferencian de otros procedimientos de optimización y búsqueda en los siguientes aspectos:

- Trabaja con una codificación de los parámetros no con los parámetros en sí.
- Buscan en una población de puntos de la solución no en un solo punto.
- Usan información de la función objetivo no sus derivadas o algún otro dato auxiliar.
- Usan reglas probabilísticas no la determinísticas”. Calvancanti (2006)

Los parámetros o variables en los algoritmos genéticos son codificados como una cadena de caracteres finita la cual recibe el nombre de cromosoma, donde este representa a un individuo, un conjunto de caracteres equivale a un gen de dicho cromosoma y cada carácter representa un alelo del gen.

Los algoritmos genéticos trabajan con bases de datos de varios puntos, estos es, una población de cromosomas que permite buscar varias soluciones al mismo tiempo, por lo que permite analizar muchas posibles soluciones en una iteración.

Seguidamente los algoritmos genéticos se pueden caracterizar por los siguientes componentes: Calvancanti (2006)

- **Problema a ser optimizado:** estos algoritmos son especialmente utilizados para problemas de optimización, donde los parámetros requieren ser combinados para encontrar la mejor solución.
- **Representaciones de soluciones del problema:** esta es la que define la estructura del cromosoma que va ser manipulado mediante los algoritmos. Esto se representa normalmente de forma binaria por ser la más simple de manipular mediante operadores genéticos, fácil de transformar en entero o real.
- **Decodificación del cromosoma:** consiste en la construcción de la solución real del problema, para ser evaluada como entero o real. Este proceso se realiza después de la recombinación de cromosomas.
- **Evaluación:** La evaluación se realiza a través de una función la cual representa el problema de una forma adecuada y suministra una medida de calidad a cada individuo de la población.
- **Selección:** Es donde se seleccionan los individuos más aptos que tienen mayor probabilidad de ser escogidos para la reproducción.
- **Operadores genéticos:** A través de los operadores crossover los individuos son recombinados sexualmente y este es considerado como la característica fundamental de los algoritmos genéticos, los pares de progenitores son escogidos al azar y de allí nuevos individuos son criados a partir del intercambio genético, los descendientes serán diferentes a sus padres, pero con algunas características idénticas de sus progenitores.

Por otro lado, la mutación aparece como otro operador encargado de explorar diferentes alternativas diversificando la población alterando la genética de los individuos en cada generación.

- **Inicialización de la población:** Es lo que determina la creación de los individuos para realizar el primer ciclo del algoritmo. Esto sucede por lo general de individuos creados aleatoriamente. Es bueno que estos individuos sean semillas coherentes con una posible solución para así encontrar una evolución más rápida, ya que estos algoritmos son muy sensibles a los valores iniciales.

- Parámetros y criterios de parada:
- Tamaño de la población
- Tasa de crossover
- Tasa de mutación
- Número de generaciones
- Total de individuos

En nuestro caso vamos a utilizar el criterio de parada con base al número de generaciones, esto es, el número de iteraciones.

3.2 CONCEPTOS BÁSICOS

- **Cromosomas:** consiste en una posible solución del problema el cual posee las características de esta en forma de un número binario. “En los GAs, cada cromosoma es una estructura de datos que representa una de las posibles soluciones del espacio de búsqueda del problema”. Calvalcanti (2006)

- **Gen:** Representa las variables del muro de contención, en un número binario, tales como: b: Base del muro, evs: Espesor del vástago superior, evi: Espesor del vástago inferior, ep: Espesor de la pata., b1: distancia de la punta al vástago.

- **Alelo:** Es un componente de la cadena genética, en el caso de los algoritmos genéticos, corresponde al valor de 0 ó 1 del número binario que identifica el gen.
- **Población:** Conjunto de individuos los cuales representan una solución al problema, estos son utilizados por el algoritmo genético y van evolucionando en cada generación manteniendo el tamaño de la misma.
- **Función Fitness:** es la función encargada de evaluar la calidad de un individuo como solución al problema, luego ordenándolos de acuerdo al grado de adaptación del individuo al entorno.
- **Cruce:** Interviene en todos los algoritmos genéticos después de un proceso de selección de individuos combinándolos para obtener como resultado unos nuevos individuos.
- **Mutación:** Consiste en la modificación aleatoria del cromosoma de un individuo para obtener un nuevo individuo.

3.3 ESTRATEGIA OPERATIVA

La estrategia operativa que emplean los algoritmos genéticos consiste en partir de una población de individuos generada aleatoriamente ajustada a la realidad, donde cada uno de ellos representa una posible solución al problema, estos valores deben ser evaluados por la función fitness, la cual indica la calidad de la solución o grado de adaptación del individuo al entorno del problema planteado. A partir de este procedimiento inicial se realizan iteraciones en cada una de las cuales se crean nuevas generaciones de individuos al entorno a partir de generaciones anteriores, esto se realiza mediante los operadores genéticos de selección, cruce y mutación anteriormente definidos. Donde el objetivo es obtener una población la cual, si el algoritmo converge, dentro de un número de iteraciones dado, estará compuesta por los mejores individuos de acuerdo al

criterio de evaluación, siendo así la mejor solución que se pueda hallar.

3.4 DEFINICIÓN Y DIFERENCIA ENTRE BÚSQUEDA Y OPTIMIZACIÓN

En esta actividad se establecieron las diferencias fundamentales de estos dos conceptos, basándose en la teoría de algoritmos genéticos previamente encontrada y analizada, sustentando así el objetivo de este proyecto, encaminado a no adoptar una única solución que satisfaga el sistema, sino, la mejor solución en un conjunto de soluciones posibles, por lo que es de mucha importancia resaltar la diferencia entre estos dos conceptos, ya que al optimizar estamos llevando la búsqueda a un paso más grande e importante, no limitando al programa con unos valores específicos, sino, realizando todo el proceso de mutación con el cual se espera recorrer todo el rango de valores posibles, para luego dar con la solución más adecuada, esto lo llamamos optimización.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

El programa consiste en el cálculo de muros de contención en voladizo por medio de algoritmos genéticos, el pseudocódigo fue desarrollado bajo el lenguaje Visual Basic for Applications y la apariencia o interfaz se realizó en Microsoft Excel, esto con el fin de hacer el programa más amigable y facilitar la ejecución.

4.1 ENTRADAS DEL PROGRAMA

H: Altura del terreno a estabilizar, [cm].

H_p: Profundidad del muro medido desde la punta hasta la superficie del terreno delante del muro. [cm]

β : Inclinación de la superficie del suelo detrás del muro.

I: Inclinación de la pared en contacto con el suelo.

f'_c: Resistencia del concreto en [MPa]

f_y: Resistencia del acero. [MPa]

γ_c : Peso específico del concreto. [KN/m³]

γ_{s1} : Peso específico del suelo de relleno. [KN/m³]

γ_{s2} : Peso específico del suelo de apoyo. [KN/m³]

ϕ_1 : Ángulo de fricción del suelo de relleno.

ϕ_2 : Ángulo de fricción del suelo de apoyo.

Cohesión: Cohesión del suelo de apoyo.

Q_{Último}: Carga última del suelo de apoyo (se puede ingresar o dejar que el programa la calcule). [KN/m²]

q: Sobrecarga detrás del muro. [KN/m²]

d: Distancia horizontal desde el vástago hasta la sobrecarga o zona plana si no hay sobrecarga. [cm]

A: Factor de zona sísmica.

k₁ y k₂: 2/3

FSV: Factor de seguridad de volcamiento.

FSD: Factor de seguridad de deslizamiento.

FSC: Factor de seguridad de carga.

% mutaciones: Es la cantidad de mutaciones que el programa realizará medidas en porcentaje.

4.2VARIABLES DEL SISTEMA

b: Base del muro. [cm]

evs: Espesor del vástago superior. [cm]

evi: Espesor del vástago inferior. [cm]

ep: Espesor de la pata. [cm]

b1: distancia de la punta al vástago. [cm]

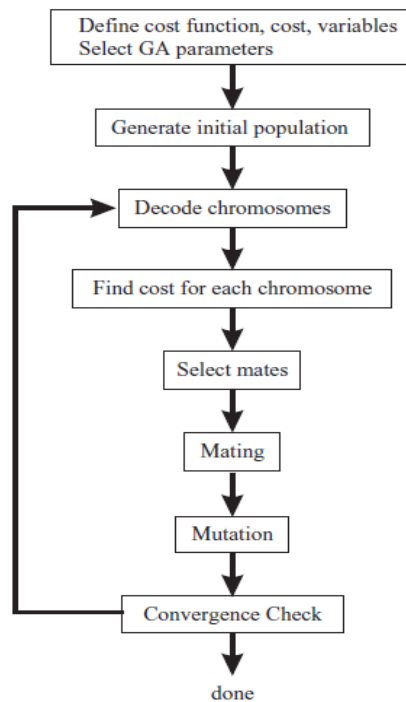
El programa necesita como insumo principal la altura del muro necesaria para contener el terreno a estabilizar, además, las siguientes entradas: las características del concreto y acero, en las unidades indicadas, la profundidad del muro con respecto a la superficie, las características del suelo de relleno y el suelo donde estará apoyado, la inclinación de la superficie del terreno detrás del muro, resistencia del suelo de apoyo, coeficiente de zona sísmica, sobrecarga y distancia de la sobrecarga o distancia de la zona plana medida desde el vástago del muro.

Los anteriores son necesarios para llevar a cabo el programa, el cual realiza el cálculo por medio de la teoría de Presión activa de tierra de Rankine. DAS (2006). Para suelos de relleno sin cohesión (suelo granular) y con terraplén inclinado, como el objetivo del programa es la implementación de algoritmos genéticos para el cálculo, se permite utilizar cualquier teoría para el cálculo de empujes, tales como Coulomb, Cuñas, entre otros, ya que la evaluación de los empujes y cálculo de los factores de seguridad es una función dentro del programa y no afectaría el procedimiento del algoritmo genético.

4.3PROCEDIMIENTO

El procedimiento del programa esta planteado de acuerdo a la estructura observada en la imagen 5.

Imagen 5. Diagrama de flujo de Algoritmos Genéticos.



Fuente:Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt. Practical Genetic Algorithms, second edition.

En primer lugar, se deben ingresar las anteriores propiedades tanto del suelo como del muro, el programa se encargará de hacer el predimensionamiento basado en la altura de este dentro del intervalo de cada variable, de acuerdo a valores típicos encontrados, el programa generará 100 valores aleatorios de las variables b, b_1, evs, evi, ep , dentro de los intervalos anteriormente definidos, la combinación de estas variables generará una clase de muro que se evaluará y se

calcularán los diferentes factores de seguridad, después de que el programa genere estas variables aleatorias agregará al listado de variables 18 muros que se han llamado muros fijos, los cuales tienen dimensiones dentro del rango anteriormente definido que tienden a cumplir con los factores de seguridad, estos ayudarán a que el programa produzca la mejor solución en menor tiempo.

Posteriormente se calcula el acero necesario, volumen de concreto y volumen de excavación, para establecer el costo por metro lineal. Esto se realiza para todas las combinaciones de las variables aleatorias produciendo 100 clases de muros que serían la primera generación o población inicial.

Seguidamente, el programa evalúa el costo de cada muro generado y le asignará un número de acuerdo al orden, desde el menor al mayor costo, este procedimiento es llamado fitness, es decir, la aptitud o la calidad de cada muro para ser la mejor solución al problema, el menor costo cumpliendo con los factores de seguridad.

El siguiente procedimiento consiste en hallar la siguiente generación de muros, donde de acuerdo al fitness se toman las mejores 20 combinaciones de la primera generación (20 primeros muros de acuerdo al orden), luego cada variable de estos 20 muros se convierten en un número binario, llamado Gen, que se concatenan para formar un sólo número binario que identificará cada muro, llamado cromosoma, *ejemplo: 010110101010100011111*.

A continuación se muestra en la imagen 6 una de las hojas internas del programa, donde se aplican los conceptos anteriormente mencionados y se puede identificar cada uno de ellos.

Imagen 6. Vista de los genes generados por el programa

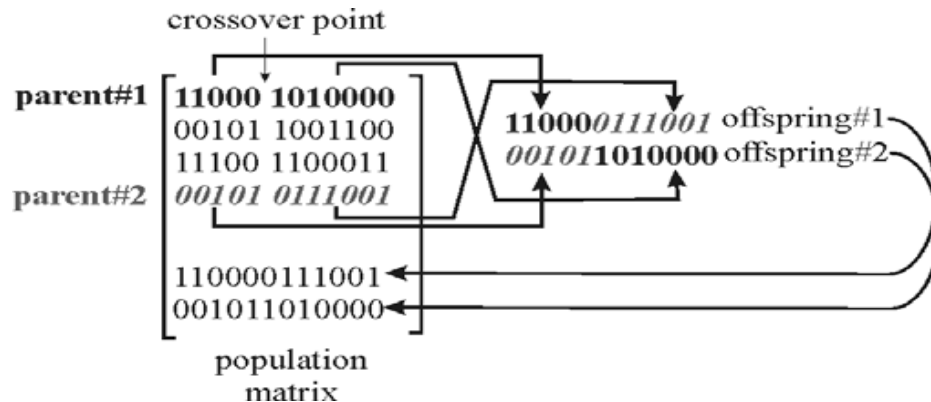
delta		5	1	1	1	5
acumulado		7	11	16	21	28
m		7	4	5	5	7
Partición para creación de hijos		3	2	2	2	3

Resultados									
Vol concreto [m³/m]	Vol excavación [m³/m]	Costo [\$/m]	CROMOSOMAS	B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	Largo del vector
2.26	18.41	\$ 2.309.369	100000000100000000111011	1000010	0001	00010	00000	01110	28
2.28	27.35	\$ 2.586.511	001101011100100000110001010	000001	011	00000	00011	01010	28
2.22	32.27	\$ 2.631.090	0110101001000101000010000101	0110101	0010	00001	00001	0000101	28
2.20	34.01	\$ 2.671.970	0111100001100001000000000111	0111100	0011	00001	00000	0000111	28
2.64	20.32	\$ 2.714.218	0111001101000100001100101011	0111001	1010	00100	00110	0101011	28
2.77	18.84	\$ 2.794.938	0111000101100100010010101111	0111000	1011	00100	01001	0101111	28
2.59	26.49	\$ 2.800.181	011111100001011000010011110	0111111	1000	01111	00001	0011110	28
2.56	27.97	\$ 2.827.256	0111001011000010001110010101	0111001	0110	00010	00111	0010101	28
2.62	26.84	\$ 2.865.787	1000001101000010001000011111	1000001	1010	00010	00100	0011111	28
2.89	19.70	\$ 2.888.493	0111000011000100011100101110	0111000	0110	00100	01110	0101110	28

Posteriormente se realiza el cruce por medio de operadores genéticos llamados *crossover*, donde se re-combinan los genes (cada variable), creando 80 nuevas posibles soluciones, los genes de un padre se combinan de diferentes formas con los genes de otro.

Luego de obtener los 100 tipos de muros estas variables se convierten de nuevo de binario a real, así con estas nuevas variables termina la segunda generación. En la imagen 7 se muestra como opera el *crossover*, recombinando los alelos de cada padre. Este procedimiento fue tomado como base para este proyecto.

Imagen 7. Procedimiento de los operadores genéticos (*crossover*).



Fuente: Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt. Practical Genetic Algorithms, second edition.

4.3.1 Las combinaciones de genes se realizan de la siguiente manera

Los primeros 19 hijos se obtienen de una combinación de la primera mitad de alelos de los genes del padre anterior con la segunda mitad de alelos de los genes del padre posterior, luego el siguiente hijo será la combinación de los dos siguientes padres, esto se realiza hasta combinar los padres 19 y 20.

$\boxed{0101}101010$ Gen del Padre 1 = 0101101110 Hijo 1
1000 $\boxed{101110}$ Gen del Padre 2

$\boxed{01111}101111$ Gen del Padre 2 = 0111101000 Hijo 2
1110 $\boxed{101000}$ Gen del Padre 3

Para el segundo grupo de 18 hijos

Se realiza el procedimiento anterior con los padres 1 y 3 hasta llegar a los padres 18 y 20.

$\boxed{0101}111010$ Gen del Padre 1 = 0101111110 Hijo 20
1000 $\boxed{111110}$ Gen del Padre 3

$\boxed{1000}101110$ Gen del Padre 2 = 1000111000 Hijo 21
1111 $\boxed{111000}$ Gen del Padre 4

Los próximos 19 hijos se obtienen de combinar la primera mitad de alelos de los genes del padre 2 con la segunda mitad de alelos de los genes del padre 1, luego el próximo hijo será la combinación de los dos siguientes padres, esto se realiza hasta combinar los padres 19 y 20.

0101 $\boxed{101010}$ Gen del Padre 1 = 1000101010 Hijo 38
 $\boxed{1000}101110$ Gen del Padre 2

0111~~0111~~ Gen del Padre 2 = 1110101111 Hijo 39

~~1110~~101000 Gen del Padre 3

Los siguientes 18 hijos se producen con el procedimiento anterior con los padres 1 y 3 hasta llegar a los padres 18 y 20.

0101~~0101~~ Gen del Padre 1 = 1110101010 Hijo 57

~~1110~~101000 Gen del Padre 3

1000~~0111~~ Gen del Padre 2 = 1111101110 Hijo 58

~~1111~~11000 Gen del Padre 4

Para terminar, los últimos 6 muros se obtienen tomando de los 20 padres, parejas al azar. Así se obtuvieron 80 nuevos muros producto de los 20 mejores padres de la primera generación.

La tercera generación se produce organizando la segunda generación de acuerdo al fitness, de los 20 mejores muros se obtienen nuevamente los 80 hijos de la forma anteriormente descrita, luego se realiza el proceso de mutación de acuerdo al porcentaje de mutaciones asignado en la hoja de entrada, donde un gen al azar se le cambia un alelo al azar, de esta manera se trata de simular lo que pasa con las especies a través del tiempo, esto permite que el programa explore nuevas soluciones y evitar que los resultados sean mínimos locales.

Lo anterior, se puede ver en la imagen 8, donde los datos de la tabla izquierda representan los hijos originales y los datos de la tabla derecha los hijos mutados, además se encuentran encerrados en círculos de color rojo los hijos que fueron mutados con el respectivo original, también, se muestra con color azul, que alelo fue modificado

Imagen 8. Vista del proceso de mutación del Programa.

B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	Largo del vector
0111011	0001	00001	00000	0100010	28
0111110	0001	00000	00001	0111011	28
0110010	0000	00000	00001	0110111	28
0111110	0101	00000	00001	0101001	28
0110110	0001	00000	00001	0111011	28
0110010	0101	00000	00000	0101111	28
1001000	0100	00001	00000	0111101	28
0110010	0001	00000	00000	0011111	28
0111110	0001	00001	00000	0001011	28
0101110	1001	00001	00000	0011011	28
0101100	1000	00001	00000	0011011	28
0110110	0101	00000	00101	0101011	28
0110010	0001	00000	00000	0101111	28
0111110	1001	00001	00000	0011011	28

0111110	0001	00000	00001	0111001
0110010	0000	00000	00001	0110111
0110110	0001	00000	00101	0101011
0110010	0101	00000	00000	0101111
1000010	0101	10000	00000	0111111
0110110	0001	00001	00000	0001011
0101110	1001	00001	00010	0011011
0100010	1000	00000	00000	0011111
0111110	1001	00001	00000	0011001
0111110	1001	00001	00000	0111011
0111110	0101	00001	00000	0101011
0111110	0101	00011	00000	0101011
0110011	0101	01110	00111	0100011
0110011	0101	00110	00011	0100011

En parte derecha de la imagen se muestran los genes sombreados que fueron mutados y a la izquierda los genes originales, en los círculos azules están los alelos que fueron cambiados en el respectivo gen.

Cada iteración consiste en tomar los 20 mejores muros y recombinar la generación anterior con los hijos mutados y no mutados.

A partir de la tercera generación cada iteración realiza el mismo procedimiento, el muro número 1 de cada iteración se lleva a otra hoja para ser graficado, esto para poder analizar la variación de cada gen respecto al número de iteraciones, además, permite analizar el comportamiento del costo de cada material que compone el muro a medida que las iteraciones aumentan.

5. MANUAL DEL USUARIO

Este software es de un manejo muy amigable, imagen 9. Y de facil uso para cualquier persona del medio de la ingeniería civil, aca explicamos los pasos a seguir para el buen uso e interpretacion de resultados, sin hacernos responsables del mal manejo e inadecuada interpretacion de los resultados que se puedan dar.

Imagen 9. Vista de entrada de datos del Programa

OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO, MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.

MATERIALES	
$f_c =$	21.0 MPa
$f_y =$	420.0 MPa
$\gamma_c =$	24.0 KN/m ³
$\gamma_{st} =$	18.0 KN/m ³
$\gamma_{cs} =$	19.0 KN/m ³

GEOMETRÍA DEL MURO	
H	4.00 m
h _p	1.50 m
β	15°
I	90°
ϕ_{corte}	45°
d	5.00 m
Re	0.07 m
K1 (1/3-2/3)	2/3
K2 (1/3-2/3)	2/3

Factores de Seguridad	
q	23.0 KN/m ²
FSV	2
FSD	1.5
FSC	3

Mutaciones	
Mutaciones	40.30%

Precio por unidad	Valor
Precio kg de acero	\$5000
Precio m ³ de concreto	\$700000
Precio m ² de Excavacion	\$25000

Considerar Empuje puntal en la punta del muro.

Calcular Q último

VALORES ALEATORIOS

MUROS FIJOS

ORDENAR VALORES

ITERACIONES FITNESS

Entrada	Inicio	Generación_1	Generación_1	Temporal	Valores	Salida Geometria	Salida FS	Salida Mat
---------	--------	--------------	--------------	----------	---------	------------------	-----------	------------

itoy listo para hacer cálculos...

5.1 ENTRADA DE DATOS

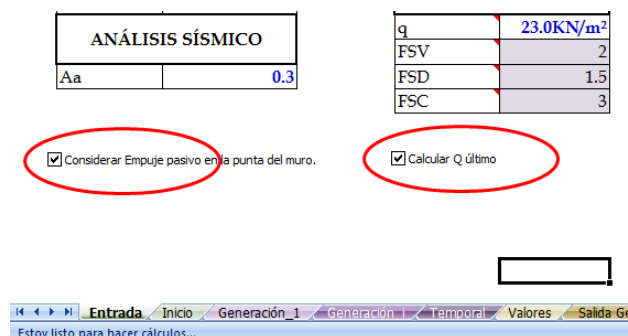
La hoja de Entrada es el lugar donde se suministran todos los datos referentes al muro de contención, tales como, materiales, geometría, cargas, costos y demás factores.

Las casillas que salen con formato de color gris y letras azules son datos que se recomiendan no alterar ya que son los más comunes por ser las propiedades del concreto y el acero, los demás datos de entrada que están con formato de fondo blanco y letras azules son fundamentales para el diseño del muro, son datos que proporciona el muro de acuerdo a sus necesidades y valores que resultan luego de un excelente estudio de suelos.

5.2 OPCIÓN DE TRABAJO

- Se presenta la posibilidad de realizar los cálculos considerando el empuje pasivo en la punta del muro o no considerándolo, solo marcando con un click en la opción izquierda en la parte inferior de la pantalla. Como se muestra en la Imagen 10.
- El Q último del suelo es posible calcularlo si se desea o no se cuenta con este valor, o simplemente se introduce el valor obtenido en la casilla de Q último.

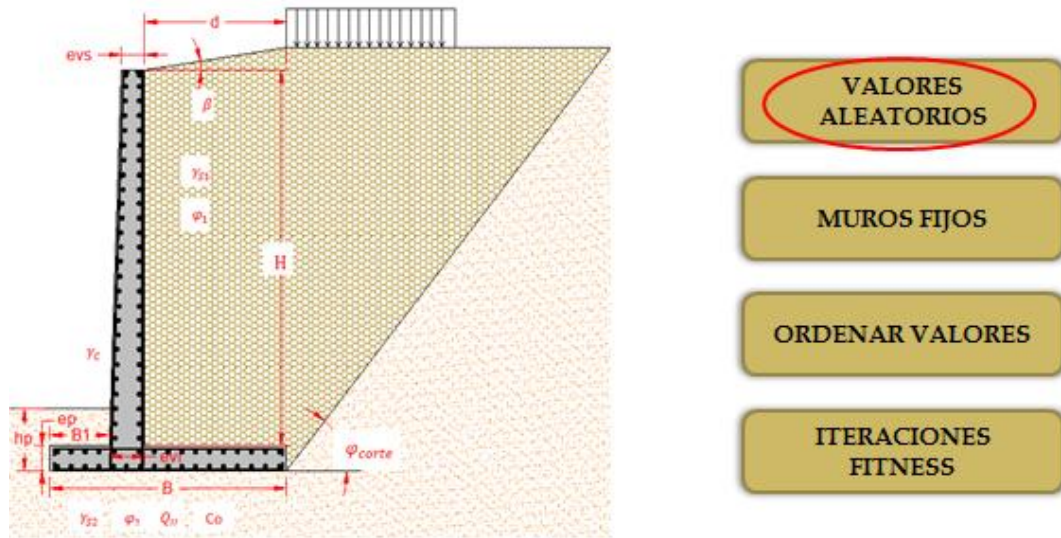
Imagen 10. Vista de opciones de trabajo del Programa.



5.3 PRIMERA CORRIDA

- Una vez se cuente con todos los datos necesarios, se procede con la creación de los números aleatorios con los cuales el programa realiza su primera creación de 100 muros, imagen 11. Con los cuales hace su primera iteración.

Imagen 11. Vista manejo primera corrida del Programa



- El botón **VALORES ALEATORIOS** genera 100 muros aleatorios con los cuales se realiza la primera selección, es recomendable que al menos 20 de los primeros 100 muros aleatorios cumplan los factores de seguridad. Imagen 12.

Imagen 12. Vista generación 100 primeros muros aleatorios

Aleatorios

Muros fijos

Ordenar

HOJA OCULTA, PRIMEROS 100 MUROS

Recomiendo intentar con otros aleatorios

19

Resultados													
B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	Fitness	Cumple Factor de seguridad?	FS volcamient o >2	Fs Deslizamiento >1.5	Fs carga >3	As [kg/m]	Vol concreto [m³/m]	Vol excavacion [m³/m]	Costo [\$/m]
485	29	25	30	70	9	SI	2.98	2.31	3.80	62.40	2.54	33.66	\$ 2,927,889
220	30	29	25	10	40	NO	0.76	2.00	0.21	45.69	1.73	19.26	\$ 22,000,000,000,000,000,000
460	34	31	36	120	14	SI	2.66	2.26	4.14	75.24	2.96	28.16	\$ 3,149,443
485	28	25	26	230	2	SI	2.76	2.45	5.67	56.12	2.32	22.31	\$ 2,463,019
345	28	26	38	35	73	NO	1.62	2.08	2.61	59.09	2.39	26.60	\$ 34,500,000,000,000,000,000
205	30	27	31	120	36	NO	0.49	2.00	0.57	47.71	1.78	12.21	\$ 20,500,000,000,000,000,000
265	39	30	37	50	49	NO	1.01	2.00	25.79	68.81	2.36	19.59	\$ 26,500,000,000,000,000,000

5.4 MUROS FIJOS


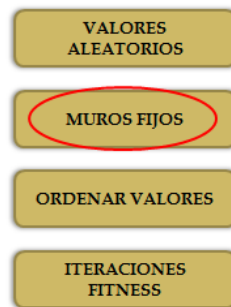
Luego de tener la primera generación de muros se presenta la opción de crear algunos muros fijos  , mostrada en la imagen 13. Con los cuales el programa basará su búsqueda en ese rango de muros con la facilidad que ya contará con algunos muros que si cumplen todos los factores de seguridad y podrá empezar una optimización a partir de unos valores más aceptables.

Imagen 13. Vista generación muros fijos.



5.5 ORDENAR VALORES

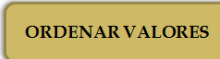
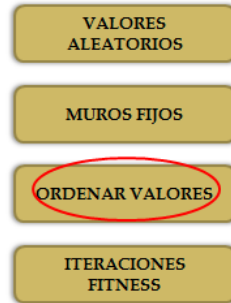
El botón  ubicado en la lista de botones como se muestra en la imagen 14. Es el que nos permite hacer la primera selección de los 20 mejores muros para con ellos realizar la creación de sus hijos para posteriormente comenzar el proceso de iteración.

Imagen 14. Vista ordenar valores.



5.6 PROCESO DE ITERACIONES FITNESS

Proceso final con el cual el programa realiza las iteraciones con la selección


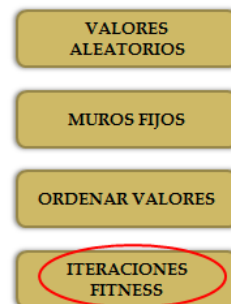
Fitness  , imagen 15. Y arroja los valores del muro óptimo, después de esto se puede pasar a ver las gráficas de resultados.

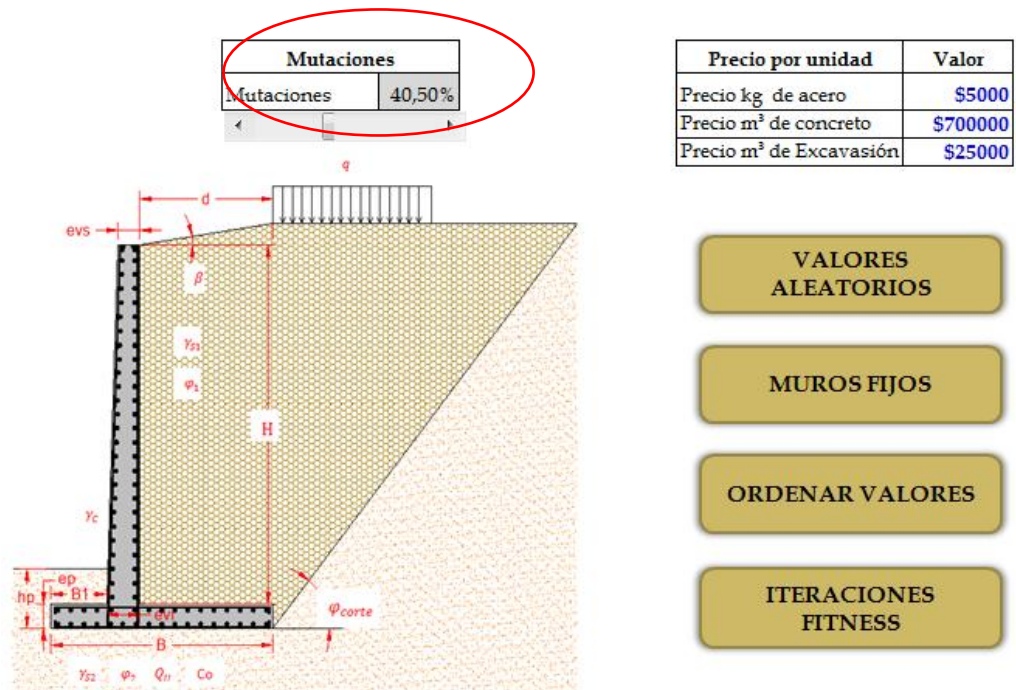
Imagen 15. Vista iteraciones fitness.



5.7 PROCESO DE MUTACIÓN

En la hoja de entrada se encuentra un recuadro donde se muestra el porcentaje de mutaciones que el programa hará por cada iteración, este valor cambiará de acuerdo al criterio del usuario, el cual deberá mover la barra hacia la derecha para incrementar el valor o hacia la izquierda para disminuirlo en un intervalo de 0% al 100%. Ubicado donde se muestra en la Imagen 16.

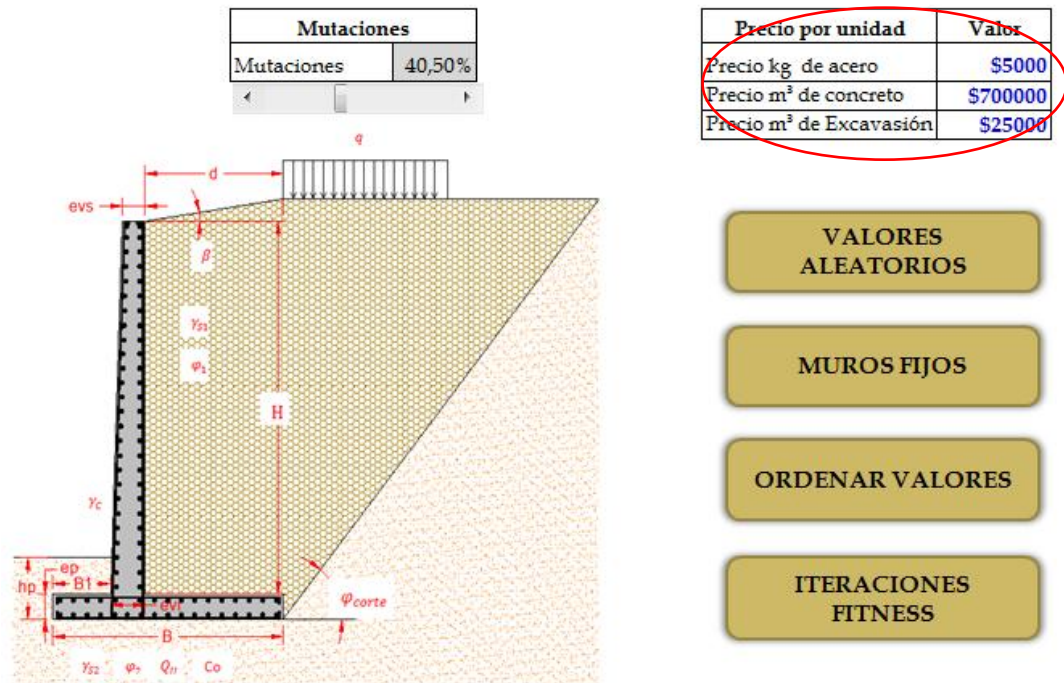
Imagen 16. Vista Porcentaje de mutación.



5.8 CUADRO DE COSTOS

En este cuadro se ingresan los precios unitarios del Kg de acero, m³ de concreto y m³ de suelo excavado. Imagen 17.

Imagen 17. Vista Cuadro de costos.



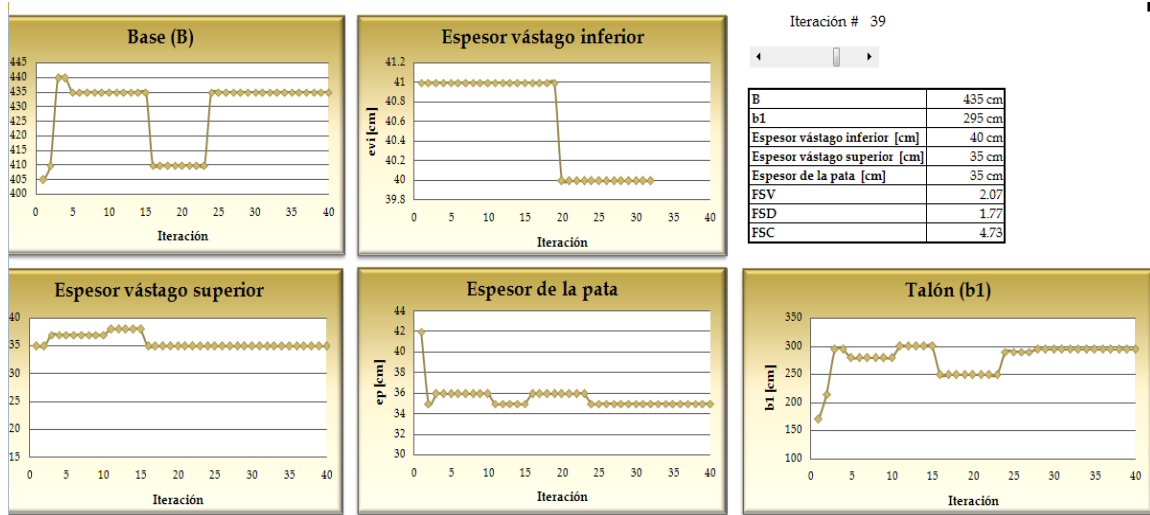
5.9 PESTAÑAS DE SALIDA

Estas pestañas permiten visualizar el comportamiento de las diferentes variables a medida que aumentan las iteraciones, esto facilitará el análisis y toma de decisiones por parte del usuario, para consultar una iteración en especial, se adjuntó un cuadro de diálogo con una barra deslizable que muestra los resultados de cada variable, según la hoja de salida, en la iteración seleccionada.

A continuación se muestra la configuración de cada hoja de salida y sus respectivas variables, en las imágenes 18, 19, 20, 21 y 22.

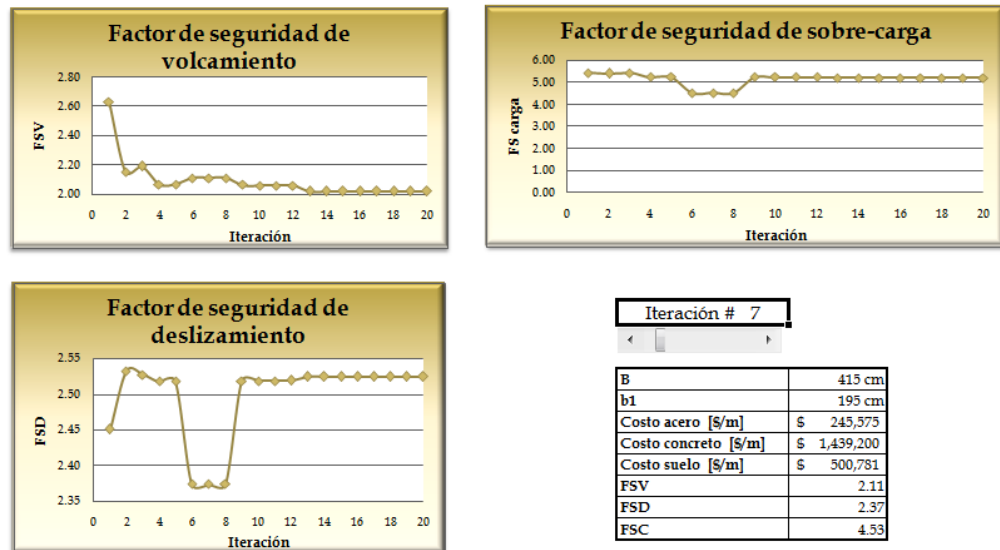
- Salida de Geometría

Imagen 18. Vista resultados geometría



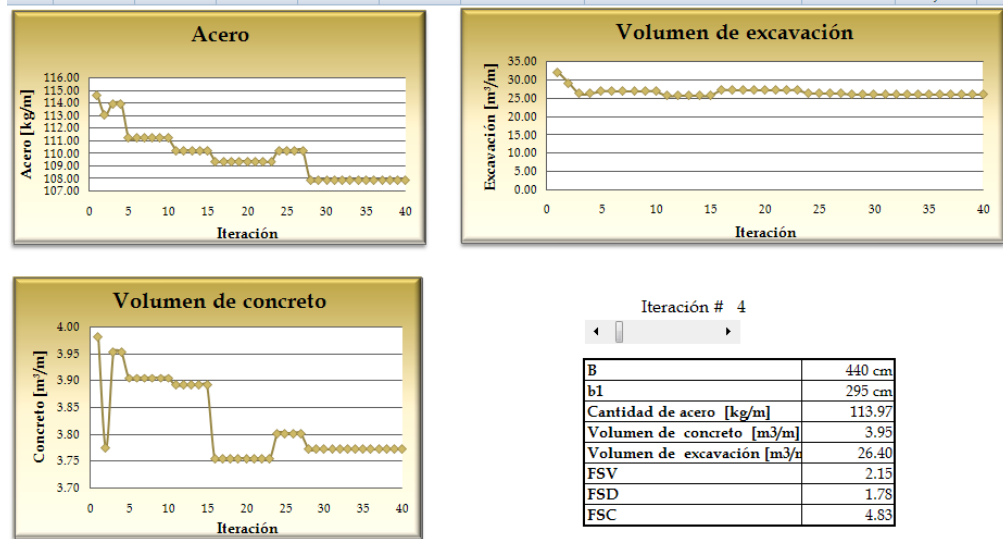
- Salida de Factores de seguridad.

Imagen 19. Vista resultados factores de seguridad



- Salida de materiales.

Imagen 20. Vista resultados materiales.

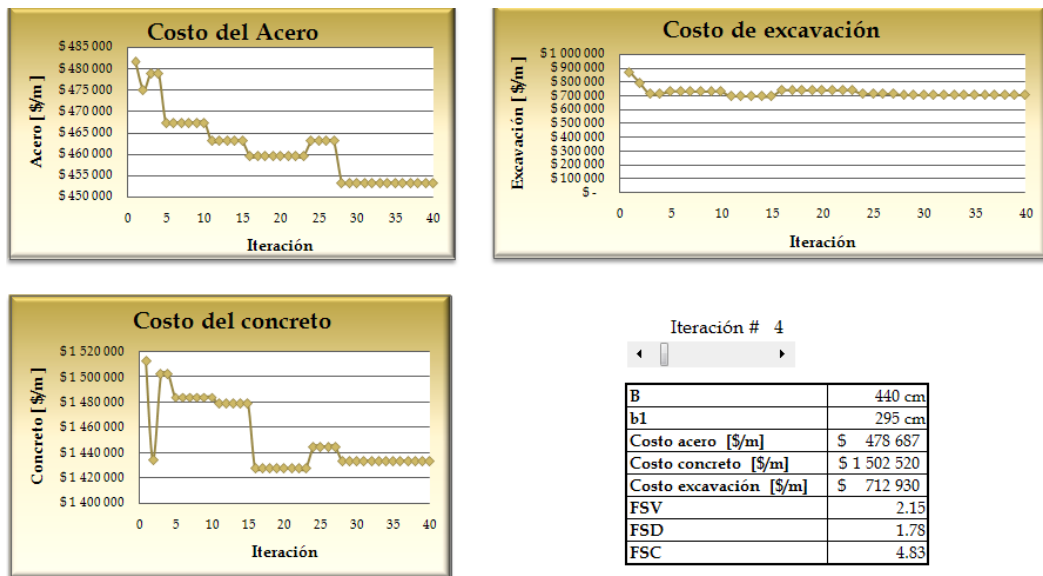


Iteración # 4

B	440 cm
b1	295 cm
Cantidad de acero [kg/m]	113.97
Volumen de concreto [m³/m]	3.95
Volumen de excavación [m³/m]	26.40
FSV	2.15
FSD	1.78
FSC	4.83

- Salida de costos.

Imagen 21. Vista resultados costos.

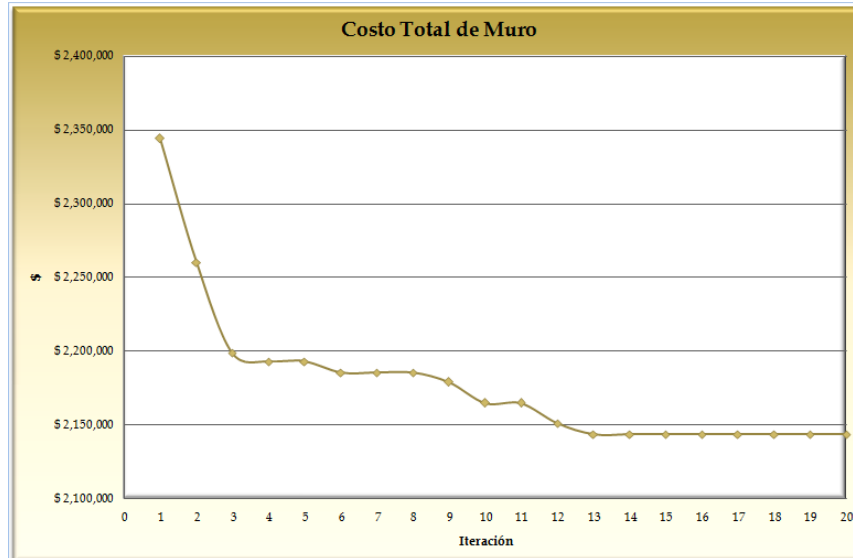


Iteración # 4

B	440 cm
b1	295 cm
Costo acero [\$/m]	\$ 478 687
Costo concreto [\$/m]	\$ 1 502 520
Costo excavación [\$/m]	\$ 712 930
FSV	2.15
FSD	1.78
FSC	4.83

- Costo total.

Imagen 22. Vista resultados costo total.



5.10 BARRA DE ESTADO

Imagen 23. Barra de estado

OPTIMIZACIÓN DE MUROS DE CONTENCIÓN EN VOLADIZO, MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS.

MATERIALES	
$f_c =$	21.0 MPa
$f_y =$	420.0 MPa
$E_c =$	24.85 N/mm ²
$E_s =$	19.85 N/mm ²
$\nu_{cs} =$	0.2

GEOMETRÍA DEL MURO	
H	5.00 m
h _g	5.00 m
h _o	2.00 m
h ₁	3.00 m
h ₂	3.00 m
h ₃	3.00 m
h ₄	3.00 m
h ₅	3.00 m
h ₆	3.00 m
h ₇	3.00 m
h ₈	3.00 m
h ₉	3.00 m
h ₁₀	3.00 m
h ₁₁	3.00 m
h ₁₂	3.00 m
h ₁₃	3.00 m
h ₁₄	3.00 m
h ₁₅	3.00 m
h ₁₆	3.00 m
h ₁₇	3.00 m
h ₁₈	3.00 m
h ₁₉	3.00 m
h ₂₀	3.00 m

Metamorfosis	
Metamorfosis	74.33%

Precio por unidad	
Precio kg. de acero	\$5000
Precio m ³ de concreto	\$300000
Precio m ³ de Escarificación	\$10000

PROPIEDADES DEL SUELO	
ϕ_1	30°
ϕ_2	20°
C_1	40.0 kN/m ²
C_2	450.0 kN/m ²

FACTORES DE SEGURIDAD	
λ	21.00 N/mm ²
FSV	2
FSR	1.5
FSL	1

VALORES ALLEATORIOS

MUROS FIJOS

ORDENAR VALORES

ITERACIONES FITNESS

Número de Iteraciones

Estado de la barra de estado

En la zona inferior derecha de la imagen 23 se encuentra la barra de estado, allí el programa informa al usuario cuando está listo para realizar cálculos, cuando los está haciendo y por último el número de iteraciones. .

Al finalizar el número de iteraciones deseado el programa emitirá un aviso en audio indicando que el cálculo está listo.

6. LIMITACIONES DEL PROGRAMA

- Se debe trabajar con un suelo de relleno granular, por ende no se considerará la cohesión para hallar el K_a de Rankine.
- El suelo de relleno debe ser homogéneo y no dividido por estratos ya que solo se cuenta con una entrada para el tipo de suelo.
- La pared de contacto con el suelo de relleno deberá ser recta (90°) con respecto al talón, para con esto reducir el número de variables y con esto conseguir un software más amigable.
- Si se cuenta con sobrecarga en la parte superior del muro esta deberá estar ubicada en la zona plana de la superficie del suelo.
- No se cuenta con la opción de considerar la llave en la parte inferior del muro como algunos autores recomienda en sus libros.
- No se ha tenido en cuenta el nivel freático del suelo de relleno.

7. CONCLUSIONES

Luego de crear este software para la optimización de muros de contención en voladizo mediante algoritmos genéticos y su ardua manipulación, se ha logrado llegar a un análisis exhaustivo de los muros de contención y su funcionamiento, de acuerdo a la geometría con la que cuentan y las cargas a las que se ven sometidos, por lo que se podría decir que es fácil encontrar una geometría para el muro de contención en voladizo, la cual, cumpla con todos los requerimientos estipulados en la Norma Colombiana De Sismo Resistencia en sus capítulo C “Diseño de elementos en concreto” y a su vez este satisfaga las necesidades propias del terreno o suelo de contacto, como lo son los factores de seguridad de deslizamiento, volcamiento y capacidad portante..

El software sólo necesitará la altura y la profundidad del muro para establecer rangos de las variables involucradas, para así poder obtener una primera propuesta de soluciones posibles las cuales conformarán la primera generación de individuos a estudiar, estas son evaluadas como alternativas viables y si cumplen los requerimientos técnicos mínimos de capacidad y estabilidad, se evalúa en lo que a costos totales en pesos por unidad de material se refiere.

Al poder contar con la teoría de algoritmos genéticos y las herramientas que permiten su fácil programación, y además, aprovechando que es un proceso ágil, logramos abarcar una mayor cantidad de posibles soluciones en comparación a la forma tradicional de programar, las cuales al evaluarlas, nos arrojan que unas son mejores que otras, lo que da principio al proceso de selección ya antes mencionado en este trabajo, con el cual, se alcanza a disminuir en un porcentaje considerable el costo por unidad de medida, logrando con esto la satisfactoria implementación de los algoritmos genéticos a la ingeniería civil.

Una parte importante del trabajo se ha basado en la optimización de costos, por lo que se ha utilizado el programa para comparar como puede variar la geometría del muro dependiendo de los costos de los materiales, es decir, al trabajar con

unos parámetros fijos y solo variando los costos de un material u otro, se pueden observar cambios en la geometría.

Para los siguientes parámetros iniciales, imagen 24.

Imagen 24. Parámetros iniciales

MATERIALES	
$f_c =$	21.0 MPa
$f_y =$	420.0 MPa
$\gamma_c =$	24.0KN/m ³
$\gamma_{s1} =$	18.0KN/m ³
$\gamma_{s2} =$	19.0KN/m ³
PROPIEDADES DEL SUELO	
ϕ_1	38°
ϕ_2	20°
Cohesion	40.0KN/m ²
Q último	450.0KN/m ²
ANÁLISIS SÍSMICO	
Aa	0.15

GEOMETRÍA DEL MURO	
H	5.00 m
hp	1.50 m
β	10°
I	90°
ϕ_{corte}	60
d	5.00 m
Re	0.07 m
K1 (1/3-2/3)	2/3
K2 (1/3-2/3)	2/3
FACTORES DE SEGURIDAD	
q	50.0KN/m ²
FSV	2
FSD	1.5
FSC	3

Comenzando con unos costos reales a la fecha en cuanto al acero, concreto mezclado en obra y la excavación y botada del material.

Imagen 25. Costos iniciales

Precio por unidad	Valor
Precio kg de acero	\$4200
Precio m ³ de concreto	\$300000
Precio m ³ de Excavación	\$27000

Obtenemos una geometría y un costo total muy aceptable con el cual se pudiera considerar que esa es la mejor opción de construcción, si el terreno permite la creación de una punta con estas dimensiones.

Imagen 26. Resultados.

B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	b2 [cm]	Fitness	Cumple Factor de seguridad?	FS volcamiento >2	Fs Deslizamiento >1.5	Fs carga >3	As [kg/m]	Vol concreto [m ³ /m]	Vol excavación [m ³ /m]	Costo [\$/m]
380	33	30	29	310	70	1	SI	2.06	2.17	5.08	71.82	2.68	9.99	\$ 1,374,475

Ahora al suponer un valor para el concreto con un aumento del 100%, por alguna consecuencia y los otros valores siguieran constantes podremos observar, Imagen 27.

Imagen 27. Costo de concreto modificado.

Precio por unidad	Valor
Precio kg de acero	\$4200
Precio m ³ de concreto	\$600000
Precio m ³ de Excavación	\$27000

Obtendremos un muro con unas características geométricas diferentes en cuanto a su base y punta se refiere, sin notar mayor cambio en el vástago y la pata.

Imagen 28. Resultados de la modificación del concreto.

B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	b2 [cm]	Fitness	Cumple Factor de seguridad?	FS volcamiento >2	Fs Deslizamiento >1.5	Fs carga >3	As [kg/m]	Vol concreto [m ³ /m]	Vol excavación [m ³ /m]	Costo [\$/m]
280	33	29	30	130	150	1	SI	2.03	1.85	4.02	66.76	2.39	14.33	\$ 2,101,259

Y como era de esperarse el precio total del muro de contención por metro lineal se aumento en 34.58%.

Por último se realizó la prueba disminuyendo el costo de la excavación de tal manera que no influyera en el costo total y con ello obtener el costo aproximado del muro de contención en cuanto a su parte de concreto y acero, Imagen 29.

Imagen 29. Costo de excavación modificado.

Precio por unidad	Valor
Precio kg de acero	\$4200
Precio m ³ de concreto	\$300000
Precio m ³ de Excavación	\$2000

También podemos observar que al no ser considerable el costo de la excavación el muro presenta una geometría más común con lo que se está presentando en el medio y a su vez se puede decir que la excavación vendría representando el 35% del costo total del proyecto.

Imagen 30. Resultados de la modificación de la excavación.

B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	b2 [cm]	Fitness	Cumple Factor de seguridad?	FS volcamiento >2	Fs Deslizamiento >1.5	Fs carga >3	As [kg/m]	Vol concreto [m ³ /m]	Vol excavación [m ³ /m]	Costo [\$ /m]
285	33	29	29	55	230	1	SI	2.35	1.95	3.59	66.41	2.38	18.84	\$ 1,029,540

Por otro lado, se planteó al principio de este proyecto, comparar con la ayuda de este programa, el cálculo de muros de contención en voladizo teniendo en cuenta o no, el efecto del sismo sobre estas estructuras. Para esto, se analizó con los mismos datos, imagen 31, diferentes situaciones, que consisten en correr el programa para muros ubicados en diferentes ciudades de acuerdo su coeficiente de aceleración efectiva.

Imagen 31. Datos iniciales para evaluación del sismo.

MATERIALES		GEOMETRÍA DEL MURO	
$f_c =$	21.0 MPa	H	5.00 m
$f_y =$	420.0 MPa	h_p	1.50 m
$\gamma_c =$	24.0KN/m ³	β	10°
$\gamma_{s1} =$	18.0KN/m ³	I	90°
$\gamma_{s2} =$	19.0KN/m ³	ϕ_{corte}	60°
PROPIEDADES DEL SUELO		d	5.00 m
ϕ_1	30°	Re	0.07 m
ϕ_2	20°	K1 (1/3-2/3)	2/3
Cohesion	40.0KN/m ²	K2 (1/3-2/3)	2/3
Q último	0.0KN/m ²	FACTORES DE SEGURIDAD	
ANÁLISIS SÍSMICO		q	50.0KN/m ²
Aa	0.45	F _{SV}	2
		F _{SD}	1.5
		F _{SC}	3

Se analizaron los muros para las ciudades de Tumaco-Nariño, Medellín-Antioquia y Leticia-Amazonas con coeficientes de aceleración de 0.45, 0.15 y 0.05 respectivamente, con 40 iteraciones cada corrida. Por último, se descartó el efecto del sismo en los muros de contención como fue planteado en los objetivos. Los resultados se muestran en la imagen 32.

Imagen 32. Resultados de evaluación del sismo.

Ciudad	Aa	B [cm]	evi [cm]	evs [cm]	ep [cm]	B1 [cm]	FS volcamient o >2	Fs Deslizamien to >1.5	Fs carga >3	As [kg/m]	Vol concreto [m ³ /m]	Vol excavación [m ³ /m]	Costo [\$/m]
Tumaco	0.45	490	33	31	29	270	2.00	1.93	5.66	78.09	3.02	18.26	\$ 1 727 273
Medellín	0.15	370	33	29	29	255	2.03	3.07	6.79	71.25	2.62	12.38	\$ 1 420 498
Leticia	0.05	360	33	29	29	285	2.00	3.60	8.71	70.68	2.59	10.25	\$ 1 351 868
Sin Sismo	0	315	33	29	29	225	2.00	3.66	6.75	68.12	2.46	11.04	\$ 1 323 335

De la imagen 32, se puede observar que a medida que aumenta la amenaza sísmica en el país, los muros de contención tienden a tener una pata y un talón más largo, esto para mejorar la estabilidad debido al sismo y contrarrestar los empujes inherentes a este, el aumento del talón permite que el terreno por detrás del muro ayuda a mejorar la estabilidad, debido a que el factor de seguridad que domina es el volteo.

Imagen 33. Incrementos con respecto al muro sin sismo.

Ciudad	Aa	B [cm]	B1 [cm]	As [kg/m]	Vol concreto [m ³ /m]	Vol excavación [m ³ /m]	Costo [\$/m]
Tumaco	0.45	55.6%	20.0%	0.0%	22.6%	65.3%	30.5%
Medellín	0.15	17.5%	13.3%	4.6%	6.5%	12.1%	7.3%
Leticia	0.05	14.3%	26.7%	3.8%	5.3%	-7.2%	2.2%

De la imagen anterior se observa los incrementos en porcentaje de la geometría del muro, específicamente la pata, el aumento del acero, el volumen de excavación y el volumen de concreto con respecto a los muros sin sismo, el resultado más relevante de esta imagen es que el precio por metro lineal del muro aumenta para la ciudad de mayor actividad sísmica en un 30.5%, esto es, \$403.938/m con respecto al precio del muro si se desprecia el sismo.

Por otro lado, cuando se desprecia el sismo, el talón es tan corto como se puede para brindar estabilidad al muro y disminuir el volumen de lleno del terreno por detrás de este debido al volumen y al costo de este.

Para analizar el comportamiento de los resultados a medida que aumenta el % de mutación, se puso a correr el programa con diferentes porcentajes de mutación y el mismo número de iteraciones, de lo cual se concluyó que este procedimiento permita explorar nuevas opciones cuando el programa se encuentra en un campo de posibles soluciones, debido a esto, el programa se demora un poco más en converger a medida que aumenta el porcentaje de mutación, pero tiende a encontrar la mejor solución.

BIBLIOGRAFÍA

BRAJA M., Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5ª Edición. Editorial Thompson. 2006.

CAVALCANTI PACHECO, Marco A. Algoritmos genéticos: principios e aplicaciones. Dpto Engenharia Elétrica. Pontificie Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DARWIN, C. The origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life, the book league of American, originalmente publicado en 1859. 1929

GESTAL, Marcus P. Introducción a los algoritmos genéticos. Dpto. Tecnologías de la información y las Comunicaciones, Universidad de la Coruña. Internet: (<http://sabia.tic.udc.es/~mgestal/cv/AAGGtutorial/TutorialAlgoritmosGeneticos.pdf>) Introducción a los algoritmos genéticos gestal)

HAUPT, R. L. y HAUPT, S. E. Practical Genetic Algorithms. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004.

HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. 1992. Internet: (http://www.ebook3000.com/Adaptation-in-Natural-and-Artificial-Systems_101995.html)

MONONOBE N., Matsuo H. On the determination of earth pressure during earthquakes. In Proc. Of the World Engineering Conf., Vol. 9, str. 176 Okabe S> 1926 General theory of earth pressure. Journal of the Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan 12 (1). 1929

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE
NSR-10.Bogotá, Colombia. Marzo 2010.