

**DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA ANÁLISIS CINEMÁTICO DE MACIZOS  
ROCOSOS, CON COMPORTAMIENTO DOMINADO POR DISCONTINUIDADES**

**REINA VALENCIA ANDRÉS FELIPE  
TORRES MAHECHA ANDRÉS CAMILO**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

**DISEÑO DE UN PROGRAMA PARA ANÁLISIS CINEMÁTICO DE MACIZOS  
ROCOSOS, CON COMPORTAMIENTO DOMINADO POR DISCONTINUIDADES**

**REINA VALENCIA ANDRÉS FELIPE  
TORRES MAHECHA ANDRÉS CAMILO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
INGENIERÍA CIVIL**

**Asesor Disciplinar: Ing. DANIEL ENRIQUE CAÑAS VESGA  
Asesor Metodológico: LAURA MILENA CALA CRISTANCHO**



**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

A Dios,

Por habernos permitido llegar hasta este punto,  
y brindarnos Salud y sabiduría ante todo

Para lograr nuestros objetivos.

A nuestros padres,

Por habernos apoyado no sólo durante el paso por nuestra carrera,  
Sino para la consecución de nuestro trabajo.

Por su motivación para que día a día seamos personas de bien.

Todo esto se los debemos a ustedes.

A nuestro asesor,

Por compartir con nosotros sus ideas,  
y por su orientación incondicional.

Gracias a su apoyo, hoy estamos sustentando

Este trabajo de grado.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	10
1 PRELIMINARES .....	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	13
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.3.1 Objetivo general.....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2 MARCOS DE REFERENCIA .....	15
2.1. ANTECEDENTES .....	15
2.1.1 Disciplinarios .....	15
2.1.2 Técnicos .....	16
2.2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.2.1. Factores a evaluar del macizo rocoso (discontinuidades) .....	18
2.2.1.1. Estructura geológica (discontinuidades) .....	19
2.2.2. Redes estereográficas.....	24
2.2.2.1. Consideraciones sobre rumbo y buzamiento .....	24
2.2.2.2. Tipos de representaciones estereográficas.....	26
2.2.2.3. Modos de utilizar la red estereográfica .....	28
2.2.3. Mecanismos de rotura .....	32
2.2.3.1. Rotura plana.....	32
2.2.3.2. Rotura en cuña.....	36
2.2.3.3. Rotura por volteo.....	38

2.3.	MARCO LEGAL .....	42
2.3.1.	Propiedad intelectual .....	42
2.3.2.	Código de Ética del Ingeniero.....	44
3	DISEÑO METODOLÓGICO.....	45
3.1	Datos básicos.....	45
3.2	Bosquejo .....	46
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1	Metodología .....	50
4.1.1	Diagrama de casos de uso .....	50
4.1.2	Diagrama de flujo del programa.....	56
4.2	Resultados por fases.....	59
4.2.1	Ventana de inicio .....	59
4.2.2	Botón de análisis .....	60
4.2.2.1	Componentes externos (inherentes): .....	60
4.2.2.2	Descripción de áreas. ....	61
4.2.3	Proceso .....	63
4.2.4	Análisis de resultados en Red estereográfica.....	70
4.2.5	Botón de ayuda.....	70
5	CONCLUSIONES .....	72
6	RECOMENDACIONES .....	73
	BIBLIOGRAFÍA .....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Programas con licencia del entorno Rocscience.....	17
Tabla 2. Clasificación de las discontinuidades de acuerdo a su origen.....	19
Tabla 3. Mecanismos de ocurrencia de discontinuidades en macizos rocosos.....	20
Tabla 4. Tipos de rotura plana.....	35
Tabla 5. Art. 33, Código de Ética del Ingeniero. ....	44
Tabla 6. Datos básicos para el diseño metodológico. ....	45
Tabla 7. Operacionalización de variables independientes y dependientes. ....	47
Tabla 8. Fases de investigación del proyecto de investigación en desarrollo. ....	48
Tabla 9. Información para el caso de uso "Ingreso de familias". ....	51
Tabla 10. Información para el caso de uso "Análisis cinemático". ....	53
Tabla 11. Eventos por botón considerados en el programa. ....	57
Tabla 12. Botones iniciales del programa. ....	60
Tabla 13. Descripción de las áreas de la interfaz de usuario. ....	61
Tabla 14. Datos de entrada para el área 1, ingreso de datos.....	63
Tabla 15. Convenciones para identificar sectores de cuña. ....	67
Tabla 16. Discriminación del mecanismo de falla, dado un talud y 3 familias de discontinuidad. ....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Familias de discontinuidades y tamaño relativo de bloques de roca.....	21
Figura 2. Representación estereográfica. ....	22
Figura 3. Representación estereográfica de un plano inclinado.....	22
Figura 4. Diagrama de rosetas.....	23
Figura 5. Representación de familias de discontinuidades en un bloque diagrama. .....	23
Figura 6. Representación de una superficie de falla. El ángulo con respecto a la norte es horizontal y el ángulo de buzamiento, vertical.....	25
Figura 7. Proyección de un plano estructural. Representación estereográfica de una superficie plana K y cuyo polo es P.....	26
Figura 8. Tipos de proyecciones. Polar (A) y Ecuatorial (B). Ramsay, Jhon. Plegamiento y fracturamiento de rocas .....	27
Figura 9. Plano estructural, horizonte y polo. (A) es una esfera cortada por un plano estructural. (B) es una semiesfera con el polo P y un plano inclinado K. ....	29
Figura 10. Esquema del plano estructural $K = (N \phi E; \alpha SE)$ . Representación paso a paso .....	29
Figura 11. Ejemplos numéricos de planos estructurales aplicando azimut de buzamiento y buzamiento .....	31

Figura 12. Rotura plana.....	33
Figura 13. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña.....	34
Figura 14. Rotura por un plano en la cara del talud. ....	35
Figura 15. Rotura paralela al talud. Rotura por pérdida de resistencia del pie.....	35
Figura 16. Rotura paralela al talud. Rotura por pérdida de resistencia del pie.....	36
Figura 17. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña.....	38
Figura 18. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña. (Hoek y Bray, 1981) .....	39
Figura 19. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura por vuelco. (Hoek y Bray, 1981). ...	40
Figura 20. Representación gráfica de volteo .....	41
Figura 21. Diagrama de caso de uso para la tarea "Ingreso de familias". .....	52
Figura 22. Diagrama de caso de uso para la tarea "Análisis cinemático". .....	54
Figura 23. Diagrama caso de uso para el programa en general. ....	55
Figura 24. Ventana de inicio de ACMR. ....	59

Figura 25. División de la plataforma de ACMR en áreas.....	61
Figura 26. Ingreso de datos en área 1. ....	63
Figura 27. Esquema de la red estereográfica, de los planos de discontinuidad y polos.....	64
Figura 28. Discriminación de los mecanismos de falla por botones. ....	65
Figura 29. Sectores para falla planar. ....	65
Figura 30. Sectores de falla en cuña.....	66
Figura 31. Sector de falla por volteo.....	67
Figura 32. Consolidación de sectores cinemáticos en el área 3.....	68
Figura 33. Plataforma de "Guardar como" para ACMR.....	69
Figura 34. Proceso de salida de la interfaz gráfica.....	71
Figura 35. Ubicación botón de ayuda ACMR. ....	71

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad abordar un enfoque mixto (tanto epistemológico como práctico), de acuerdo a la línea de Investigación de Geotecnia de la Universidad La Gran Colombia. Se desarrolla para facilitar el análisis de taludes en roca, aplicado a portales de túneles, vías a media ladera, explotación minera, entre otros, y que se realiza a nivel nacional.

La sublínea (o área de estudio) se enfatiza en mecánica de rocas y estabilización de taludes. Se trata de diseñar y ejecutar un software libre, de elaboración propia, susceptible a mejoras y actualizaciones, cuyo alcance sea analizar mecanismos de falla en macizos rocosos dominados por discontinuidades, con aplicabilidad a distintos proyectos de infraestructura en los sectores minero, energético y de transporte.

# 1 PRELIMINARES

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Muchos ingenieros en Colombia desconocen los métodos para identificar problemas de inestabilidad de macizos rocosos, debido a que en la actualidad, existe una complejidad matemática, atribuida al análisis vectorial, desarrollo tridimensional y manipulación de redes estereográficas, lo cual conlleva a una incertidumbre en la adecuada metodología para sectorizar cinemáticamente un macizo rocoso. Se ha descubierto que para muchos escenarios de inestabilidad y deslizamientos en taludes, en relación a la situación de Colombia, las medidas ejecutadas tienden a ser a corto y mediano plazo. Por ejemplo, existen vías que son modeladas, proyectadas y construidas con estrictos parámetros de diseño, pero su vida útil se ve afectada por la incidencia de continuos cierres a causa de deslizamientos; en un terreno montañoso o escarpado, que existe en gran parte del país, pueden presentarse desde caídos de roca, cuñas hasta otros mecanismos de falla, debidos a la inadecuada identificación de problemas de estabilidad.

Desarrollar una metodología para sectorizar cinemáticamente un macizo rocoso, implica el diseño de un programa que facilite el análisis de macizos rocosos con comportamiento dominado por las estructuras de discontinuidad, en términos de sus propiedades (Azimut de buzamiento y buzamiento), que facilite la toma de decisiones.

En los programas computacionales existentes no se analiza mediante diversos enfoques o metodologías la estabilidad de cortes abiertos en roca. Las medidas tomadas sin un verdadero análisis (lógicamente facilitado con un programa

computacional) que represente la problemática real, implican: pérdidas económicas, retrasos en infraestructura y la reevaluación de variables no tenidas en cuenta (re-diseños). Los resultados de la investigación pretenden lograr mejoras en estudios de factibilidad y tiempos de ejecución de estudios.

La comprensión de los mecanismos de falla en macizos rocosos, implica: por un lado, un método gráfico y sencillo; por otro, un método matemático de demostraciones complejas. El procedimiento a seguir es la realización del programa, para así presentar resultados de estudios existentes en cuanto a identificación de fallas.

Desde el punto de vista anterior, el interrogante que debe responderse al concluir el proceso investigativo, es: ¿Qué mecanismos de falla se asocian a un macizo rocoso dominado por discontinuidades, y cómo se analizan para definir las medidas de mitigación apropiadas?

Para responder adecuadamente el interrogante anterior, se derivan otros que deberán responderse conforme se avance en las fases del proyecto investigativo:

- ¿Qué parámetros y/o factores se tienen en cuenta para identificar un bloque cinemáticamente inestable?
- Dada la orientación de varias familias de discontinuidad, ¿Cuáles son los mecanismos de falla posibles para un determinado macizo rocoso?
- ¿La herramienta computacional podrá automatizar la identificación de los mecanismos de falla en excavaciones a corte abierto realizadas en macizos rocosos?

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La modelación de taludes en macizos rocosos se logra con la sectorización cinemática basada en los sistemas de discontinuidad. Para llegar a ella, se requiere la comprensión y posterior representación de mecanismos de falla en macizos rocosos, y considerar que la sectorización cinemática conlleva en sí misma una incertidumbre.

Se plantea la presente investigación considerando las limitaciones que pueden presentarse en los entornos gráficos y compiladores de Visual Basic y Matlab; en contraste, Java ofrece un campo de aplicabilidad importante en términos de mayor complejidad de programación, destinado a generar una respuesta (en términos gráficos y numéricos) de los mecanismos de falla de un macizo rocoso y la presencia o no de bloques críticos, en función de las orientaciones del talud y las discontinuidades.

Para la investigación, se consideran herramientas para interpretar y aplicar los complejos ambientes de programación en Java, en términos de desarrollar una interfaz que sea de fácil manejo,

Se espera que los resultados de la investigación tengan un impacto positivo, ya que tendrá gran aplicabilidad, y más, en terrenos montañosos y escarpados como es común en Colombia, que contribuya a: asumir la ejecución de proyectos de gran envergadura para mejorar las vías de comunicación en nuestro país, así mismo aumentar la complejidad de los estudios, y reconocer un problema de inestabilidad con mayor claridad.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar un programa que analice la estabilidad cinemática de un macizo rocoso, teniendo en cuenta la influencia de las discontinuidades (especialmente su orientación), cuyo resultado sea la determinación del mecanismo de falla del macizo analizado.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar una herramienta computacional para la identificación de los mecanismos de falla de macizos rocosos, aplicado a taludes.
- Reducir la incertidumbre asociada a la sectorización cinemática de taludes rocosos.
- Establecer un código para la identificación de sectores cinemáticamente inestables.

## 2 MARCOS DE REFERENCIA

### 2.1. ANTECEDENTES

Se pueden subdividir en: antecedentes disciplinares (otras investigaciones relacionadas con el problema de investigación), y antecedentes técnicos (otros programas que pueden modelar propiedades del macizo rocoso).

#### 2.1.1 Disciplinarios

En 2010, Andrés Martínez<sup>1</sup>, de la Universidad Industrial de Santander, propone el trabajo titulado “Impacto ambiental generado por malas prácticas de ingeniería, caso de estudio Doble Calzada Bogotá-Girardot, sitio “El Paso””. Es importante destacar que la construcción de una doble calzada implica realizar cortes y rellenos de las laderas, y en Colombia muchas vías siguen la morfología de las laderas que atraviesa, sumado a que en el sitio “El paso” se presenta fenómeno de remoción en masa traslacional. Es un trabajo que pasa por el análisis cinemático y mecánico, ya que involucra la geología, geomorfología, reconocimiento geotécnico, perfiles geológico-geotécnicos, y ensayos de laboratorio, que conlleven a establecer medidas de mitigación. En el estudio se indica que los materiales en el sector tienen un comportamiento rocoso, que implica un análisis cinemático de estabilidad de taludes. El talud in situ presenta una estratificación y 3 familias de discontinuidades, las cuales fueron evaluadas para 3 mecanismos de falla (Planar, cuña volteo) en tablas independientes, para finalmente elaborar el diagrama de sectorización cinemática del macizo rocoso,

---

<sup>1</sup> MARTÍNEZ, Andrés. Impacto ambiental generado por malas prácticas de ingeniería, caso de estudio Doble Calzada Bogotá-Girardot, sitio “El Paso”. *En*: Universidad Industrial de Santander [en línea]. Disponible en: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7480/2/133346.pdf>>. [citado en 23 de marzo de 2015].

con los alineamientos y buzamientos que debe tener el macizo rocoso a fin de que no se presente algún mecanismo de falla.

En 2010, el Ing. Daniel Cañas<sup>2</sup> presenta un apartado de su tesis aplicada a túneles, la cual titula “Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles”. Dentro de este trabajo existe un capítulo llamado “Bloques de roca inestables”, que sirve como preámbulo para el estudio de sectorización cinemática. Allí se indica que para determinar el bloque de roca potencialmente inestable, se utilizan expresiones matemáticas que definen las orientaciones de las discontinuidades y de la intersección entre ellas.

En el trabajo se presenta un método vectorial para la obtención de la intersección entre planos de discontinuidad. Como trabajo autónomo, se obtiene la intersección entre dos planos de discontinuidad utilizando trigonometría y coordenadas rectangulares propias de la plataforma de programación, dentro de la exploración misma de la investigación.

### **2.1.2 Técnicos**

Como parte de los antecedentes técnicos se contemplan programas que se han utilizado para modelación de macizos rocosos:

---

<sup>2</sup> CAÑAS, Daniel. Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles. En: Cap. 2. Bloques de roca inestables. [citado en 23 de marzo de 2015]; p. 30.38.

Las herramientas computacionales se desarrollan en base a investigaciones geotécnicas y son utilizadas en muchas investigaciones realizadas para profundizar en el conocimiento. Rocscience<sup>3</sup> como plataforma, engloba programas como Swedge, Rocplane y RocTopple, entre otros, ya que estos programas se utilizan para identificación del mecanismo de falla y establecer así las medidas de mitigación de acuerdo al análisis de un talud inestable. Ver Tabla 1, donde se presentan programas con licencia del entorno Rocscience y los ámbitos de desarrollo.

Tabla 1. Programas con licencia del entorno Rocscience.

PROGRAMA	ÁMBITOS DE DESARROLLO
Dips	Túneles, estabilidad de taludes, minería, excavaciones, análisis de datos, rocas.
RocPlane	Estabilidad de taludes, roca, minería.
RocTopple	Minería, estabilidad de taludes, roca.
Slide	Roca, suelo, estabilidad de taludes, minería, excavaciones, muros de contención, presas hidráulicas, agua subterránea, diques.
Swedge	Estabilidad de taludes, minería, roca.
Unwedge	Minería, excavaciones, roca. Ejecuta los mismos ámbitos para túneles.

<sup>3</sup> ROCSCIENCE. Productos. [en línea]. Disponible en: <  
<https://www.rocscience.com/products/overview>>. [citado en 18 de mayo de 2014].

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

Para valorar adecuadamente los resultados esperados con el desarrollo e implementación del nuevo programa que analice macizos rocosos, las teorías existentes se desarrollan con base a lo siguiente:

- Las discontinuidades, quienes dominan el comportamiento el talud. La orientación de ellas son datos de entrada para el programa.
- Comprender conceptos de geología estructural, asociados a: rumbo, azimut de buzamiento, buzamiento y manejo de redes estereográficas.
- La delimitación en el análisis de los mecanismos de falla: falla planar, falla en cuña o falla por volteo.

### **2.2.1. Factores a evaluar del macizo rocoso (discontinuidades)**

Generalmente, para la evaluación de un macizo rocoso se tienen en cuenta factores como: efecto de la litología, estructura geológica (discontinuidades), grado de alteración de la roca, estado de esfuerzos y condiciones hidrogeológicas.

No obstante, para el desarrollo de la investigación, y teniendo en cuenta que el alcance se limita al análisis cinemático del macizo rocoso con comportamiento dominado por sus estructuras geológicas, la característica fundamental de las discontinuidades es su orientación.

### 2.2.1.1. Estructura geológica (discontinuidades)

Como lo afirma Gonzalo Duque Escobar<sup>4</sup>, las discontinuidades son ocasionadas por la presencia de planos de debilidad que controlan procesos de deformación y falla de un macizo en cotas superficiales, donde se realizan la gran mayoría de obras de ingeniería. A mayor número de discontinuidades, se encontrarán fragmentos de bloques de roca pequeños y menor será la resistencia del macizo rocoso comparada con la de un bloque de roca. Las discontinuidades de acuerdo a su origen, se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 2:

Tabla 2. Clasificación de las discontinuidades de acuerdo a su origen.

<b>ORIGEN</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
<b>Genéticas</b>	Son discontinuidades dependientes del tipo de roca, sea ígnea, sedimentaria o metamórfica. En la siguiente tabla se encuentra la clase y mecanismo asociados a cada una.
<b>Termoquímicas o físicoquímicas</b>	Estas discontinuidades de carácter secundario, ocurren luego de formada la roca por agentes externos, que se ve afectada por procesos de termofracturación, halifracturación, gelifracturación, argilofracturación.
<b>Gravitacionales y tectónicas</b>	Son discontinuidades secundarias, asociadas a esfuerzos gravitatorios como grietas de tracción. Las discontinuidades por esfuerzos tectónicos incluyen estructuras de placas tectónicas (las mayores discontinuidades), fallas y diaclasas.
<b>Biológicas</b>	Se presentan generalmente por penetración y crecimiento radicular de los árboles.

Fuente: Adaptado de Gonzalo Duque Escobar. Manual de Geología para Ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, p. 258.

Los mecanismos de ocurrencia de las discontinuidades, asociadas al origen de las mismas, se presentan a continuación en la Tabla 3:

<sup>4</sup> DUQUE, Gonzalo. Cap. 12, Macizo rocoso. En: Manual de Geología para ingenieros [en línea]. (s.f.). <<http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/294/macizorocoso.pdf>>. [citado en 20 de diciembre de 2014], p. 258.

Tabla 3. Mecanismos de ocurrencia de discontinuidades en macizos rocosos.

ORIGEN	ROCA(S)	CLASE	MECANISMO DE OCURRENCIA
<b>Genético</b>	Ígnea	Estructura de flujo	Contactos entre coladas sucesivas de magma.
		Estructura de retracción	Grietas de retracción por enfriamiento de magma.
	Sedimentaria	Estratificación	Contactos entre deposiciones sucesivas de sedimentos.
	Metamórfica	Foliación	Por gradientes térmicos, de presión y cambios en mineralógicos.
<b>Físico-químico</b>	Todas	Termofracturas	Ciclos de calentamiento-enfriamiento o humedecimiento-secado.
		Halifracturas	Expansión de sales en fracturas.
		Argilofracturas	Expansión de arcillas en fracturas.
		Gelifracturas	Ciclos de congelamiento-deshielo.
<b>Gravedad</b>	Todas	Relajación	Por relajación de esfuerzos verticales en laderas, y horizontales en superficies planas.
		Corte	Concentración de esfuerzos horizontales en valles.
<b>Tectónico</b>	Todas	Estructuras de placa	Correspondientes a las dorsales oceánicas y las zonas de subducción.
		Fallas	Rupturas con desplazamientos por esfuerzos de compresión, tracción y corte.
		Diaclasas	Rupturas por esfuerzos de tectonismo pero sin desplazamiento de bloques.
		Fracturas de pliegues	Se forman en las charnelas (puntos de máxima curvatura). Son fracturas radiales en la zona de tracción y de corte en la parte interna.
<b>Biológico</b>	Todas	Acción de las raíces	Penetración y crecimiento de las raíces de los árboles.

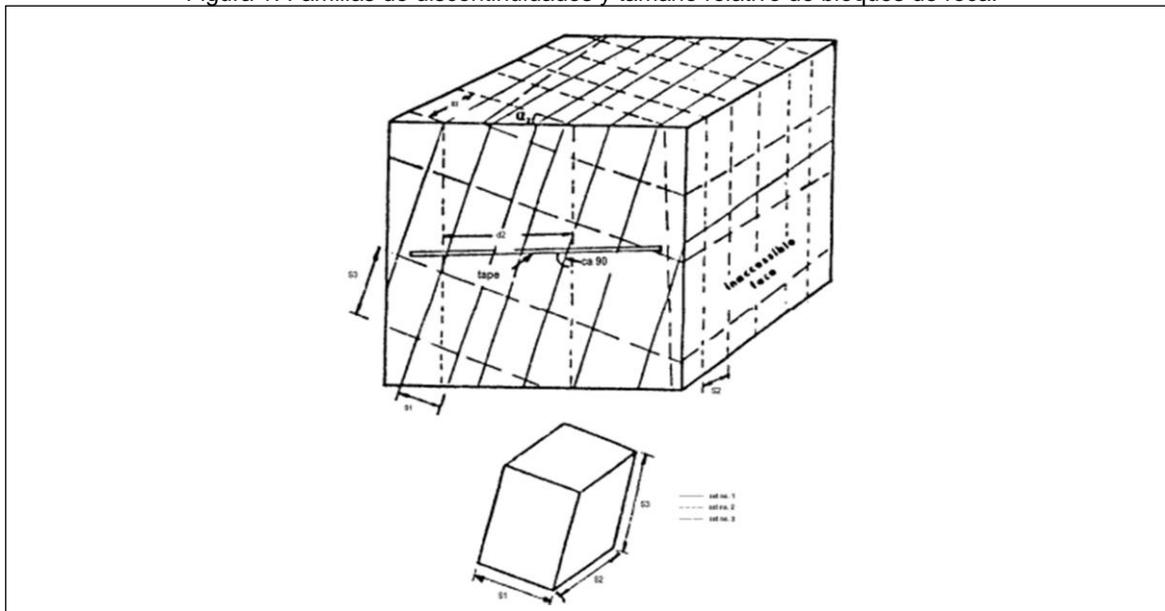
Fuente: Adaptado de Álvaro J. González G. Universidad Nacional, 1995.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> GONZÁLEZ, Álvaro, Universidad Nacional, 1995. Citado por: DUQUE, Gonzalo. Cap. 12, Macizo rocoso. En: Manual de Geología para ingenieros [en línea]. (s.f.). < <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/294/macizorocoso.pdf>>. [citado en 20 de diciembre de 2014], p. 257.

El análisis cinemático de un macizo rocoso considera la orientación de las discontinuidades. La orientación relativa (así como el espaciado) de las diferentes familias en un macizo rocoso, pueden definir la forma de los bloques que lo conforman. Así mismo, condicionan la presencia de inestabilidades y roturas al existir estructuras de contención y/u obras de ingeniería.

En Figura 1, se muestra una sección cúbica de macizo rocoso, atravesado por 3 familias de discontinuidades que delimitan el tamaño relativo de bloques de roca.

Figura 1. Familias de discontinuidades y tamaño relativo de bloques de roca.



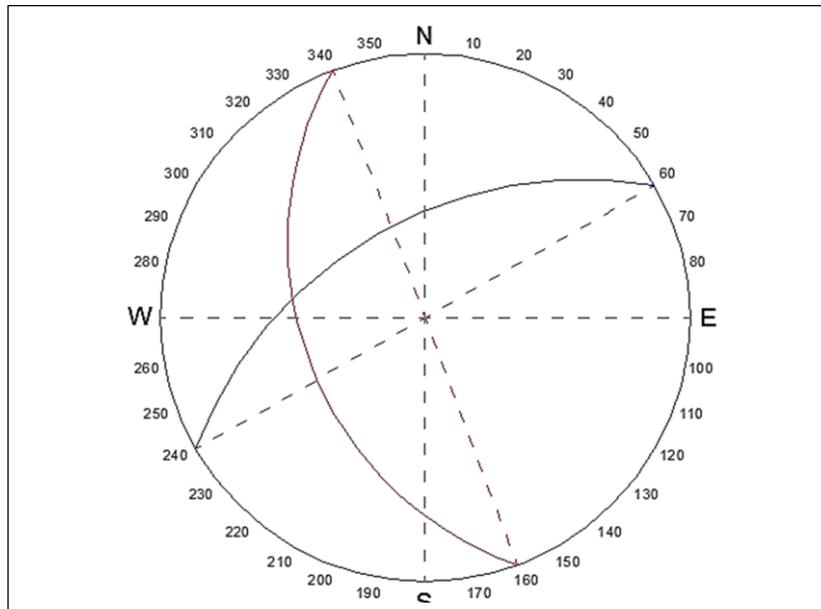
Fuente: MONTERO, Juan. Caracterización Geológica de macizos rocosos. En: Universidad Nacional de Colombia. [En línea]. (s.f.). Disponible en: <[http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/11%20MACIZO%20ROCOSO%20\(2\).pdf](http://www.docentes.unal.edu.co/jmmonteroo/docs/11%20MACIZO%20ROCOSO%20(2).pdf)>. [citado en 17 de mayo de 2014].

De acuerdo a González de Vallejo<sup>6</sup>, la orientación de una discontinuidad queda definida por su azimuth o dirección de buzamiento y por su buzamiento (ver 2.2.2.1 para más detalle). En cuanto a la representación gráfica para diferentes familias de discontinuidades puede realizarse por cuatro métodos

<sup>6</sup> GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 180-181.

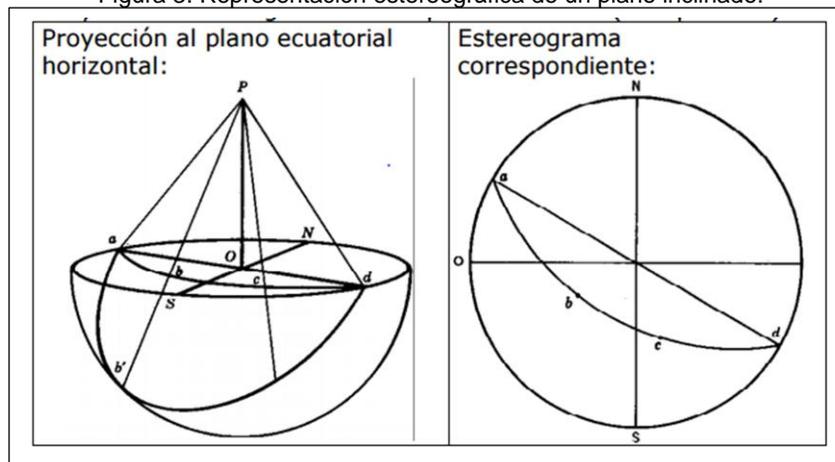
**Proyección estereográfica**, representando los polos o planos con valores medios de las diferentes familias. En la Figura 2 se aprecia una representación mediante la utilización de una falsilla, y en la Figura 3 se aprecia el esquema de proyección.

Figura 2. Representación estereográfica.



Fuente: Elaboración propia.

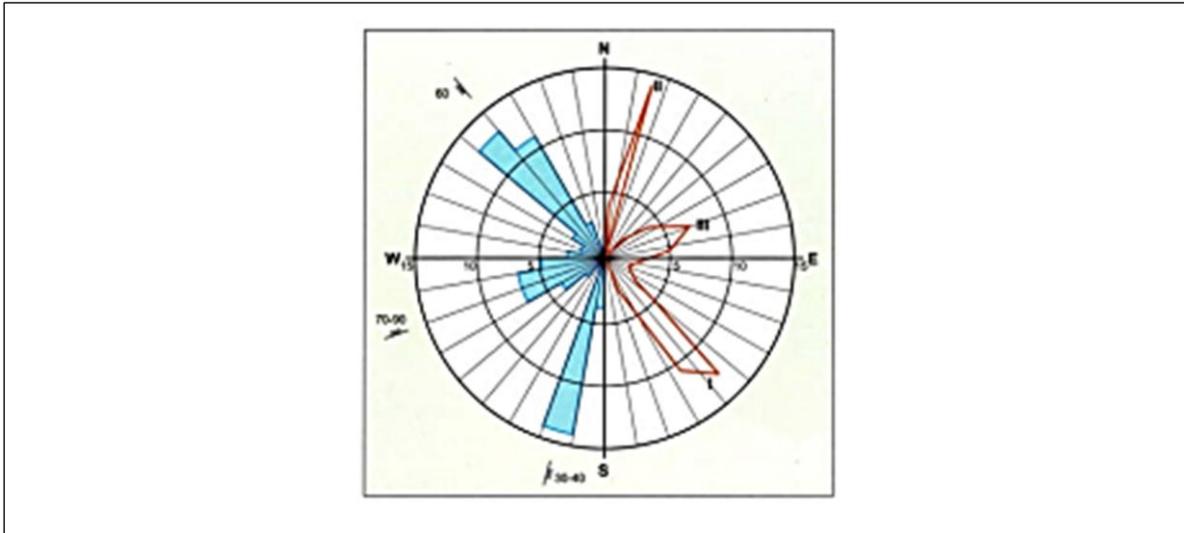
Figura 3. Representación estereográfica de un plano inclinado.



Fuente: Tomado de: Phillips, 1971.

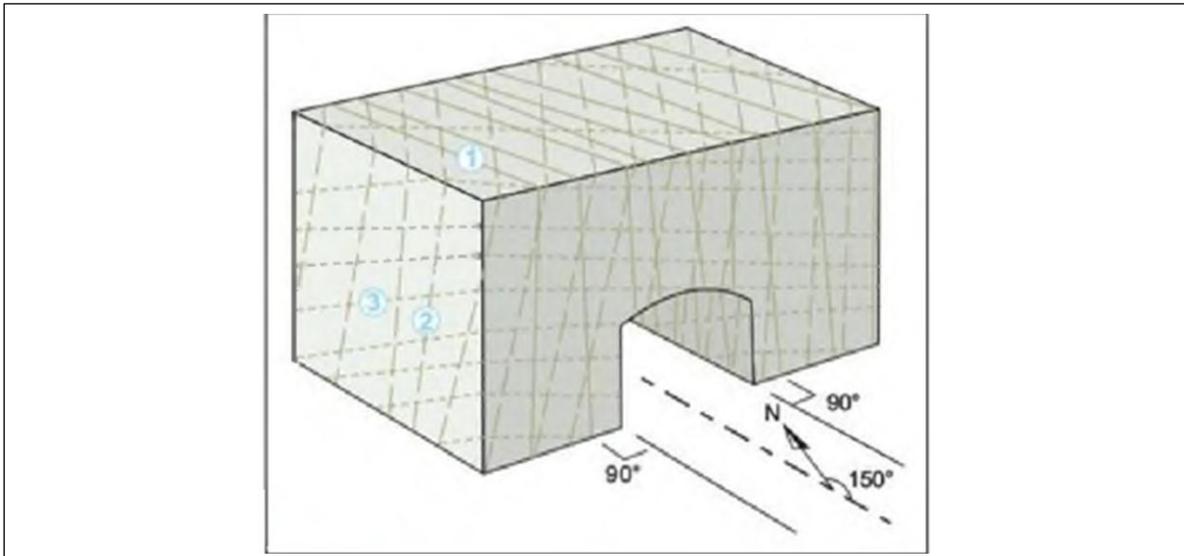
**Diagramas de rosetas**, que permiten representar medidas de orientación de forma cuantitativa. (Ver Figura 4).

Figura 4. Diagrama de rosetas.



**Bloques diagrama**, que permiten identificar una visión general de las familias y sus orientaciones respectivas, como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Representación de familias de discontinuidades en un bloque diagrama.



Fuente: González de Vallejo, Ingeniería Geológica, p. 181. A su vez, Adaptado de: ISRM, 1981.

**Símbolos en mapas geológicos**, que indican valores medios de la dirección y el buzamiento para los diferentes tipos de discontinuidades como: juntas, diaclasas, foliación, entre otras.

Para los resultados de la investigación en curso, la representación de los planos de discontinuidad y la identificación de sectores para cada mecanismo de falla se plasman en la red estereográfica.

### **2.2.2. Redes estereográficas**

La orientación de un plano de discontinuidad permite describir cómo se inclina el mismo en el espacio, quedando definido mediante dos ángulos: el azimut de buzamiento y buzamiento. En segundo lugar, reconociendo dos modos de evaluar la condición estructural, por medio de redes (polar y ecuatorial). Y en tercer lugar, un procedimiento de uso de la red ecuatorial, que es la más utilizada.

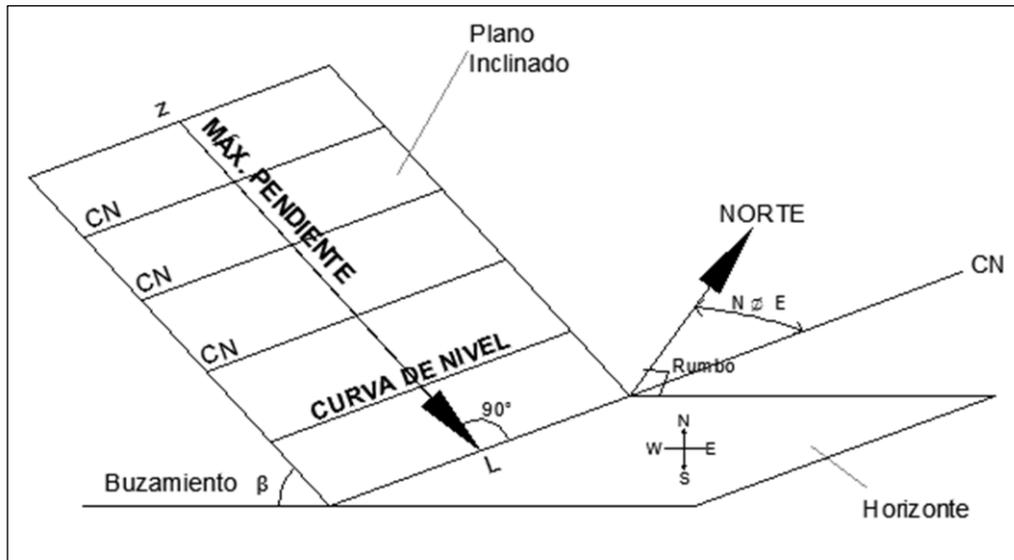
#### **2.2.2.1. Consideraciones sobre rumbo y buzamiento**

Como lo afirma Gonzalo Duque Escobar<sup>7</sup>, la disposición o geometría de un rasgo estructural se puede determinar con dos parámetros: con el rumbo o dirección, y el buzamiento (o cabeceo). Como ejemplo, en Figura 6 se supone un plano inclinado sobre el cual se pueden trazar las curvas de nivel (CN), perpendiculares a la línea de máxima pendiente.

---

<sup>7</sup> DUQUE, Gonzalo. Cap. 12, Óp. Cit., p. 266, 268.

Figura 6. Representación de una superficie de falla. El ángulo con respecto a la norte es horizontal y el ángulo de buzamiento, vertical.



Fuente: Elaboración propia.

El rumbo es la línea de intersección entre el plano de discontinuidad y un plano horizontal, y corresponde al ángulo horizontal  $\varphi$  que forma el plano inclinado (CN) con la Norte-Sur, de tal manera que el ángulo sea agudo. Un rumbo no se expresa sólo como un ángulo; antes se escribe N o S (Norte o Sur), y después se escribe E o W (Este u Oeste) dependiendo del cuadrante hacia donde se oriente.

El buzamiento, por su parte, es el ángulo ( $\beta$ ) que forma el plano inclinado con la horizontal, y sólo puede tener valores entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , horizontal y vertical respectivamente. También debe indicarse su dirección.

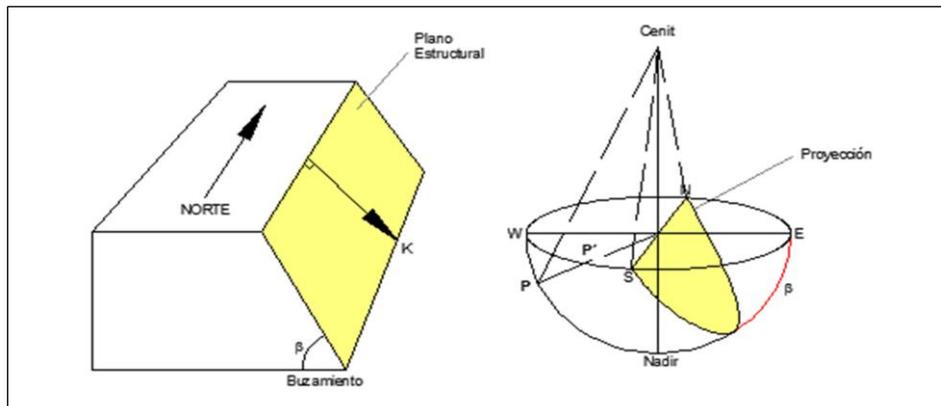
### 2.2.2.2. Tipos de representaciones estereográficas

Como lo afirma Duque Escobar<sup>8</sup>, se menciona la existencia de dos tipos de representaciones estereográficas: polar y ecuatorial. Si se ubica un observador en el centro de una esfera, podrá señalar sobre su superficie seis puntos fundamentales: el cenit y el nadir a su cabeza y en el suelo, respectivamente.

A derecha e izquierda el Este (E) y Oeste (W). Al frente y atrás estará el Norte (N) y el Sur (S). Los cuatro últimos definen el horizonte N-E-S-W, sobre el cual cae perpendicularmente la línea cenit-nadir, tal como se ve en Figura 7.

Luego, la esfera se parte en dos con el horizonte, y se considera la semiesfera interior, que es intersecada por un plano de corte que pasa por el centro, y del cual queda el semiplano que está por debajo del horizonte.

Figura 7. Proyección de un plano estructural. Representación estereográfica de una superficie plana K y cuyo polo es P.

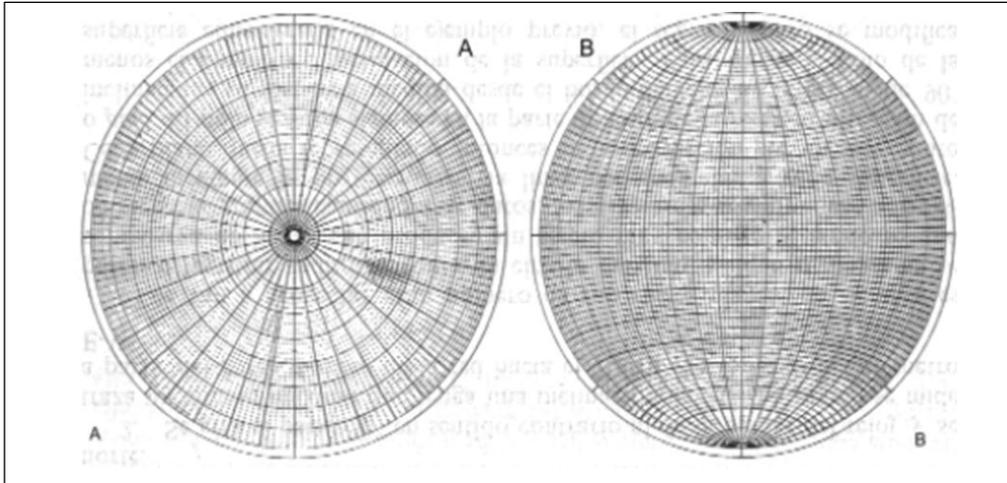


El semiplano representa un plano estructural, y el conjunto se puede dibujar con una proyección esférica polar o ecuatorial, por medio de una red o diagrama estereográfico. La Figura 8 muestra dos tipos de proyecciones, polar y ecuatorial.

<sup>8</sup> Ibid., p. 268.

En la primera, se grafican los polos de las discontinuidades. En la segunda, se aprecia una vista en planta de media esfera junto con la proyección horizontal del plano estructural.

Figura 8. Tipos de proyecciones. Polar (A) y Ecuatorial (B). Ramsay, Jhon. Plegamiento y fracturamiento de rocas. Citado por: (Duque, s.f., p. 268).



Fuente: DUQUE, Gonzalo Cap. 12, Macizo rocoso. En: Manual de Geología para ingenieros [en línea]. (s.f.). Disponible en <<http://www.galeon.com/manualgeo/geo12.pdf>>. [Citado en 23 de marzo de 2014], p. 268.

De acuerdo a Barletta<sup>9</sup>: En Fig., 7 (A) se aprecia una proyección equiárea. Es familiar para los geógrafos que representan en superficies planar a la superficie esférica de la Tierra, conservando la igualdad de áreas.

Se trazan sobre la esfera de referencia planos definidos por un rumbo y un buzamiento. El plano mencionado puede también ser representado por un poco del mismo plano, por lo que se conoce como una red polar. El polo es un punto en el cual la superficie esférica es penetrada por una línea radial que es normal al plano esquematizado.

<sup>9</sup> BARLETTA, Ricardo. Representación gráfica y evaluación de problema estructurales en macizos rocosos. Madrid (España): Universidad Nacional de la Plata, 2002, p. 9-13. Consultado en: <http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g2/REPRESENTACION-GRAFICA-Y-EVALUACION-DE-PROBLEMAS-ESTRUCTURALES-EN-MACIZOSROCOSOS.pdf>;

En Fig. 7 (B) se aprecia una red equiangular. Es un elemento de resolución de problemas geológicos (diaclasa, falla, esquistosidad) y también es una herramienta de cálculo. Es un sistema que lleva a dos dimensiones un problema espacial para tratarlo con mayor facilidad. La interpretación de la proyección equiangular es que se realiza una vista desde el cenit y representa lo visto en un plano horizontal.

### **2.2.2.3. Modos de utilizar la red estereográfica**

Existen dos modos de utilizar la red estereográfica: 1), con Rumbo y Buzamiento ( $\beta$ ), o 2) con Azimut de Buzamiento ( $\alpha$ ) y Buzamiento ( $\beta$ ). El proceso de utilización de una red estereográfica es sencillo, como se describe a continuación:

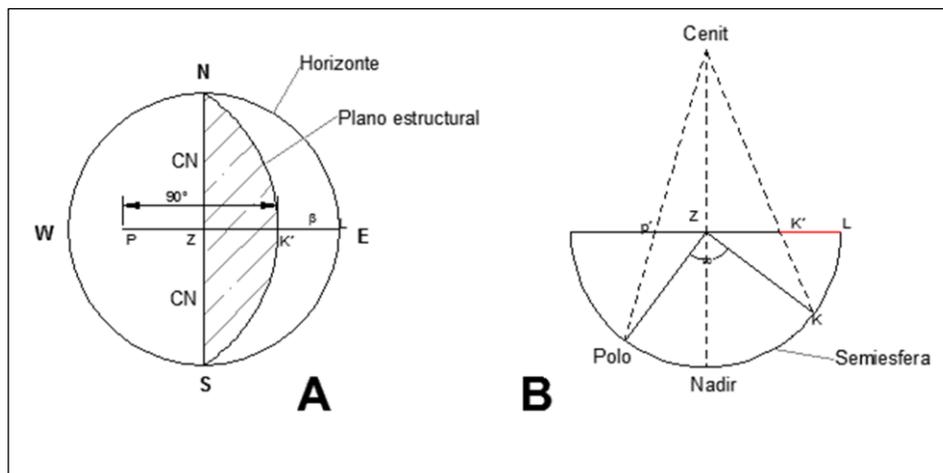
#### **Para rumbo y buzamiento:**

- a. Inicialmente se tiene una hoja de papel con la red estereográfica. Por detrás de ella, en el centro, se inserta un chinche.
- b. Luego se inserta una hoja de papel calcante.
- c. Se marcan los puntos N, S, E, W, y se dibuja a mano alzada la circunferencia principal.
- d. Marcar el ángulo del rumbo en el cuadrante que corresponde. (punto 1).
- e. Marcar un segundo punto, que debe estar a  $180^\circ$  del anterior. Por ejemplo, si un rumbo es N  $30^\circ$  W, el segundo punto es S  $30^\circ$  E. (punto 2).
- f. Unir 1-2. Debe pasar por el centro de la circunferencia principal.
- g. Para medir el buzamiento debe girarse el papel calcante, hasta que la línea 1-2 coincida con el N-S.
- h. Especificar la dirección del buzamiento.

- i. El buzamiento es un ángulo de cabeceo. Se cuenta desde el extremo hacia el centro de la circunferencia. Para el extremo es 0, para el centro es 90°, y en éste último valor la proyección permite apreciar media esfera.
- j. Marcar el punto correspondiente al buzamiento. (punto 3).
- k. Trazar el arco 1-3-2. Repisar el arco por el que pasan los tres puntos a través de la red.
- l. Regresar a la posición de origen. Quedará una vista en planta de media esfera y la proyección del plano estructural según el buzamiento indicado.

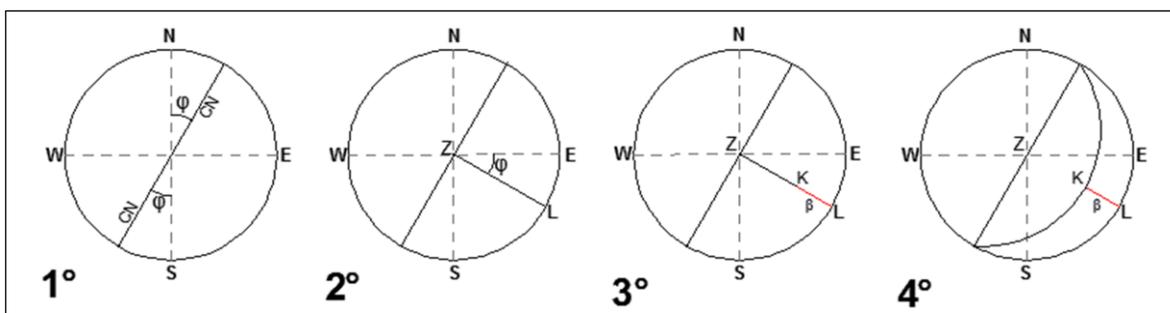
En la Figura 9 se esquematiza una vista en planta y un perfil de plano estructural. En la Figura 10 se muestra con imágenes la secuencia de utilización de una red estereográfica.

Figura 9. Plano estructural, horizonte y polo. (A) es una esfera cortada por un plano estructural. (B) es una semiesfera con el polo P y un plano inclinado K.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Esquema del plano estructural  $K = (N \phi E; \alpha SE)$ . Representación paso a paso. (Duque, s.f., p. 270).



- **Para Azimut de buzamiento y buzamiento**

En el documento de Duque Escobar<sup>10</sup> se menciona un segundo modo de utilizar la red estereográfica, con Azimut de Buzamiento ( $\alpha$ ) y Buzamiento ( $\beta$ ). El azimut es un ángulo que se pide a partir del norte, en la dirección de las manecillas del reloj y cuyo valor está, entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .

- a. Por detrás de la red estereográfica, en su centro, se inserta un chinche.
- b. Luego se inserta una hoja de papel calcante.
- c. Se marcan los puntos N, S, E, W, y se dibuja a mano alzada la circunferencia principal.
- d. Marcar el ángulo del azimut.
- e. Para determinar el rumbo, se ubican dos puntos:

$$\text{Punto 1} = \text{Azimut} + 90^\circ; \text{Punto 2} = \text{Azimut} - 90^\circ$$

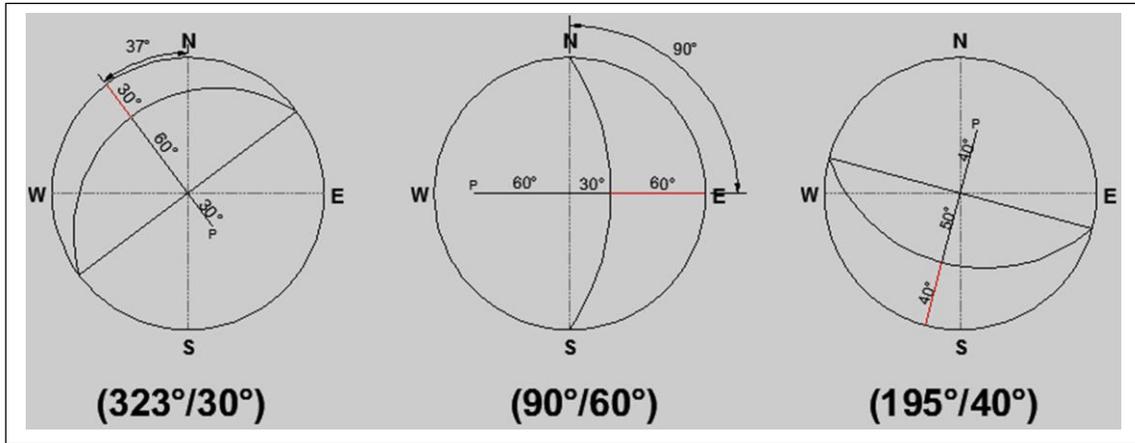
- f. Unir 1-2. Debe pasar por el centro de la circunferencia principal.
- g. Para medir el buzamiento debe girarse el papel calcante, hasta que la línea 1-2 coincida con el N-S.
- h. Especificar la dirección del buzamiento.
- i. El buzamiento es un ángulo de cabeceo. Se cuenta desde el extremo hacia el centro de la circunferencia. Para el extremo es  $0$ , para el centro es  $90^\circ$ , y en éste último valor la proyección permite apreciar media esfera.
- j. Marcar el punto correspondiente al buzamiento. (punto 3).
- k. Trazar el arco 1-3-2. Repisar el arco por el que pasan los tres puntos a través de la red.
- l. Regresar a la posición de origen. Quedará una vista en planta de media esfera y la proyección del plano estructural según el buzamiento.

Se pueden apreciar varios ejemplos en la Figura 11.

---

<sup>10</sup> Ibíd., p. 271.

Figura 11. Ejemplos numéricos de planos estructurales aplicando azimut de buzamiento y buzamiento.  
(Duque, s.f., p. 271).



Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3. Mecanismos de rotura

En referencia a González de Vallejo<sup>11</sup>, los mecanismos de rotura en rocas pueden ocurrir dependiendo de la influencia de las discontinuidades y la geometría del talud, en forma: planar, de cuña, de volteo, de pandeo y curva. Para delimitar los resultados de la investigación en curso, sólo se analizarán tres mecanismos: falla plana o Planar, falla en cuña y falla por volteo, las cuales se deben a la incidencia de estructuras de discontinuidad. A continuación se describen cada uno de ellos.

#### 2.2.3.1. Rotura plana

Mecanismo de falla que sucede cuando las discontinuidades están buzando a favor del talud y con dirección similar, cumpliéndose lo siguiente:

$$\psi > \beta > \emptyset$$

Donde:  $\psi$  corresponde al ángulo de inclinación del talud o Buzamiento del talud,  $\beta$  es el buzamiento o cabeceo de la discontinuidad, y  $\emptyset$  corresponde al ángulo de resistencia friccional de la discontinuidad.

Lo anterior se cumple si se realiza un análisis mecánico, es decir, un análisis de movimiento que además involucre un Factor de seguridad. Para un análisis cinemático no se incluye el valor de  $\emptyset$ , por lo cual la fórmula se reduce a:

$$\psi > \beta$$

---

<sup>11</sup> GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis, Óp. Cit., p. 440.

En conclusión, el análisis cinemático indica que el buzamiento del talud (o inclinación) debe ser mayor al buzamiento de la discontinuidad.

Con respecto a Ricardo Laín<sup>12</sup>, otra condición que debe cumplirse es que el azimut del plano de discontinuidad por donde tiene lugar la rotura, sea paralelo o casi paralelo al rumbo del plano del talud, con una desviación máxima de 20°. En otras palabras, puede resumirse de la siguiente manera:

$$\alpha_T = \alpha_D \pm 20^\circ$$

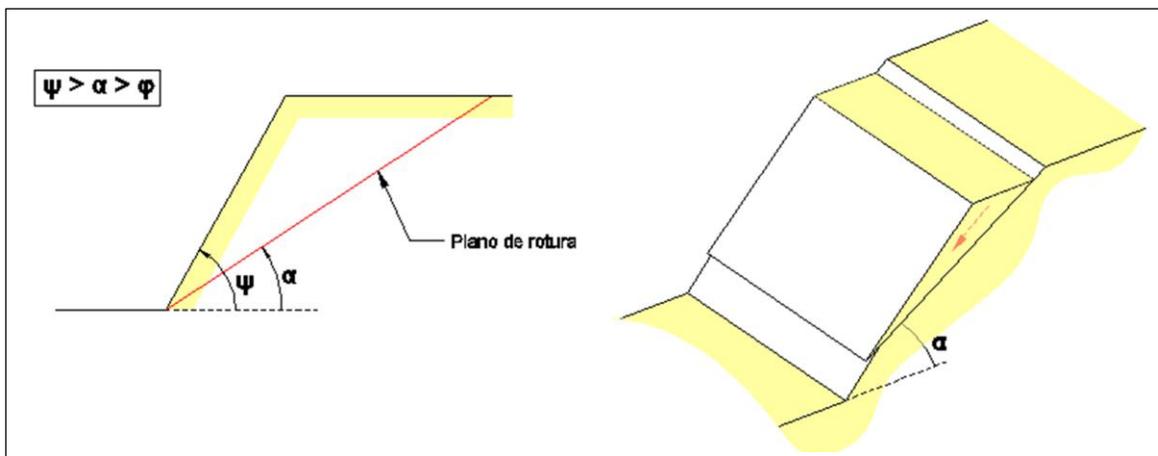
Donde:

$\alpha_T$ , corresponde al azimut del plano del talud.

$\alpha_D$ , corresponde al azimut del plano de discontinuidad donde ocurre la rotura.

En las figuras siguientes se puede observar: un esquema de una rotura plana vista en el terreno (Figura 12), así como su representación estereográfica (Figura 13).

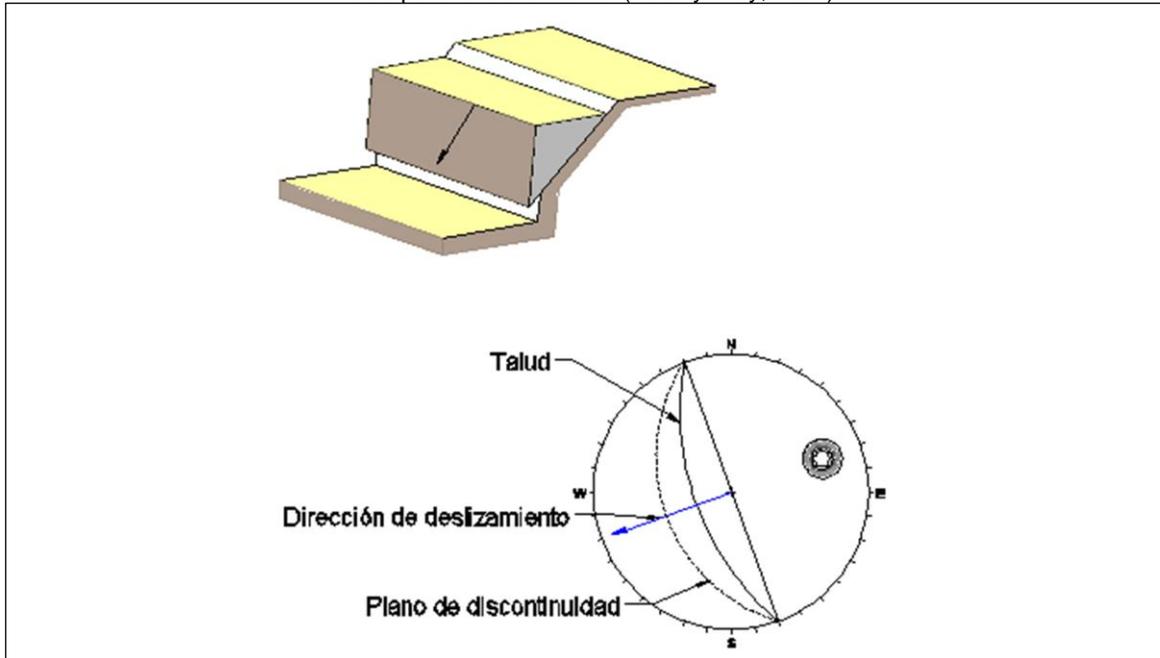
Figura 12. Rotura plana.



<sup>12</sup> LAÍN, Ricardo. Rotura plana. En: Rotura Plana y Rotura en Curva [en línea]. (s.f.). Disponible en <[http://oa.upm.es/14183/2/MECANICA\\_DE\\_ROCAS\\_2.pdf](http://oa.upm.es/14183/2/MECANICA_DE_ROCAS_2.pdf)>. [Citado en 25 de octubre de 2014], p. 286.

Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 442. Elaboración propia.

Figura 13. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña. (Hoek y Bray, 1981).

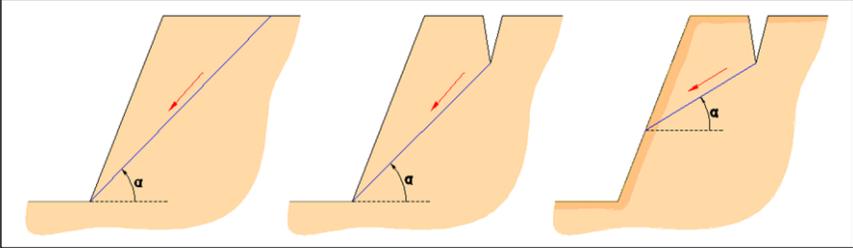
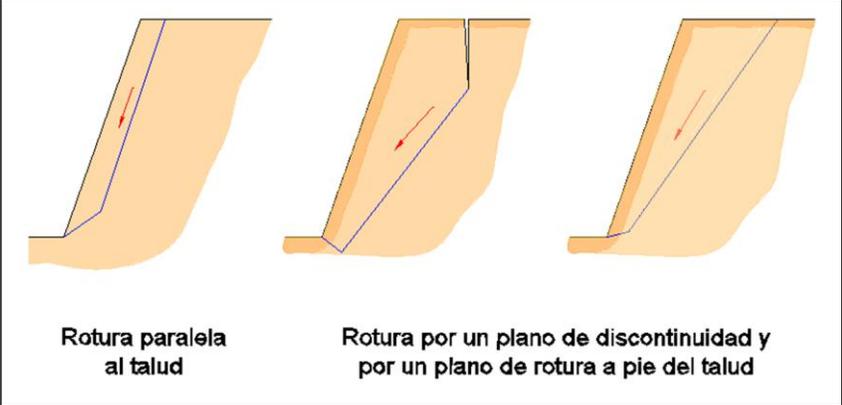


Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 441.

De acuerdo a González de Vallejo<sup>13</sup>, La rotura plana se puede considerar de dos tipos, como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 4), ya sea por rotura en un plano de la cara del talud (Figura 14), o por rotura en un plano paralelo a la cara del talud (Figura 15):

<sup>13</sup> GONZÁLEZ DE VALLEJO, Óp. cit., p. 442.

Tabla 4. Tipos de rotura plana.

TIPO	REPRESENTACIÓN
<p>Rotura por un plano en la cara o el pie del talud, con o sin grieta de tracción.</p>	<p>Figura 14. Rotura por un plano en la cara del talud.</p> 
<p>Rotura por un plano paralelo a la cara del talud; erosión o pérdida de resistencia del pie.</p>	<p>Figura 15. Rotura paralela al talud. Rotura por pérdida de resistencia del pie.</p>  <p>Rotura paralela al talud      Rotura por un plano de discontinuidad y por un plano de rotura a pie del talud</p>

Fuente: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p.

442.

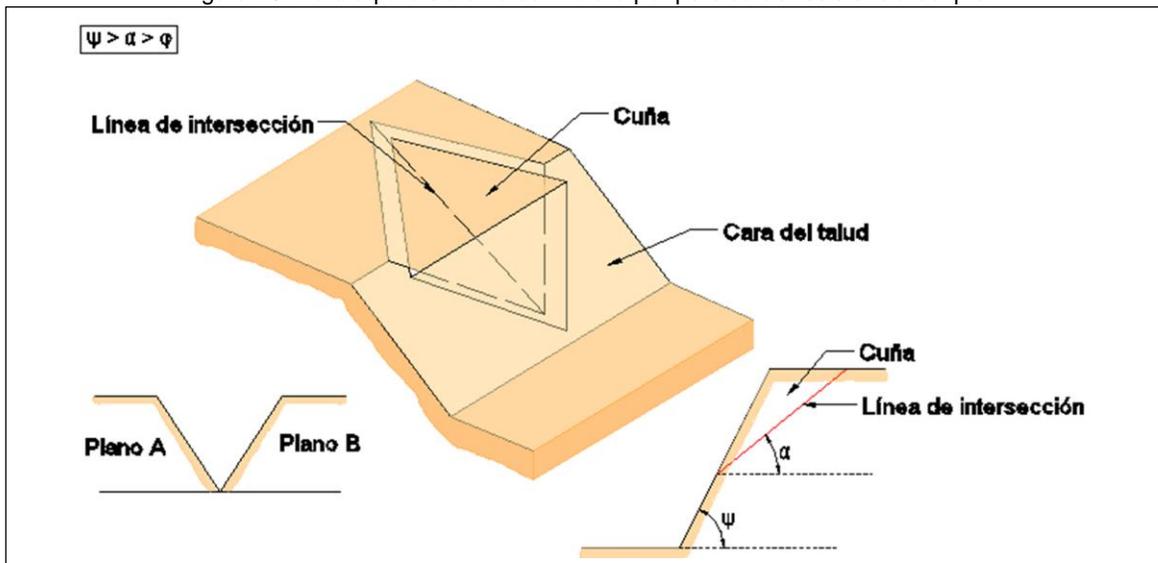
### 2.2.3.2. Rotura en cuña

De acuerdo a González de Vallejo<sup>14</sup>, corresponde a un deslizamiento formado por dos planos de discontinuidad, en dirección de su línea de intersección. Se cumple cuando los dos planos afloran en la superficie del talud, cumpliéndose lo siguiente:

$$\psi > \beta > \phi$$

Donde:  $\psi$  corresponde al ángulo de inclinación del talud o buzamiento del talud,  $\beta$  es el buzamiento de la línea de intersección entre las discontinuidades (no de alguno de los planos), y  $\phi$  es el ángulo de resistencia friccional del material, tal como se esquematiza en la Figura 16.

Figura 16. Rotura paralela al talud. Rotura por pérdida de resistencia del pie.



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 442.

<sup>14</sup> Ibíd., p. 442.

Lo anterior se cumple si se realiza un análisis mecánico, es decir, un análisis de movimiento que además involucre un Factor de seguridad. Para un análisis cinemático no se incluye el valor de  $\phi$ , por lo cual la fórmula se reduce a:

$$\psi > \beta$$

En conclusión, el análisis cinemático de una falla en cuña indica que el buzamiento del talud (o inclinación) debe ser mayor al buzamiento de la línea de intersección entre dos planos de discontinuidad.

Suele presentarse en macizos rocosos con varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado y continuidad determinan la forma y volumen de la cuña. Para fines de diseño, se debe tener en cuenta el mayor volumen del bloque a deslizarse, dado un talud.

De acuerdo al documento de Jairo Espitia<sup>15</sup>, otra condición que debe cumplirse es que el azimut de la intersección tenga una tolerancia de  $20^\circ$  respecto al rumbo del plano del talud, mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_T = \alpha_I \pm 20^\circ$$

Donde:

$\alpha_T$ , corresponde al azimut del plano del talud.

$\alpha_I$ , corresponde al azimut del plano de intersección de discontinuidades.

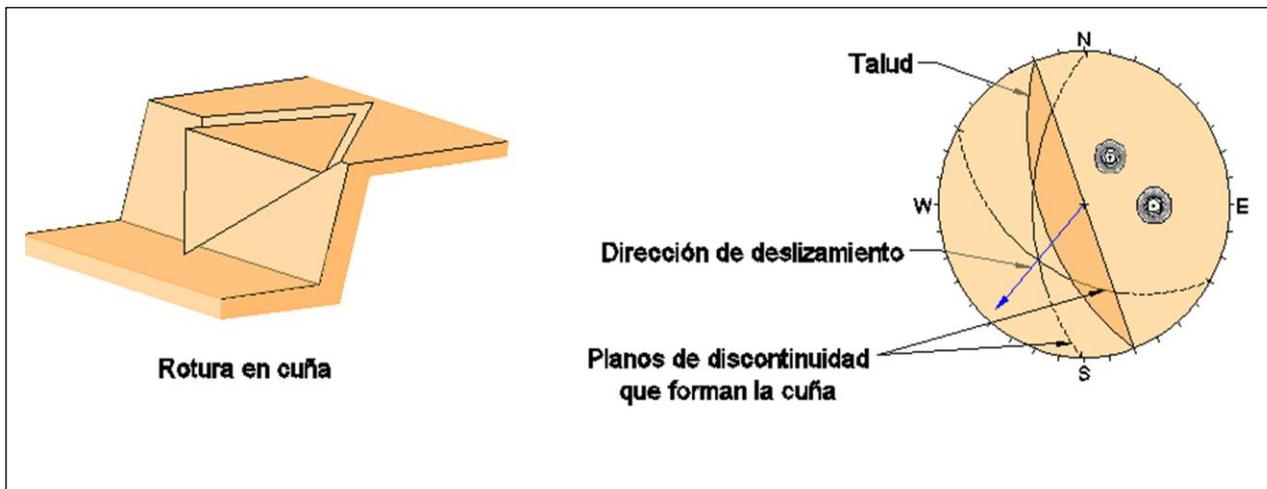
---

<sup>15</sup> ESPITIA, Jairo. Unidad 2. Geología estructural e interpretación de datos. En: Estabilidad de taludes [en línea]. (s.f.). Disponible en < <http://es.slideshare.net/vieri9413/taludes-capitulo-ii>>. [Citado en 25 de octubre de 2014], p. 60.

Incluso, dados los dos planos de discontinuidad, se pueden sectorizar las fallas planares producidas y la falla en cuña producto de la intersección entre los planos, en un mismo diagrama.

En la Figura 17 puede apreciarse un ejemplo de rotura en cuña, así como su representación estereográfica.

Figura 17. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña. (Hoek y Bray, 1981).



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 441.

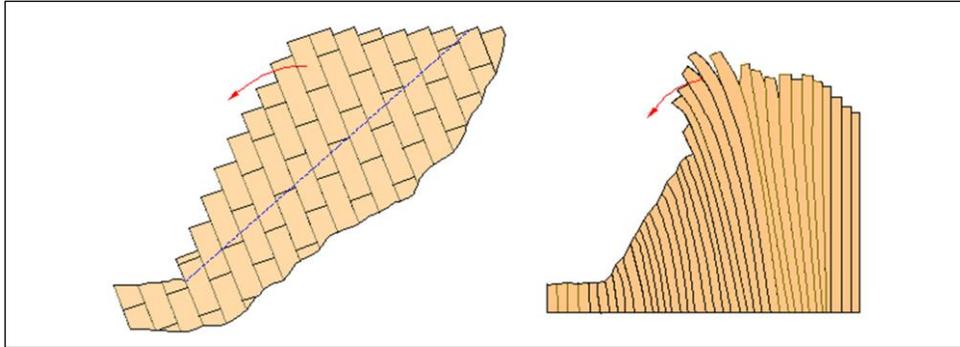
### 2.2.3.3. Rotura por volteo

De acuerdo a González de Vallejo<sup>16</sup>, este mecanismo de falla se presenta cuando las discontinuidades están buzando en sentido contrario a la inclinación del talud, y en dirección paralela al mismo. Tal como se aprecia en Figura 18, los estratos aparecen fracturados en bloques a favor de discontinuidades ortogonales entre sí.

<sup>16</sup> GONZÁLEZ DE VALLEJO, Óp. cit., p. 443.

Implica un movimiento de rotación de los bloques, y su estabilidad no está condicionada por su resistencia al deslizamiento.

Figura 18. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura en cuña. (Hoek y Bray, 1981). (González de Vallejo, 2002, p. 441)



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 443.

Según el documento de Espitia<sup>17</sup>, otras condiciones que deben cumplirse con las siguientes: el buzamiento del talud y de los planos de discontinuidad, debe ser mayores a 65°. De forma convencional, el buzamiento de los planos de discontinuidad debe ser mayor a 70° y el del talud mayor a 60°.

Las discontinuidades deben tener buzamiento contrario al plano del talud, es decir, azimuts de buzamiento que se diferencian cerca de 180°, con rumbos paralelos o subparalelos de los planos de discontinuidad a una tolerancia de 30°. La condición descrita puede resumirse así:

---

<sup>17</sup> ESPITIA, Jairo, Óp. Cit., p. 45.

$$\alpha_T + 180^\circ = \alpha_D \pm 30^\circ$$

$$\beta_D > 70^\circ; \quad \beta_T > 60^\circ$$

Donde:

$\alpha_T$ , corresponde al azimut del plano del talud.

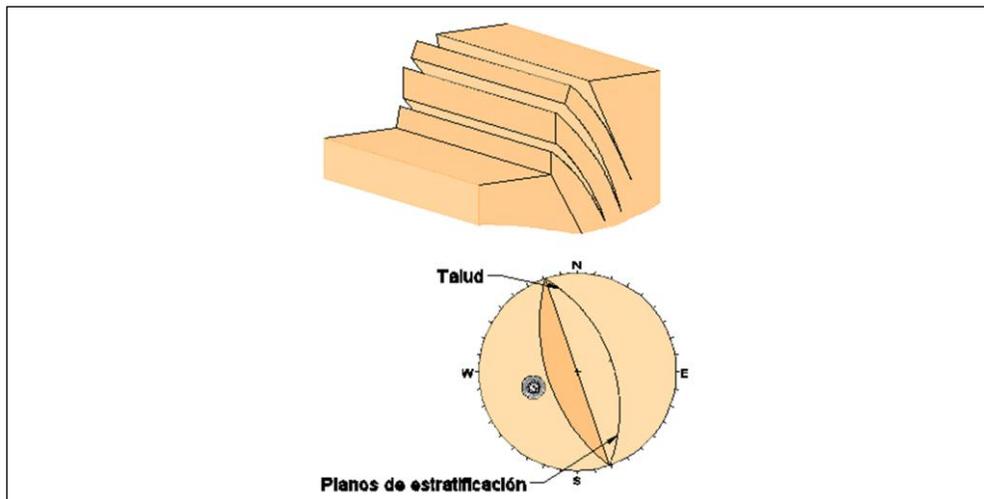
$\alpha_D$ , corresponde al azimut de los planos de discontinuidad<sup>18</sup>.

$\beta_D$ , corresponde al buzamiento de la discontinuidad.

$\beta_T$ , corresponde al buzamiento del talud.

En la Figura 19 puede ilustrarse un ejemplo de rotura por volteo, así como su representación estereográfica.

Figura 19. Representación estereográfica de los planos de discontinuidad con respecto a la orientación del talud para rotura por vuelco. (Hoek y Bray, 1981).



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de: GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002, p. 441.

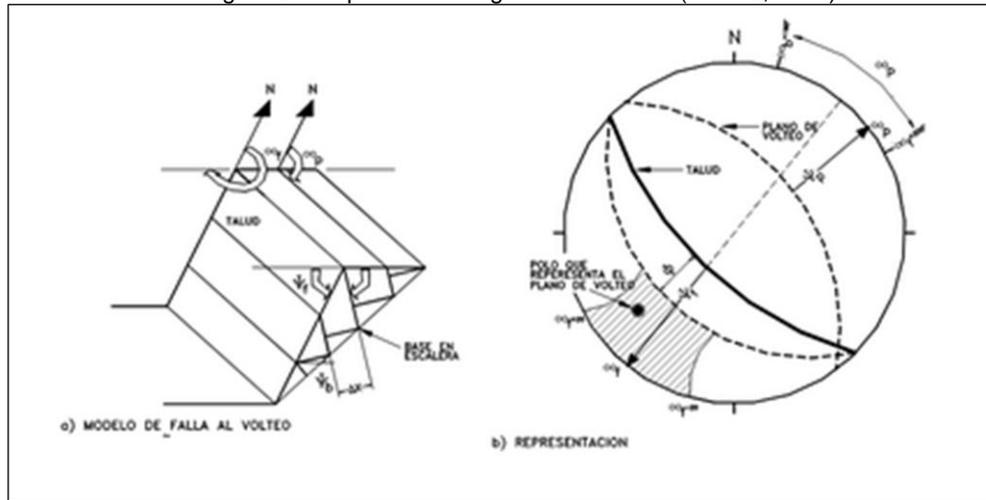
<sup>18</sup> *Ibíd.*, p. 46.

ESPITIA, Jairo. Unidad 2. Geología estructural e interpretación de datos. *En*: Estabilidad de taludes [en línea]. (s.f.). Disponible en < <http://es.slideshare.net/vieri9413/taludes-capitulo-ii>>. [Citado en 25 de octubre de 2014], p. 60.

Según Suárez (1988), el análisis cinemático de volteo requiere que para que ocurra, se presenten las siguientes condiciones:

- a. El rumbo de la familia de discontinuidad debe ser aproximadamente paralelo a la superficie del talud. En ningún caso la diferencia debe ser superior a 20°.

Figura 20. Representación gráfica de volteo. (Suárez, 1988).



- b. El buzamiento debe cumplir con la siguiente condición:

$$90 - \beta_D \leq \beta_T - \phi$$

Donde:

$\beta_D$ , corresponde al buzamiento de la discontinuidad.

$\beta_T$ , corresponde al buzamiento del talud.

$\phi$ , corresponde al ángulo de fricción entre planos.

## **2.3. MARCO LEGAL**

De acuerdo al problema de investigación, siendo el diseño de un programa que modele macizos rocosos con presencia de discontinuidades, la parte legal se centra en:

- Propiedad intelectual del programa que se va a desarrollar.
- Código de Ética del Ingeniero, que es una normativa transversal que rige, no sólo durante el desarrollo de la Investigación, sino en una etapa posterior, conocida como “etapa de mejoramiento” , en pro de obtener los mejores resultados.

### **2.3.1. Propiedad intelectual**

Tal como lo afirma la Dirección Nacional de Derechos de Autor:<sup>19</sup>

“El Derecho de Autor es una especie dentro de la institución de la propiedad intelectual, en virtud de la cual se otorga protección a las creaciones expresadas a través de los géneros literario o artístico, tiene por objeto las creaciones o manifestaciones del espíritu expresadas de manera que puedan ser percibidas, y nace con la obra sin que para ello se requiera formalidad alguna”.

En el caso del Software, la legislación colombiana lo asimila al registro de una obra literaria, permitiendo que el código fuente esté cubierto por la ley de Derechos de Autor.

---

<sup>19</sup> DIRECCIÓN NACIONAL DE DERECHOS DE AUTOR. El Derecho de autor. [en línea]. (s.f.). <http://www.propiedadintelectualcolombia.com/Site/LinkClick.aspx?fileticket=yDsveWsCdGE%3D&tabid=99>. [citado en 3 de mayo de 2014]. p. 3.

De igual manera, la Dirección Nacional de Derechos de Autor<sup>20</sup> expresa el marco normativo de propiedad intelectual:

- Constitución Política, en su Art. 61: “El Estado protegerá la propiedad intelectual por el tiempo y mediante las formalidades que establezca la ley”.
- Ley 23 de 1982, contiene las disposiciones generales y especiales que regulan la protección del derecho de autor en Colombia. El Art. 21 establece que: “*el plazo de protección de los derechos de autor, aplicable: la vida del autor y ochenta años después de su muerte*”.
- Decreto 460 de 1995, que reglamenta el Registro Nacional de Derecho de Autor. Cobra importancia el Art. 23, sobre software y base de datos.

Como se indicaba anteriormente, el Decreto 460 de 1995<sup>21</sup> establece el depósito legal de software y base de datos, en su Art. 22, ítem g:

“Archivo de datos legibles por máquina: cuerpo de información codificado por métodos que requieren el uso de una máquina (típicamente una computadora) para el procesamiento. Pertenecen a esta categoría: archivos almacenados en cinta magnética, módulos de disco, tarjetas de marca sensible, documentos fuente en caracteres de reconocimiento óptico. El término de datos legibles por máquina, se refiere tanto a los datos almacenados en forma legible por máquina como a los programas usados para procesar esos datos”.

Se espera no sólo la implantación del programa, sino su posterior mejoramiento, para brindar asesoría a estudiantes y empresas en términos de su correcto uso.

---

<sup>20</sup> *Ibíd.*, p. 2.

<sup>21</sup> DECRETO 460 DE 1995. Reglamentación del Registro Nacional de Derecho de Autor y se regula el depósito legal. En: Cap. 3, Depósito legal. [en línea]. [http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file\\_id=126035](http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file_id=126035). [citado en 3 de mayo de 2014]. p. 7.

### 2.3.2. Código de Ética del Ingeniero

Como se indicó al principio, los preceptos del Código de Ética<sup>22</sup> (Ley 842 de 2003) en sus artículos 29-45, rigen en forma transversal al proyecto, pues sirven no sólo para el presente, sino para regir la profesión en un futuro. No obstante, existe un numeral de artículo que rige para el proyecto (Ver Tabla 5):

Tabla 5. Art. 33, Código de Ética del Ingeniero.

ARTÍCULO	REFERENCIA	OBSERVACIONES
Art. 33 (Deberes especiales para con la sociedad)	g. Ofrecer desinteresadamente sus servicios profesionales en caso de calamidad pública. En otros términos, cuando sea requerido.	El programa no sólo se somete a derechos de autor. Se contempla, posterior a su diseño e implementación, asesorías tanto a particulares como a empresa, que conlleven a una expansión y mayor reconocimiento.

Fuente: Elaboración propia.

<sup>22</sup> COPNIA. Código de Ética Profesional. En: Art. 33. [en línea]. <  
[http://www.copnia.gov.co/codigo\\_de\\_Etica\\_profesional-32/](http://www.copnia.gov.co/codigo_de_Etica_profesional-32/)> [citado en 3 de mayo de 2014].

### 3 DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1 Datos básicos

Tabla 6. Datos básicos para el diseño metodológico.

No.	ÍTEM	CARACTERÍSTICA(S)
1	<b>Línea y sublínea de investigación</b>	Línea: Geotecnia para el desarrollo de la infraestructura física regional y sostenible y la calidad de vida: GGIR-UGC.
		Sublínea: Riesgos geotécnicos
2	<b>Enfoque</b>	Cuantitativo
3	<b>Tipo de investigación</b>	Descriptiva-explicativa
4	<b>Población</b>	No aplica
5	<b>Variables:</b> No se trabaja con poblaciones, pero existen variables propias del estudio geotécnico.	Independientes:  Propiedades de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso, en especial su orientación. Geometría del talud: altura (h) e inclinación (m) del talud en roca.
		Dependientes: Sectorización cinemática del macizo rocoso. Mecanismos de falla de un talud.
6	<b>Muestra</b>	No aplica
7	<b>Instrumentos de recolección de información</b>	Notas de campo Formatos adicionales

Fuente: Elaboración propia.

### **3.2 Bosquejo**

El proyecto a desarrollar titula “Sectorización cinemática de macizos rocosos, con comportamiento dominado por estructuras de discontinuidad”. Está bajo la línea de investigación “Geotecnia para el desarrollo de la infraestructura física regional y sostenible y la calidad de vida”, y su correspondiente sublínea es “Riesgos geotécnicos”.

Su enfoque es cuantitativo, ya que se recolectan datos en notas de campo y formatos autónomos (ante todo por mediciones numéricas). Igualmente, el punto de partida son teorías existentes como: sectorización cinemática y bloque crítico. El programa a diseñar pretende: comparar resultados con otros programas especializados en suelo y taludes, y complementar el conocimiento existente como punto de partida.

El tipo de investigación es descriptiva-explicativa. Dado que el objetivo general es diseñar, de este modo se parte de conceptos de geología estructural (manejo de redes estereográficas y orientación de discontinuidades) para luego analizar el mecanismo de falla existente en determinado macizo rocoso; en lo posible, también definir medidas de mitigación ante un escenario de inestabilidad.

Por el enfoque cuantitativo, la investigación no requiere de población ni de muestra (tanto personas como materiales).

Básicamente, se consideran para el diseño del programa 2 variables independientes (orientación de discontinuidades y geometría del talud) y 2 variables dependientes (mecanismo de falla y sectorización cinemática). No se trata de variables relacionadas con poblaciones y muestras, pero sí propias de geología estructural.

La correspondiente operacionalización de variables se presenta en la Tabla 7:

Tabla 7. Operacionalización de variables independientes y dependientes.

	<b>VARIABLE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>MEDIDA(S)</b>
<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>	<b>Orientación de las discontinuidades</b>	La orientación de la discontinuidad se define por dos parámetros, el azimut de buzamiento y el buzamiento, que afectan la estabilidad de un macizo rocoso.	Grados sexagesimales
<b>VARIABLES DEPENDIENTES</b>	<b>Mecanismos de falla de un talud</b>	Se establece por una serie de condicionales comparando la inclinación del talud con la orientación de la discontinuidad, entre: Planar, cuña, volteo.	Adimensional: El programa arroja un valor textual
	<b>Sectorización cinemática del macizo rocoso</b>	Análisis de los planos de discontinuidad para identificar los mecanismos potenciales de falla en un macizo rocoso dado: Planar, cuña y volteo.	Adimensional: El programa a desarrollar arroja un valor textual

Los instrumentos de recolección de datos son cuantitativos, referidos a notas de campo y formatos adicionales de toma de datos.

Dado que se asumen 3 objetivos específicos, igualmente se asumen 3 fases: acercamiento, adaptación, códigos finales y finalización. La primera, referida a programación y formulación iniciales. La segunda, referente a la escritura y compilación sobre sectorización cinemática. La tercera, referida a la aplicación de bloque crítico. Todo se consolida en la Tabla 8.

Tabla 8. Fases de investigación del proyecto de investigación en desarrollo.

OBJETIVO ESPECÍFICO	FASE	GENERALIDADES
Desarrollar una herramienta computacional para la comprensión de los mecanismos de falla de macizos rocosos, aplicado a taludes.	Acercamiento	Inducción a programación. Formulación de la red estereográfica y de los mecanismos de falla.
Establecer un código para la identificación de sectores cinemáticamente inestables.	Sectorización	Profundización sectorización cinemática.
Reducir la incertidumbre asociada a la sectorización cinemática de macizos rocosos, en cuanto a metodologías adoptadas en la práctica.	Reducción de incertidumbre	Códigos asociados a problemas de la práctica.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se describen las fases de investigación, en detalle:

**Acercamiento:**

La fase de acercamiento se divide en dos etapas: inducción a programación y formulación inicial. La inducción a programación es el reconocimiento del lenguaje de programación, reconocer las variables de entrada y las maneras de compilar y “correr el programa” para que se ajuste a códigos sencillos.

Por su parte, la formulación inicial corresponde a la aplicación del álgebra, geometría y trigonometría para la red estereográfica; ésta es una circunferencia de radio arbitrario, y a partir de allí pueden establecerse coordenadas y variables auxiliares para dibujar redes estereográficas (pasar de una red en papel a representaciones por computadora). Así mismo, se programan las ecuaciones de cada mecanismo de falla para que, por medio de condicionales, el programa determine si se presenta algún mecanismo de falla o no se presenta ninguno.

**Bloque crítico:**

Se programa tanto gráfica como analíticamente las ecuaciones correspondientes, para luego determinar los sectores de cada mecanismo de falla.

**Reducción de incertidumbre:**

Se estructura el código de programación referente a sectorización cinemática y se prueba el programa con datos de práctica. Coincide con la finalización del programa.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, se hace un recuento de los resultados, según las fases consideradas en la investigación.

### 4.1 Metodología

En primer lugar, se establece la metodología para obtenerlos, por medio de diagramas de casos de uso y diagrama de flujo.

- Diagrama de casos de uso.
- Diagrama de flujo del desarrollo del programa.

#### 4.1.1 Diagrama de casos de uso

Corresponde a una esquematización de las actividades durante un proceso; básicamente se utiliza para resumir quién o quienes utilizan una aplicación o sistema (denominados actores), qué se hace para interactuar con el sistema y, por último, la respuesta que éste genera.

Para el proyecto, se generan dos casos de uso, más uno general:

- Ingreso de familias de discontinuidad (ver Tabla 9 y Figura 21. Diagrama de caso de uso para la tarea "Ingreso de familias".)
- Análisis cinemático (ver Tabla 10 y Figura 22)
- Programa en general (ver Figura 23)

Tabla 9. Información para el caso de uso "Ingreso de familias".

<b>Nombre del caso de Uso</b>	<u>INGRESAR FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES</u>
<b>Descripción</b>	De acuerdo al análisis previo realizado por el usuario con ayuda de un programa auxiliar que las determine, las orientaciones de las tres familias se ingresan como datos de entrada a ACMR.exe
<b>Actores</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Datos iniciales que deben ingresarse al programa.</u></li> <li>2. <u>Respuesta gráfica del programa.</u></li> </ol>
<b>Objetivos Asociados</b>	Brindar datos de orientación de un talud en roca y 3 familias de discontinuidades, en pro del correspondiente análisis para determinar las familias sectorizadas.
<b>Datos Específicos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>Datos iniciales:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>En un formulario se pide al usuario que ingrese directamente el Azimut de Buzamiento o sea calculado sobre datos de rumbos.</u></li> <li>• <u>De igual modo debe ingresar el Buzamiento de cada una de las familias.</u></li> </ul> </li> <li>2. <u>Respuesta del programa:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Representación estereográfica de los planos de falla.</u></li> </ul> </li> </ol>
<b>Comentarios</b>	<p>Tener precaución con sus valores de frontera y sus signos.</p> <p>Tener precaución al ingresar los valores, deben estar redondeados sin decimales.</p>

Fuente: Elaboración propia.

DIAGRAMA DE CASO DE USO  
INGRESAR FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES

Figura 21. Diagrama de caso de uso para la tarea "Ingreso de familias".

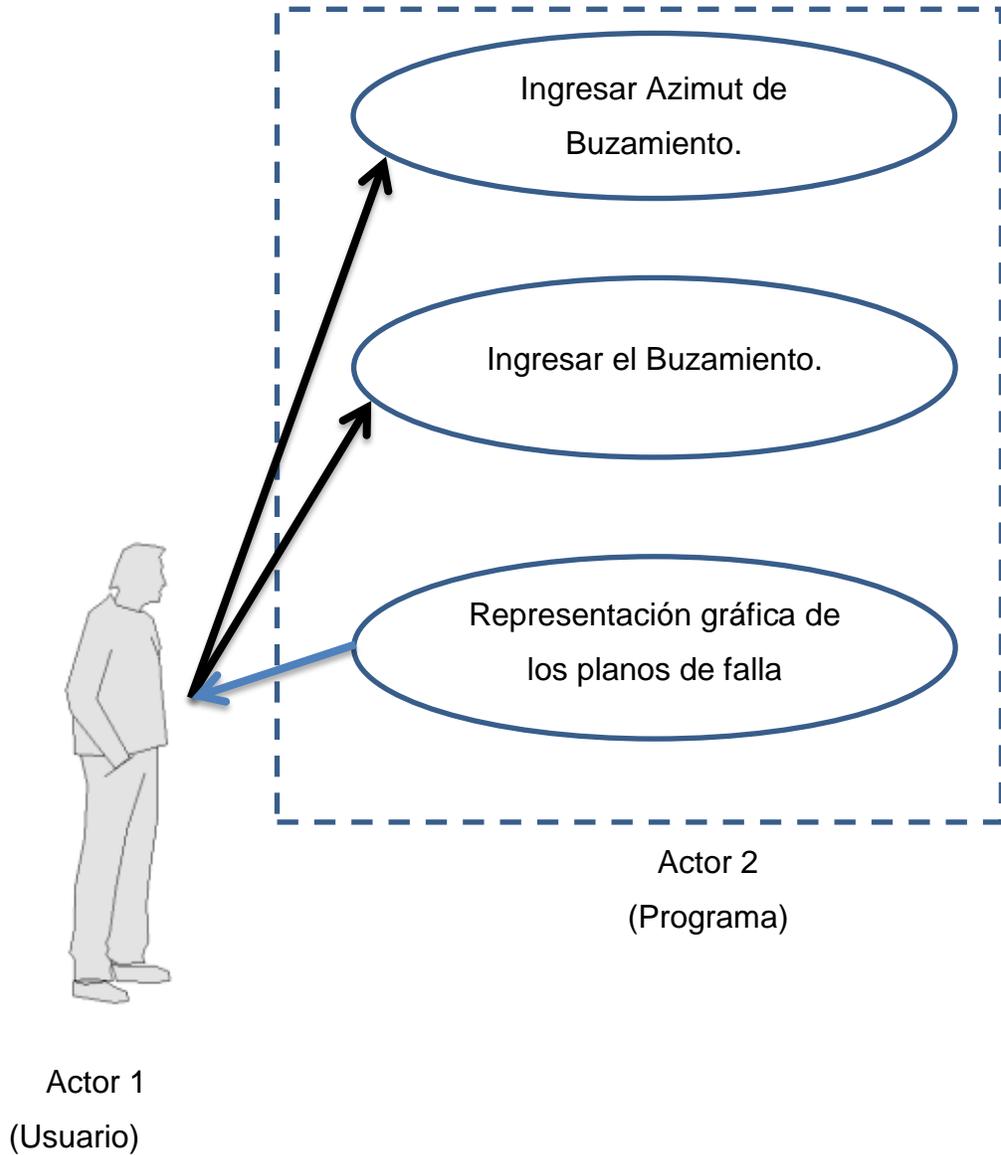
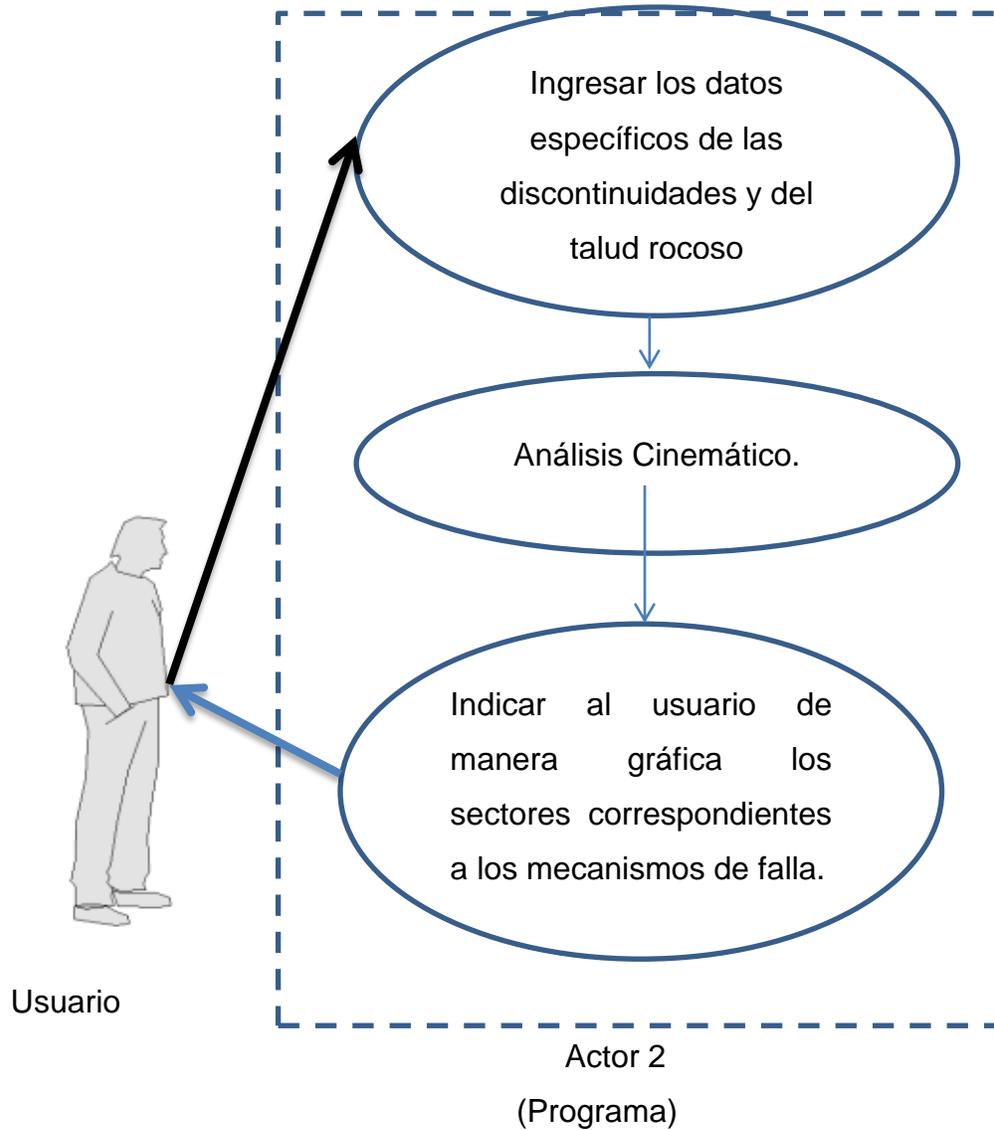


Tabla 10. Información para el caso de uso "Análisis cinemático".

<b>Nombre del caso de Uso</b>	<u>ANÁLISIS CINEMATICO</u>
<b>Descripción</b>	Gráficamente el programa muestra la sectorización cinemática de cada uno de los mecanismos de falla, los cuales deben interpretados de acuerdo a la información consignada del manual.
<b>Actores</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>En área 3 el usuario debe hacer click en cada uno de los botones discriminando cada uno de los mecanismos.</u></li> <li>2. <u>Muestra gráficamente los sectores correspondientes a cada mecanismo de falla.</u></li> </ol>
<b>Objetivos Asociados</b>	Evaluar la estabilidad cinemática del macizo rocoso dependiendo del polo del talud y la ubicación de los sectores.
<b>Datos Específicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <u>Azimut de Buzamiento</u></li> <li>• <u>Buzamiento</u></li> <li>• <u>Ángulo de fricción</u></li> </ul>
<b>Comentarios</b>	<p>Se debe tener en cuenta que el usuario ingresa a ACMR.exe 4 familias de discontinuidad, en representación de numerosos planos.</p> <p>La resistencia de un talud rocoso disminuye con la presencia de numerosas discontinuidades y eso sumado a las condiciones propias del intemperismo, la hidrogeología y los estados de esfuerzos, que no se tienen en cuenta en el análisis cinemático. En virtud de lo anterior, el usuario debe ingresar valores no mayores a 25°, que es el valor predominante de calidad "media". Esto como consideración especial para evaluar el mecanismo de falla por volteo.</p>

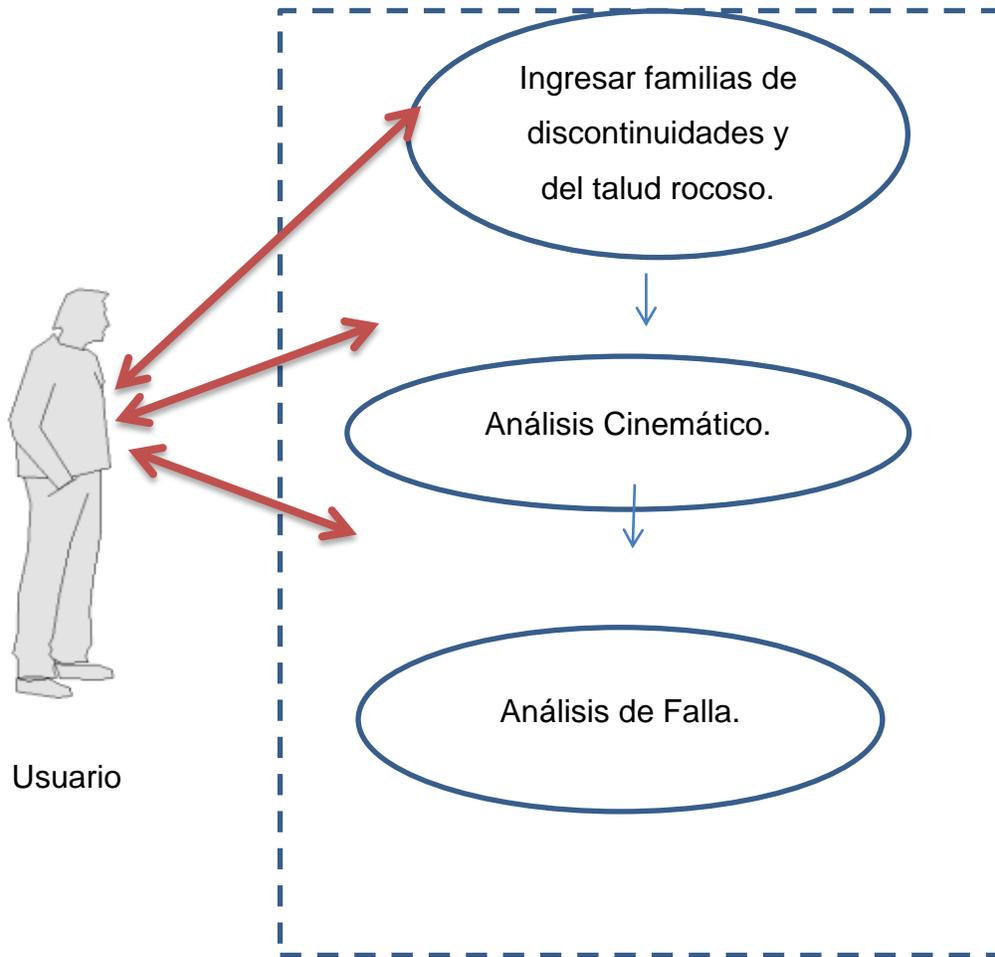
## DIAGRAMA DE CASO DE USO ANÁLISIS CINEMÁTICO

Figura 22. Diagrama de caso de uso para la tarea "Análisis cinemático".



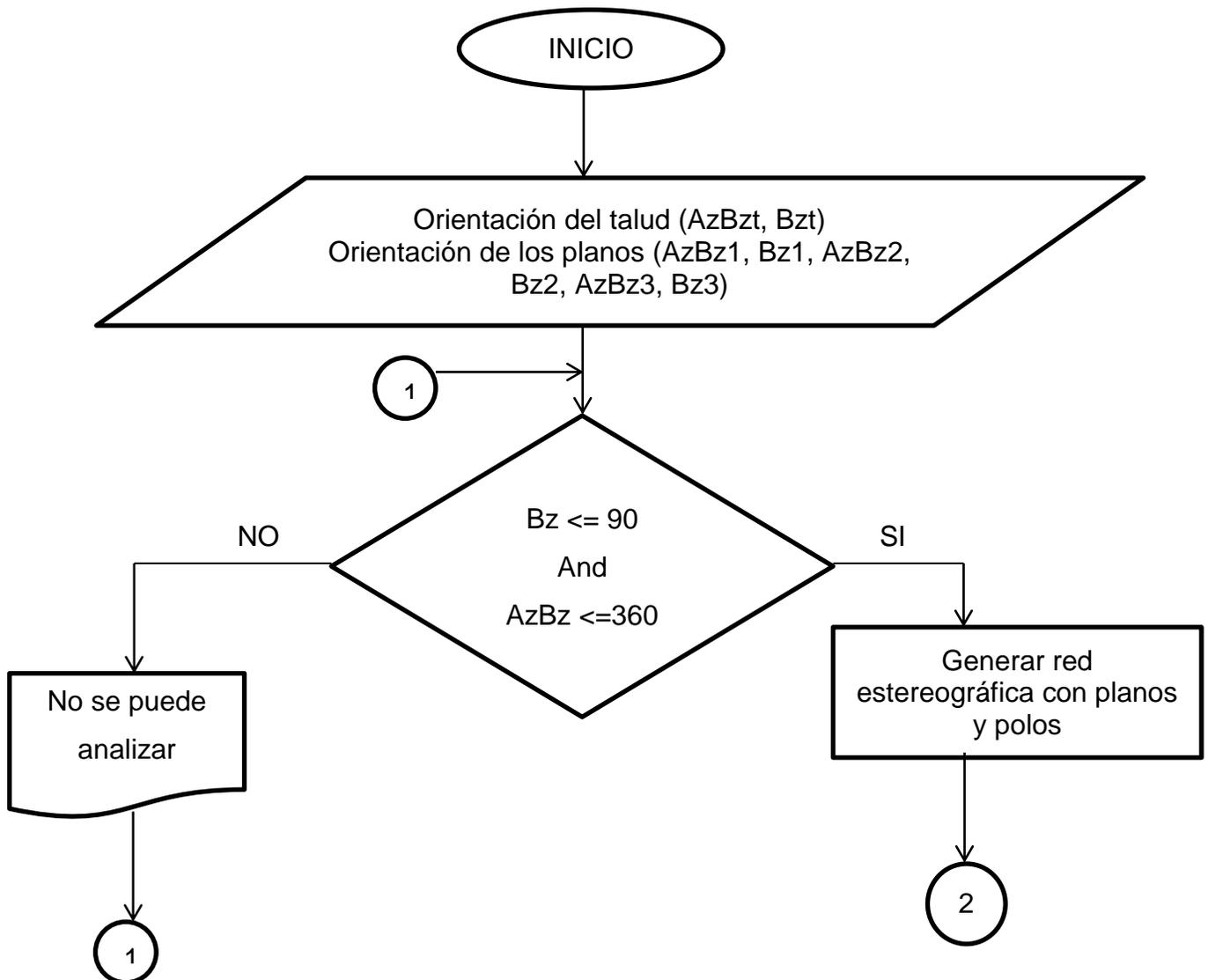
# DIAGRAMA DE CASO DE USO PROGRAMA EN GENERAL

Figura 23. Diagrama caso de uso para el programa en general.



#### 4.1.2 Diagrama de flujo del programa

Verificación inicial (1): Las medidas de orientación no se pueden ingresar precedidas de (-); además, los azimuts de buzamiento no superan los 360° y los buzamientos no superan los 90°.

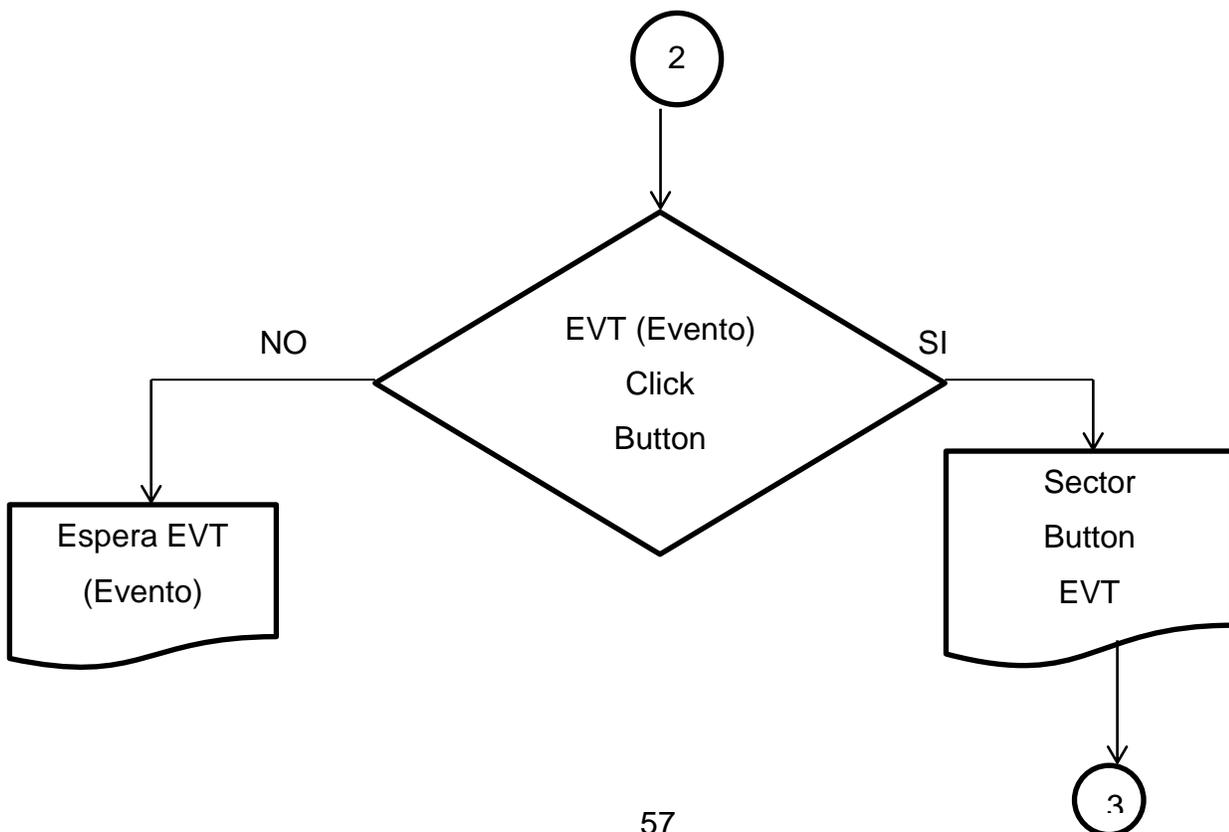


Eventos por botón (2):

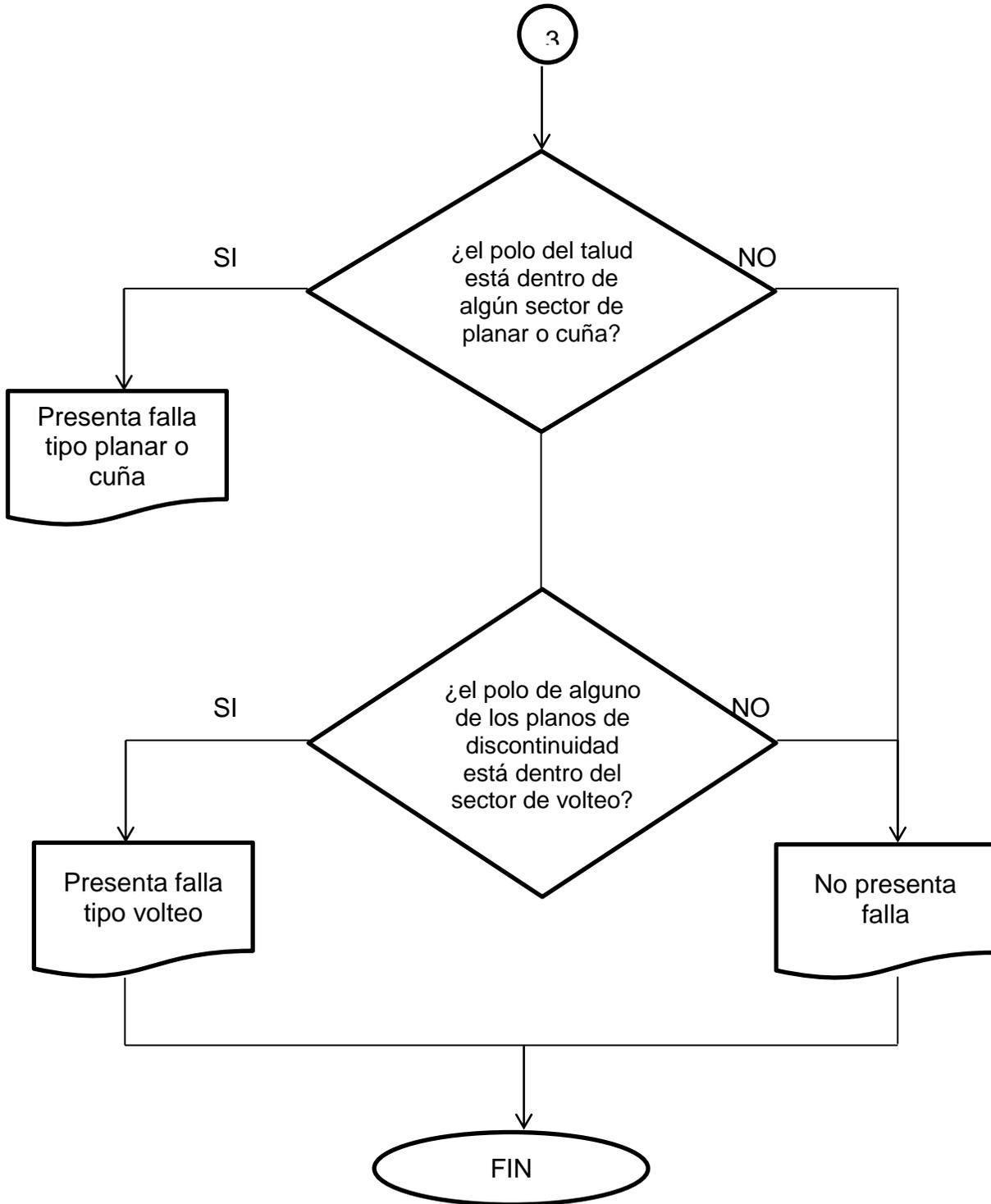
Se repite cada evento por botón señalado por el usuario, de acuerdo a la Tabla 11.

Tabla 11. Eventos por botón considerados en el programa.

CODIFICACIÓN	INDICACIÓN
Button "1"	Sector planar 1
Button "2"	Sector planar 2
Button "3"	Sector planar 3
Button "1 y 2"	Sector cuña entre planos 1 y 2
Button "1 y 3"	Sector cuña entre planos 1 y 3
Button "2 y 3"	Sector cuña entre planos 2 y 3
Button "Talud"	Sector volteo



Interpretación del usuario (Las impresiones no las genera el programa, son conclusiones del usuario).



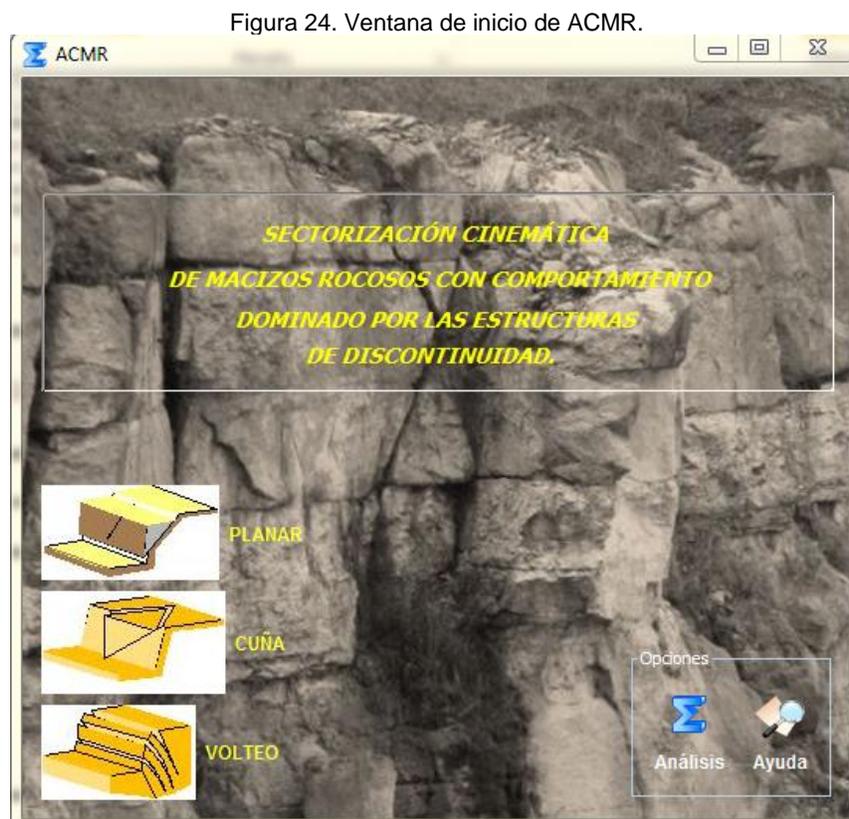
## 4.2 Resultados por fases

En este apartado, se hace un recuento de los resultados preliminares obtenidos en el momento, según las fases consideradas en la investigación.

En este paso podrá conocer todos los componentes y funcionalidad del programa, paralelo a una prueba de escritorio.

### 4.2.1 Ventana de inicio

Al ejecutar el programa, podrá apreciar la siguiente ventana de inicio, como se muestra en la Figura 24.



Consta de:

- Barra de título (ACMR, acompañado de su logo, una sumatoria)
- Su objetivo: Sectorizar cinemáticamente macizos rocosos con comportamiento dominado por estructuras de discontinuidad).
- Imágenes de los mecanismos de falla que aborda (ver parte inferior izquierda).
- Opciones para entrar (ver Tabla 12).

Tabla 12. Botones iniciales del programa.

Análisis	Nos lleva a solicitar los datos de entrada y al proceso.
Ayuda	Allí, el usuario podrá descargar el presente documento y asesorarse del uso del programa, así como resolver sus inquietudes.

#### 4.2.2 Botón de análisis

Al hacer clic en este botón, nos dirige a la ventana principal. Se puede subdividir en: componentes externos y componentes internos.

##### 4.2.2.1 Componentes externos (inherentes):

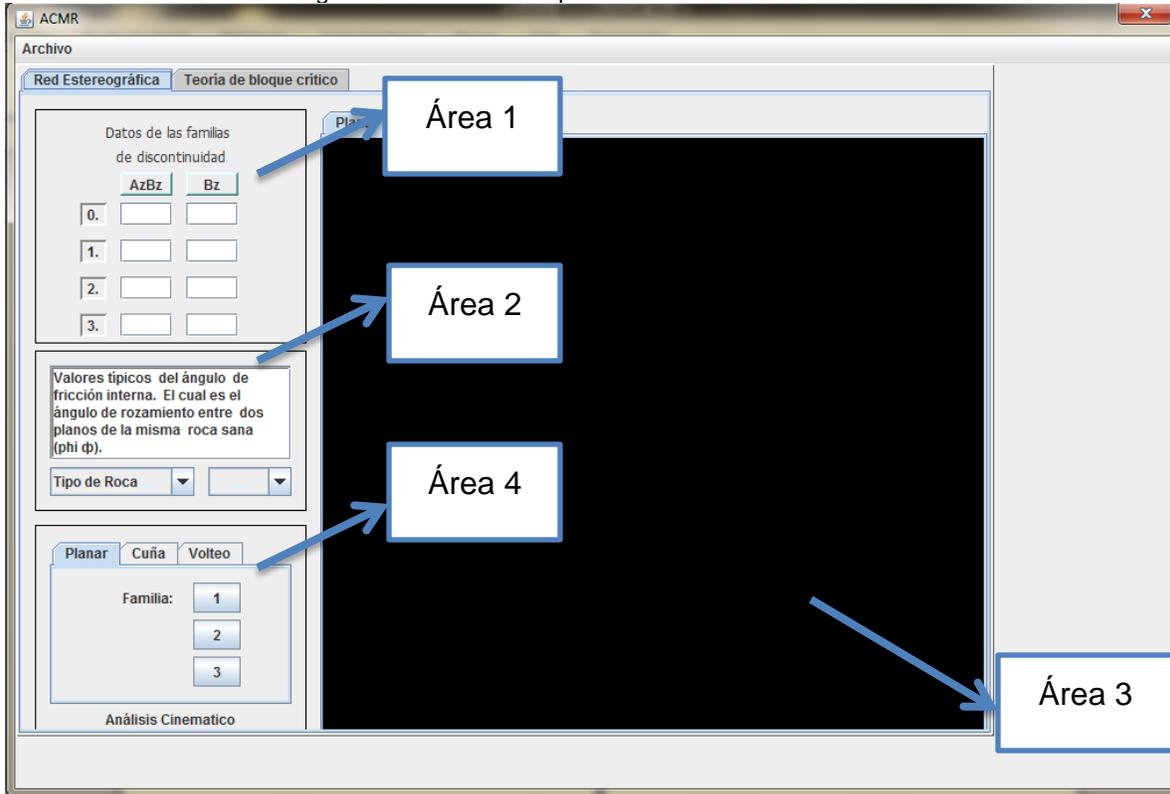
- Barra de título.
- Barra de menú (contiene el Archivo).
- Fichas contextuales (Red estereográfica y bloque crítico)<sup>23</sup>
- Menús contextuales (Planar, cuña, volteo

---

<sup>23</sup> Nota: El programa no cubre Teoría de bloque crítico en su totalidad, sólo puede graficar los planos de discontinuidad como circunferencias completas.

#### 4.2.2.2 Descripción de áreas.

Figura 25. División de la plataforma de ACMR en áreas.



La interfaz de usuario (Figura 25) es abordada por áreas, las cuales se explican a continuación (Tabla 13).

Tabla 13. Descripción de las áreas de la interfaz de usuario.

ÁREA	CORRESPONDE A	DESCRIPCIÓN
1	Ingreso de datos de orientación	El usuario ingresa los datos de orientación del talud y las 3 familias de discontinuidad. Ver restricciones en 2.1
2	Ingreso de valor de $\phi$ <sup>24</sup>	El usuario debe tomar un valor de phi representativo. Se espera que si un talud rocoso está influenciado por numerosas discontinuidades representadas en 4 familias,

		<p>así como condiciones hidrogeológicas, esfuerzos, entre otras (que no se consideran en el programa), este parámetro tendrá un valor bajo.</p> <p>El usuario podrá elegir de la lista desplegable un valor representativo.</p>
3	Esquema gráfico	<p>En esta parte de la pantalla se muestra la red estereográfica, y se adapta a las necesidades del usuario como se apreciará en la prueba de escritorio.</p> <p>Sobre ésta, podrá abrir una ventana diferente para evaluar cada mecanismo de falla por separado.</p> <p>Bajo esquema de colores, se encuentran las convenciones para mejor interpretación de resultados.</p>
4	Controlador de mecanismos de falla	<p>Si el usuario hace clic en todos los botones, podrá apreciar todos los mecanismos de falla posibles dependiendo de los datos ingresados en Área 1.</p> <p>Gráficamente podrá apreciar bajo qué mecanismo de falla, existe inestabilidad en el talud.</p>

Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 Proceso

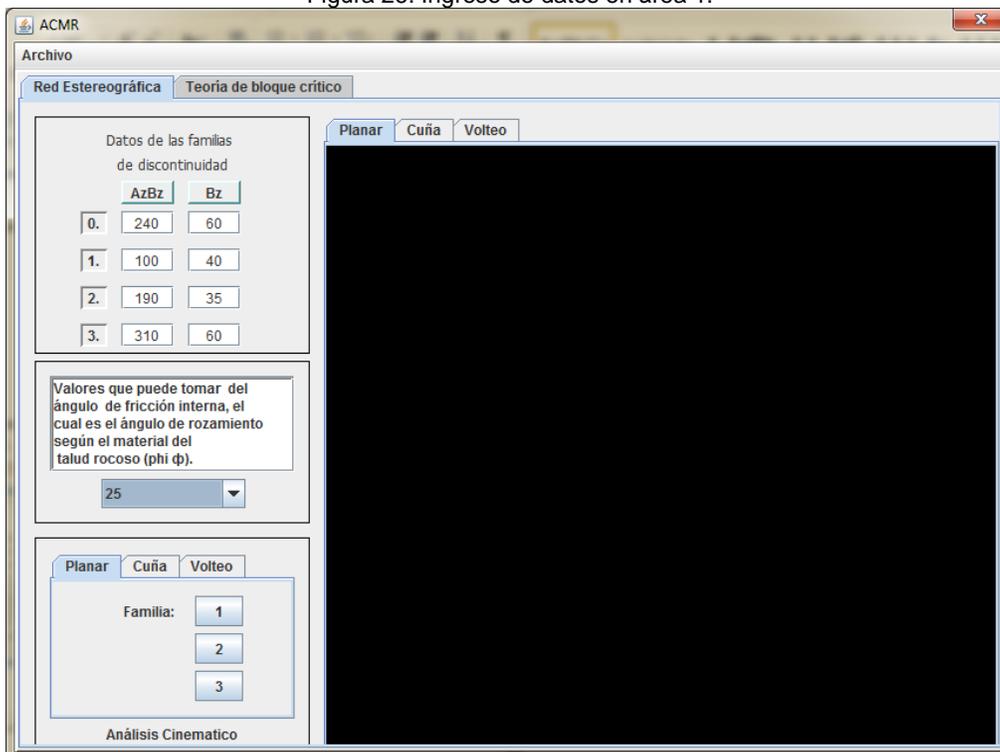
Con los siguientes datos tomados como ejemplo de un talud, se probó esta parte del código (ver Tabla 14).

Tabla 14. Datos de entrada para el área 1, ingreso de datos.

	<b>AzBz</b>	<b>Bz</b>
<b>0.</b> Macizo	240	60
<b>1.</b> Familia 1	100	40
<b>2.</b> Familia 2	190	35
<b>3.</b> Familia 3	310	60

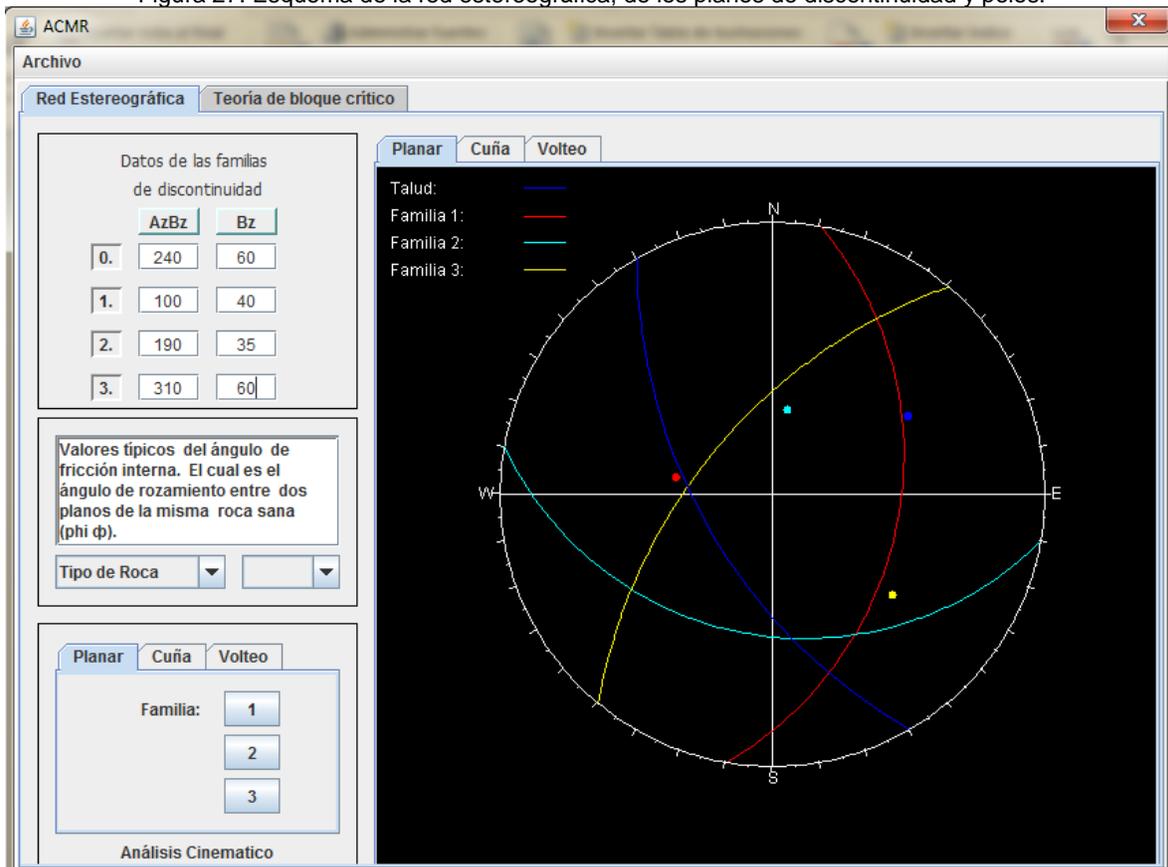
- Hacemos clic en la ficha de Red estereográfica. Se ingresan los datos en área 1, como se aprecia en Figura 26.

Figura 26. Ingreso de datos en área 1.



- b. Por medio de una lista desplegable, podrá elegir el valor del ángulo de fricción interna del material ( $\phi$ ), hasta de  $25^{\circ}$ <sup>25</sup>.
- c. Haga clic en Área 3, para que aparezca la red estereográfica, y los planos del talud y las discontinuidades con sus respectivos polos, como se aprecia en Figura 27.

Figura 27. Esquema de la red estereográfica, de los planos de discontinuidad y polos.



<sup>25</sup> Si por algún motivo tiene calculado o estimado un valor de  $\phi$  mayor a  $25^{\circ}$ , deberá tomarse  $25^{\circ}$  por precaución.

d. Discriminación por cada mecanismo de falla (Área 4)

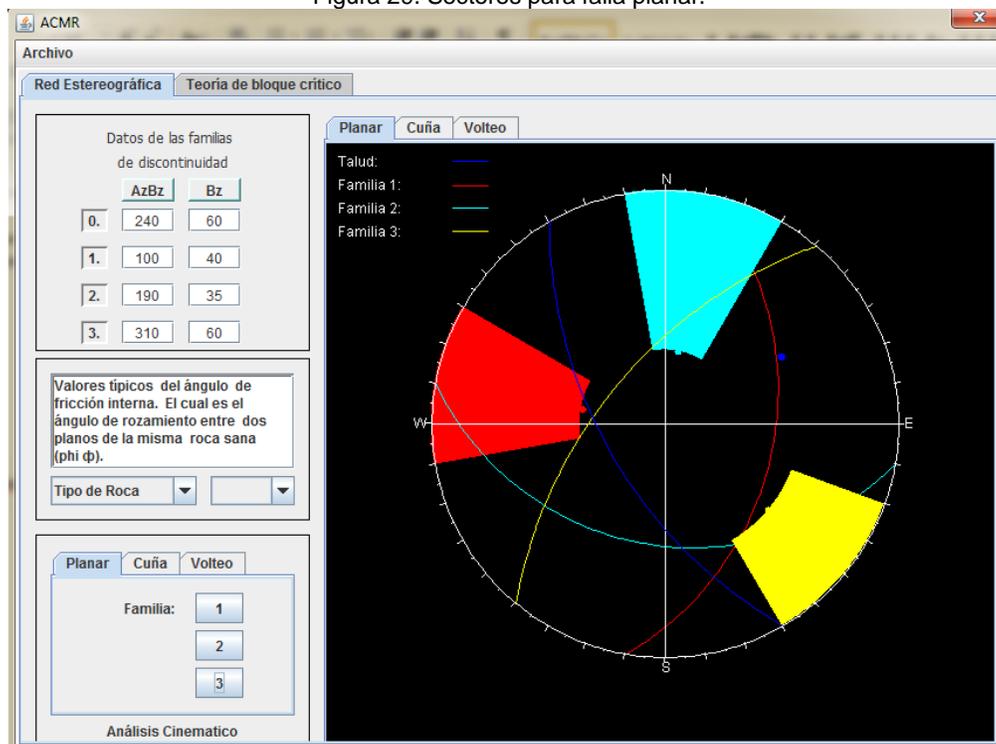
Haga clic en los botones de la parte inferior (Figura 28) para apreciar los sectores correspondientes a cada mecanismo de falla.

Figura 28. Discriminación de los mecanismos de falla por botones.



Para falla planar (ver Figura 29).

Figura 29. Sectores para falla planar.



Los sectores con falla planar se aprecian del mismo color que el plano representativo de la familia de discontinuidad (de acuerdo a las condiciones).

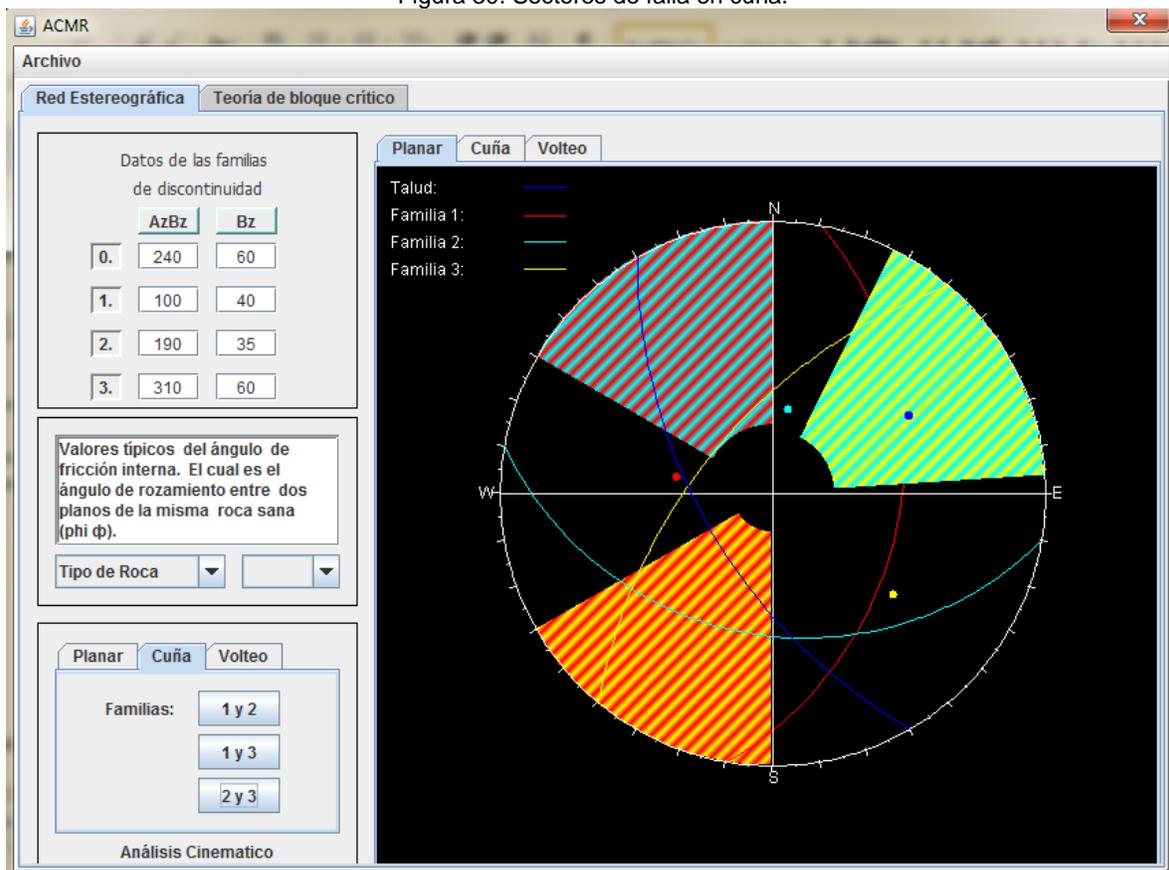
La familia 1, de color rojo, tiene su sector planar de color rojo.

La familia 2, de color azul claro, tiene su sector planar de color azul claro.

La familia 3, de color amarillo, tiene su sector planar de color amarillo.

Para falla en cuña (ver Figura 30).

Figura 30. Sectores de falla en cuña.



Dado que la falla en cuña corresponde a una intersección entre discontinuidades, el color de las franjas se puede apreciar de la siguiente forma (ver Tabla 15):

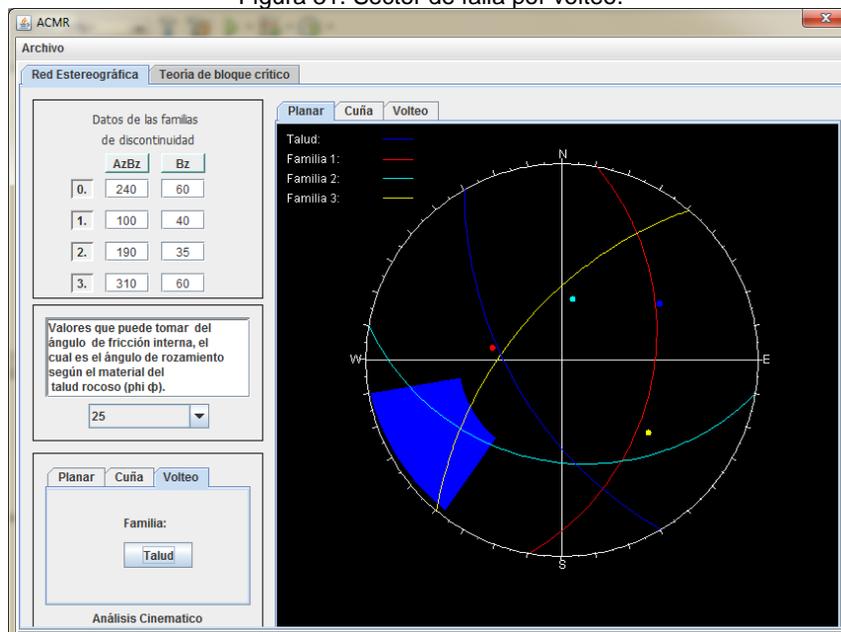
Tabla 15. Convenciones para identificar sectores de cuña.

Combinación	Colores originales	Color de la combinación
1 y 2	1 = Rojo 2 = Azul claro	Líneas intercaladas rojo-azul claro
1 y 3	1 = Rojo 3= Amarillo	Líneas intercaladas rojo-amarillo
2 y 3	2 = Azul claro 3= Amarillo	Líneas intercaladas azul claro-amarillo

Falla por volteo:

Al hacer clic en Volteo, debemos luego hacer clic en Talud, para apreciar el sector (ver Figura 31).

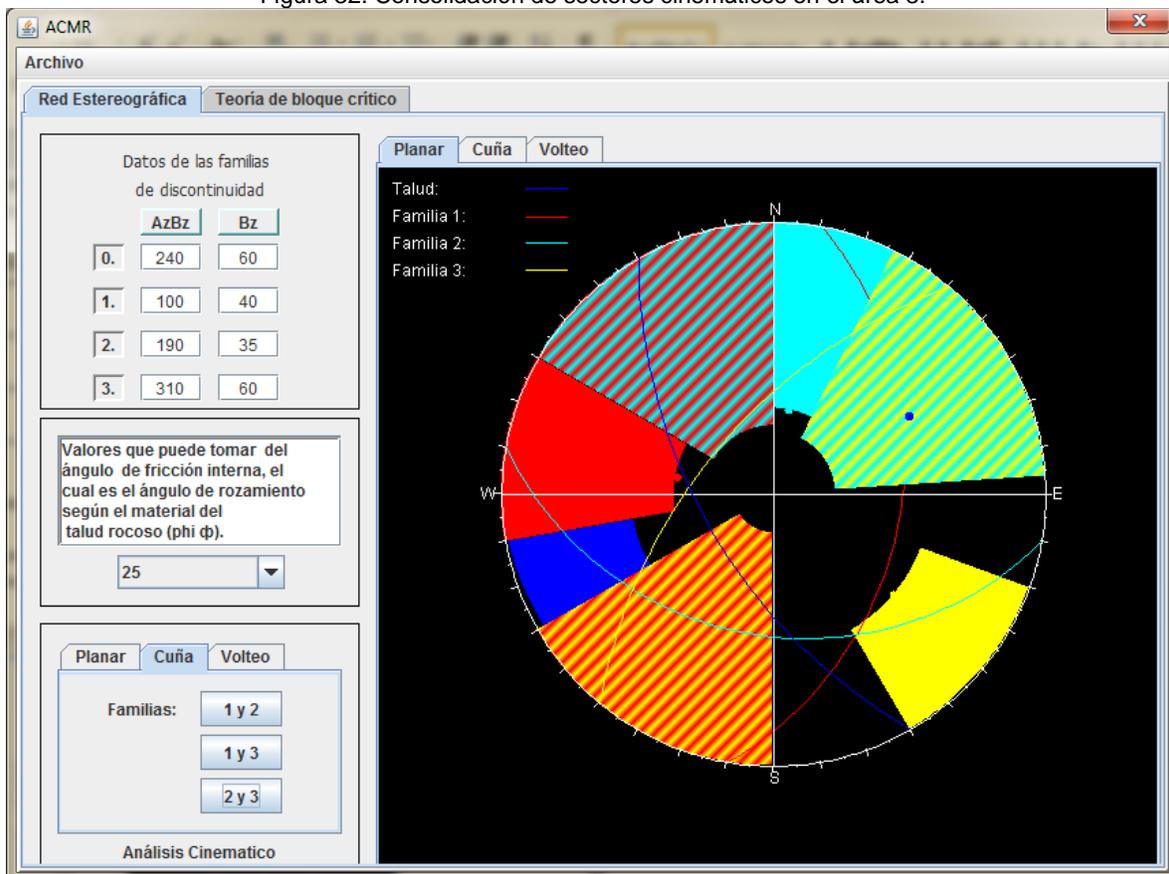
Figura 31. Sector de falla por volteo.



e. Consolidación de sectores

El usuario puede hacer clic en los botones de la parte inferior para apreciar los sectores correspondientes a cada mecanismo de falla. Para comodidad del usuario, podrá hacer clic en: Planar (1, 2, 3), Cuña (1-2, 1-3, 2-3), y Volteo (Talud), al mismo tiempo y apreciar todos los sectores en un solo esquema, como se aprecia en la Figura 32.

Figura 32. Consolidación de sectores cinemáticos en el área 3.

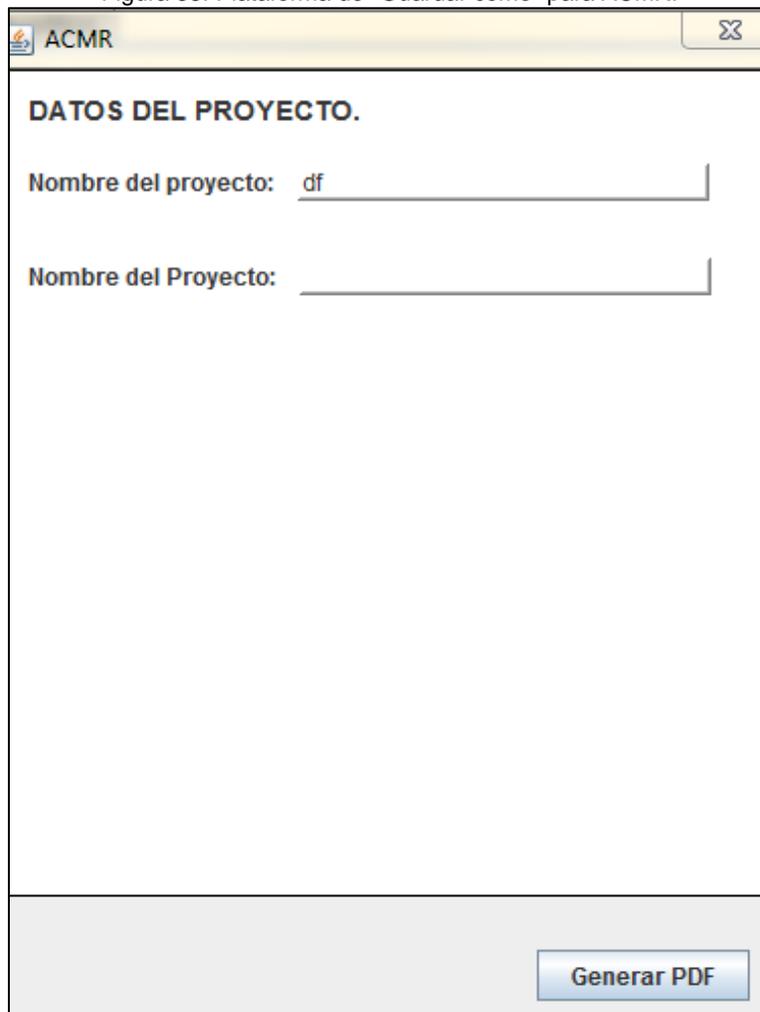


f. Impresión de informe

El usuario podrá hacer clic en el menú Archivo y luego Guardar como.

En la ventana auxiliar de la Figura 33, el programa le pide confirmar el nombre del documento a generar y a continuación, debe hacer clic en Generar PDF.

Figura 33. Plataforma de "Guardar como" para ACMR.



The image shows a software window titled "ACMR" with a close button in the top right corner. The main content area is titled "DATOS DEL PROYECTO." and contains two text input fields. The first field is labeled "Nombre del proyecto:" and contains the text "df". The second field is labeled "Nombre del Proyecto:" and is empty. At the bottom right of the window, there is a button labeled "Generar PDF".

Esta etapa se encuentra en desarrollo, por el momento para la fase inicial de concepción del programa el análisis es únicamente visual.

#### 4.2.4 Análisis de resultados en Red estereográfica

Es preferible que el usuario realice la discriminación por sectores, para reconocer claramente cada mecanismo de falla, como se aprecia en Tabla 16 :

Tabla 16. Discriminación del mecanismo de falla, dado un talud y 3 familias de discontinuidad.

<b>TIPO DE FALLA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
PLANAR	El polo del talud (punto azul) debe encontrarse dentro de algún sector de planar, por influencia de la discontinuidad perteneciente a este.
CUÑA	Si el polo del talud (punto azul) se encuentra dentro de algún sector de cuña, el talud presenta falla en cuña por influencia de las discontinuidades que se intersecan y lo generan.
VOLTEO	El polo de alguna discontinuidad debe encontrarse dentro de la franja específica, definida por el buzamiento del talud y el ángulo de fricción interna.

#### 4.2.5 Botón de ayuda

A la ayuda se puede acceder de dos maneras:

- Si ya ha trabajado en el programa, podrá ir al menú Archivo, y luego en Salir (Figura 34). Volverá a la página principal, y hacemos clic en el botón de ayuda.
- Antes de empezar un proyecto nuevo, se puede hacer clic en el botón Ayuda directamente ([Figura 35](#)).

Figura 34. Proceso de salida de la interfaz gráfica.

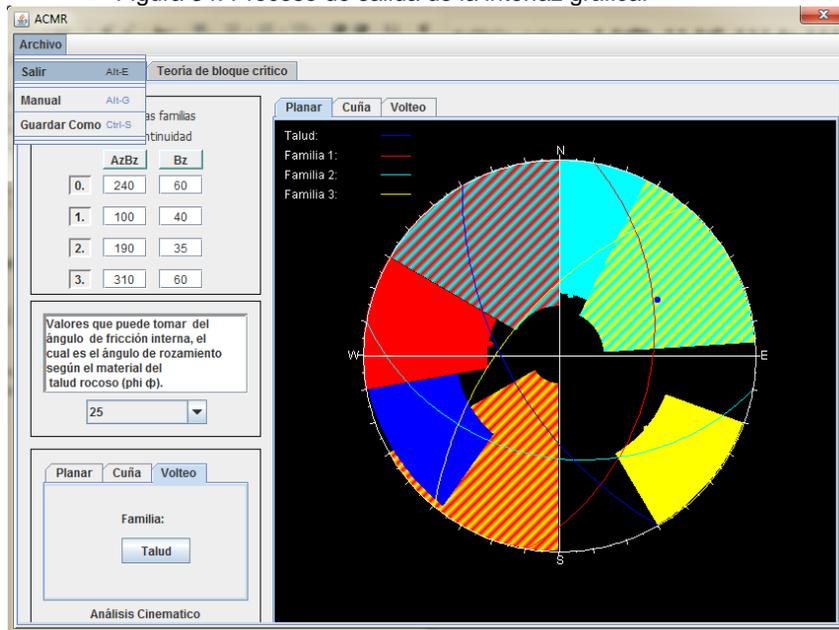


Figura 35. Ubicación botón de ayuda ACMR.



Haciendo clic en el botón Ayuda, podrá descargar de forma gratuita la presente ayuda en formato .pdf. Se recomienda desde luego que su equipo tenga alguna versión de Adobe Reader para lectura de estos archivos.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta computacional para determinar el mecanismo de falla de un talud en roca, , en función de la orientación del talud y las discontinuidades. El mecanismo puede determinarse aplicando las ecuaciones propias de cada uno mediante el principio de sectorización cinemática.

La incertidumbre asociada a la sectorización cinemática ocurre porque actualmente se recurre a demostraciones complejas o métodos dispendiosos para la determinación de un mecanismo de falla, por lo que se presenta esta plataforma de manera gráfica para reducir tiempos de estudios y brindar una mayor fundamentación para quien ejecuta una exploración de macizo rocoso.

Dado que la herramienta es gráfica, los códigos correspondientes a identificación de problemas de inestabilidad están discriminados para cada mecanismo de falla, en función de los polos del talud y las familias de discontinuidad.

## 6 RECOMENDACIONES

Se recomienda posteriormente, afianzar el desarrollo del programa abordando la teoría de bloque crítico de Goodman & Shi, una metodología alternativa para evaluar la estabilidad cinemática de un macizo rocoso. Como una aproximación, se grafican la red estereográfica y los planos de discontinuidad como circunferencias. Gráficamente, un círculo correspondiente a una discontinuidad puede cortar otros círculos, al círculo de la red estereográfica y al círculo que representa el plano del talud, los cuales entre sí generan áreas: entre 2 planos, planos-talud, planos-red y talud-red. Esta nueva metodología implica otra codificación.

Afianzar nuevas metodologías dentro del programa, indica que para los planos de discontinuidad y del talud, podría hacerse una comparación entre metodologías de evaluación de la estabilidad de un macizo rocoso, para lo cual el ingeniero que esté realizando el estudio puede optar por una o ambas, dependiendo de su análisis (considerando un talud en roca con comportamiento heterogéneo).

Como el objeto era el desarrollo del aplicativo, se consideran en este apartado observaciones sobre el mismo, es decir, se deben evaluar posteriormente: posibilidades de optimización de código, agregar nuevas funciones, desarrollarlo para nuevos temas, impresión de un informe de resultados y opciones de arranque (descompresión en el escritorio).

Para el ángulo de fricción interna como dato de entrada, se debe tener en cuenta que el usuario ingresa a ACMR.exe 4 familias de discontinuidad, en representación de numerosos planos. La resistencia de un talud rocoso disminuye con la presencia de numerosas discontinuidades y eso sumado a las condiciones propias del intemperismo, la hidrogeología y los estados de esfuerzos, que no se

tienen en cuenta en el análisis cinemático. En virtud de lo anterior, el usuario debe ingresar valores no mayores a  $25^\circ$ , que es el valor predominante de calidad “media” de un macizo. Esto abre la posibilidad de graficar círculos de fricción y ampliar el estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

BÁEZ, David. Matlab con aplicaciones en la Ingeniería, Física y Finanzas. 1 ed. México: Alfa omega Grupo Editor S.A., 2006.

CAÑAS, Daniel. Anclajes en la mecánica de rocas con aplicación a túneles. En: Cap. 2. Bloques de roca inestables. [Citado en 23 de marzo de 2015]; p. 30.38.

CEBALLOS, Francisco. Visual Basic: Curso de programación. 2 ed. Madrid (España): Alfa omega Grupo Editor, 1998, p. XIX.

COPNIA. Código de Ética Profesional. En: Art. 33. [En línea]. Disponible en: [http://www.copnia.gov.co/codigo\\_de\\_Etica\\_profesional-32/](http://www.copnia.gov.co/codigo_de_Etica_profesional-32/)

CUBILLOS ALZATE, Jorge. Geología para Ingenieros. Cali: Oficina de Publicaciones Universidad del Valle, 1989, p. 185, 186-188.

DECRETO 460 DE 1995. Reglamentación del Registro Nacional de Derecho de Autor y se regula el depósito legal. En: Cap. 3, Depósito legal. [En línea]. [http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file\\_id=126035](http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file_id=126035).

DIRECCIÓN NACIONAL DE DERECHOS DE AUTOR. El Derecho de autor. [En línea]. (s.f.). Disponible en: <http://www.propiedadintelectualcolombia.com/Site/LinkClick.aspx?fileticket=yDsveWsCdGE%3D&tabid=99>. p. 2,3.

DUQUE, Gonzalo. Cap. 12, Macizo rocoso. En: Manual de Geología para ingenieros [en línea]. (s.f.). Disponible en: <http://www.galeon.com/manualgeo/geo12.pdf>.

ESPITIA, Jairo. Unidad 2. Geología estructural e interpretación de datos. En: Estabilidad de taludes [en línea]. (s.f.). Disponible en < <http://es.slideshare.net/vieri9413/taludes-capitulo-ii>>. [Citado en 25 de octubre de 2014], p. 45-46, 60.

GILAT, Amos. Matlab: Una introducción con ejemplos prácticos. 2 ed. Barcelona: Editorial Reverte S.A., 2005. p. 1, 3.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis. Ingeniería geológica. Madrid (España): Pearson Education, 2002. p. 118, 119, 123, 124, 440, 442, 443.

MARTÍNEZ, Andrés. Impacto ambiental generado por malas prácticas de ingeniería, caso de estudio Doble Calzada Bogotá-Girardot, sitio "El Paso". En: Universidad Industrial de Santander [en línea]. Disponible en: <<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/7480/2/133346.pdf>>.

[Citado en 23 de marzo de 2015].

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE. Estudios geotécnicos. En: Título H [en línea]. (2010). Disponible en <http://www.scg.org.co/Titulo-H-NSR-10-Decreto%20Final-2010-01-14.pdf>.

ROCSCIENCE. Productos. [En línea]. Disponible en: <https://www.rocscience.com/products/overview>.

SEPÚLVEDA, Sergio. Inestabilidad en túneles por control estructural: Introducción a la teoría de bloques y aplicaciones. [En línea]. (s.f.). Disponible en <[https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/CI52T/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=133955](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/1/CI52T/1/material_docente/bajar?id_material=133955)>.

[Citado en 18 de octubre de 2014], p. 4-17.

VILLANUEVA, Miguel. Análisis de caída de rocas. En: Universidad Nacional de Lima, portal de Ingeniería. [En línea]. (2008). Disponible en: <http://www.portaldeingenieria.com/archivos/publicaciones/usuarios/gym01.pdf>.