

# Geología desde los ojos de un dron

Una poderosa herramienta educativa para los actuales ingenieros en Ciencias de la Tierra

Proyecto DGAPA/UNAM/PAPIME: PE101020

**GAA-04**

## Identificación de los mecanismos de falla mediante un análisis cinemático utilizando nubes de puntos

**Mancera-Alejandro Javier  
Trejo-García Nallely Beatriz**



**UNAM / FACULTAD DE INGENIERÍA**  
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Por favor cítanos como:

Mancera-Alejándrez J., Trejo-García N. B., (2024), Identificación de mecanismos de falla en taludes mediante análisis cinemático. Guía de aprendizaje autónomo GAA-04. Facultad de Ingeniería, UNAM

## 1. Introducción

Durante los estudios geológicos-geotécnicos de taludes excavados en macizos rocosos, es necesario analizar la ocurrencia de falla por distintos mecanismos, entre ellos, los dictados por las discontinuidades presentes. Una forma de hacer la evaluación es mediante análisis cinemáticos, que determinan geoméricamente las discontinuidades que podrían dar salida a bloques y comprometer la estabilidad del talud.

Esta guía presenta una metodología para realizar análisis cinemáticos paso a paso, e interpretar la posibilidad de ocurrencia de determinado mecanismo de falla por discontinuidades.

## 2. Objetivos docentes

Objetivo general:

El usuario aprenderá a realizar análisis cinemáticos utilizando proyecciones estereográficas de las familias de discontinuidades identificadas en un corte. Para ello, realizará la extracción de las orientaciones de manera semi-automática a partir de una nube de puntos proporcionada.

Adicionalmente comparará sus resultados con los obtenidos utilizando un software especializado.

Objetivos particulares:

- a) Visualizar un conjunto de datos de la actitud de planos en el espacio (rumbo y echado).
- b) Obtener datos de orientación y echado de familias de discontinuidades a partir de una nube de puntos con *Discontinuity Set Extractor (DSE)*.
- c) Identificar mecanismos de falla a través de discontinuidades utilizando análisis cinemáticos.

## 3. Marco teórico

Hay dos mecanismos principales de falla en taludes: a) cuando la superficie de falla se crea a través de la matriz rocosa, y b) cuando la superficie de falla se genera directamente por la presencia de discontinuidades preexistentes (Hudson, 2000). En el primer caso, la falla ocurre por pérdida de resistencia de la matriz rocosa siguiendo una superficie circular (Figura 1a). Por otra parte, en el segundo caso, las discontinuidades delimitan bloques y actúan como planos por los que ocurre el deslizamiento, y su geometría depende de la orientación relativa de las discontinuidades (Figura 1b).

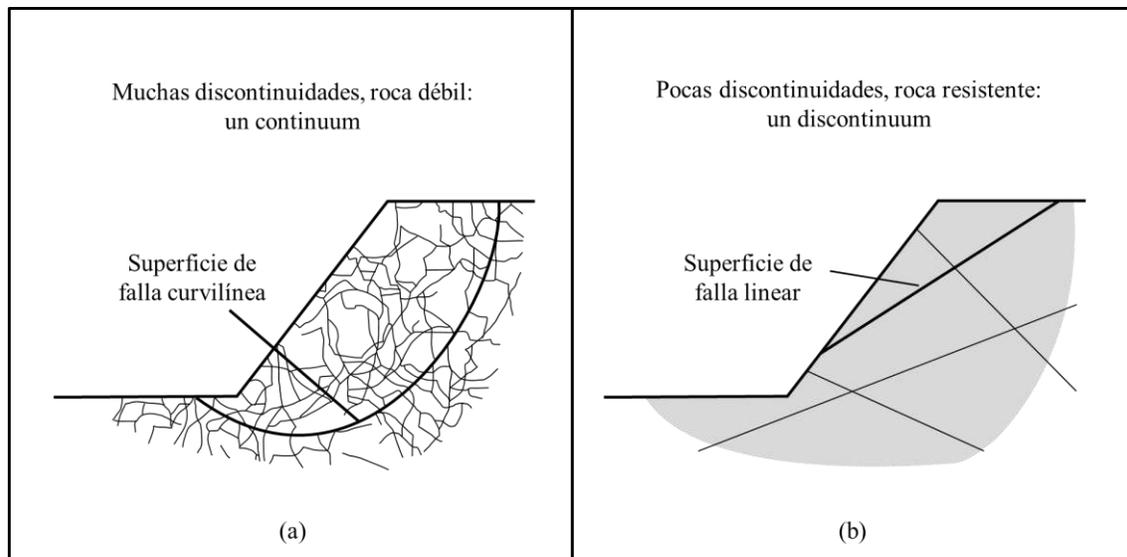


Figura 1. Mecanismos de falla de taludes en (a) un continuum y (b) un discontinuum. (Modificada de Hudson, 2000).

Dentro de las fallas por discontinuidades, existen varios modos de rotura:

1. Falla plana: se produce siguiendo una discontinuidad con dirección aproximadamente igual a la del talud pero que buza menos que éste, quedando sin soporte un prisma de roca (Figura 2a).
2. Falla en cuña: se produce siguiendo dos planos de discontinuidad, de manera que el buzamiento de la línea de intersección de ambos planos tenga un buzamiento inferior al ángulo de talud, lo que descalza una cuña de roca (Figura 2b).
3. Falla por volteo: se produce si se tiene una familia de discontinuidades muy persistentes y poco espaciadas con rumbo paralelo al del talud, pero que bucen en sentido opuesto, con inclinación alta. Además, se ve favorecida si existe otra familia de discontinuidades perpendicular a la anterior que forme una base escalonada sobre la que vuelcan los prismas de roca que se formen, como se observa en la Figura 2c (Oyanguren, 2004).

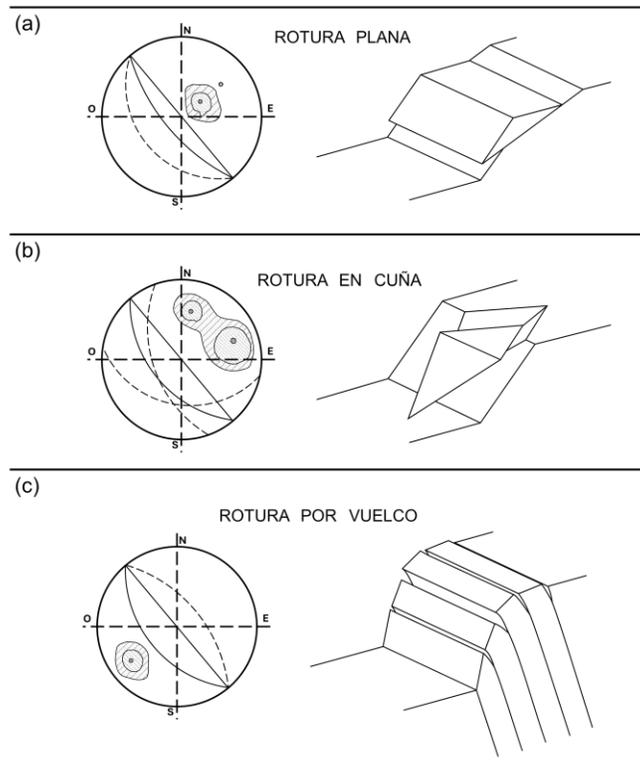


Figura 2. Representación de los tipos más comunes de rotura en taludes en roca: en proyección estereográfica y tridimensional. (Modificada de Oyanguren, 2004; Hoek y Bray, 1974).

Para que ocurra algún mecanismo de falla de los antes mencionados, las discontinuidades deben guardar cierta relación geométrica con el talud. Los análisis cinemáticos examinan cuál mecanismo es posible de manera puramente geométrica, considerando la orientación de un talud y las familias de discontinuidades principales.

Un método de análisis cinemático es el desarrollado por Markland (1972), que permite identificar aquellas discontinuidades que podrían conducir a una falla plana, de cuña o de volteo, y eliminar otras discontinuidades de la consideración (Kliche, C., 1999), basándose en elementos como la dirección de inclinación (*dip direction*) del talud; su echado,  $\Psi$ ; el echado de la discontinuidad o de la intersección entre discontinuidades que definen la falla,  $\beta$ ; y el ángulo de fricción de la(s) discontinuidad(es),  $\varphi$  (Figura 3).

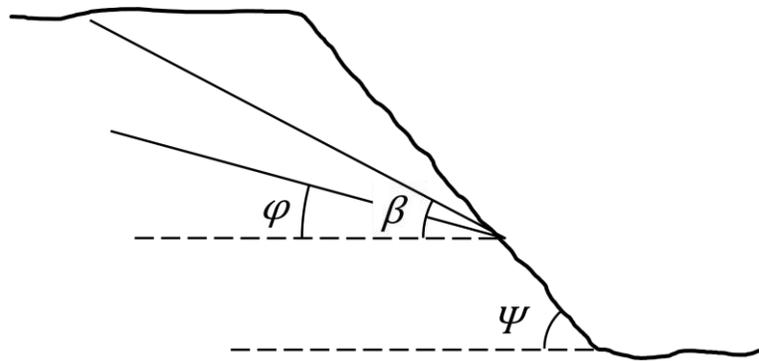


Figura 3. Definición de los ángulos (Modificada de Oyanguren, 2004).

## 4. Materiales y equipo

### 4.1. Software

A continuación, se enlista el software necesario para realizar esta práctica:

- Para vista y manejo de tablas: Excel o Google Sheets
- Para visualización de nubes de puntos: CloudCompare
- Para extracción de planos de discontinuidad: DSE
- Para análisis cinemático en software: DIPS, de Rocscience.

### 4.2. Insumos digitales

- Set de datos de *dip* y *dip direction* tomados en campo con brújula de un afloramiento (Tabla 1 de este documento).
- Nube de puntos: “La Escuelita”. La puedes descargar en la siguiente liga: <https://drones.unam.mx/repositorio-fotogrametrico>.
- Datos geométricos del afloramiento

### 4.3. Requerimientos mínimos de cómputo

- Windows OS: 1.6 GHz o más rápido, dos núcleos
- macOS: Procesador Intel

Memoria

- Windows OS: 4 GB de RAM; 2 GB de RAM (32 bits)
- macOS: 4 GB de RAM

Disco duro

- Windows OS: 4 GB de espacio disponible en disco
- macOS: 10 GB de espacio en disco disponible. Disco duro con formato HFS+ (también conocido como macOS Extended o HFS Plus) o APFS

## 5. Procedimiento

Para cumplir con los objetivos docentes, se han planteado las siguientes actividades las cuales se describen con detalle. Para algunos casos se recomiendan documentos de apoyo.

Actividad 1. Representar los datos de orientación de discontinuidades obtenidos con brújula y obtener las familias de discontinuidades principales en el talud en *DIPS* y obtener las familias.

Actividad 2. Obtener las familias principales de discontinuidades del talud a partir de una nube de puntos usando el software *Discontinuity Set Extractor* (DSE).

Actividad 3. Graficar las familias de discontinuidades, al igual que el plano del talud.

Actividad 4. Realizar un análisis cinemático para determinar la posibilidad de ocurrencia de algún mecanismo(s) de falla a partir de la geometría del talud y las discontinuidades.

Actividad 5. Comparar los resultados con los obtenidos utilizando *DIPS*.

**Actividad 1. Representar los datos de orientación de discontinuidades obtenidos con brújula y obtener las familias de discontinuidades principales en el talud en *DIPS* y obtener las familias.**

Previamente hemos realizado un levantamiento de la orientación de discontinuidades del macizo rocoso ubicado a un costado del estadio de Ciudad Universitaria de la UNAM (Figura 4).

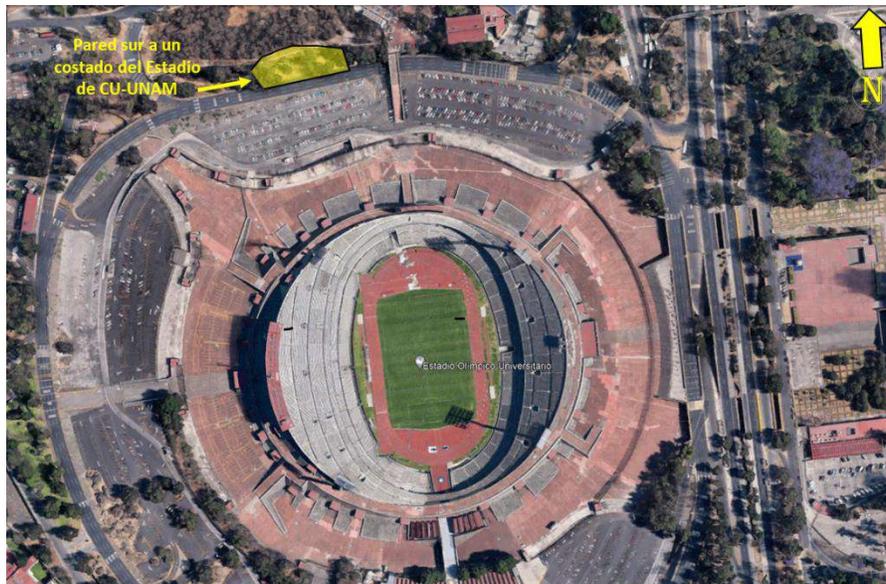


Figura 4. Ubicación de la zona de adquisición de datos. Imagen tomada de Google Earth.

En la Tabla 1 te presento los 52 datos que hemos obtenido con brújula de un sector de la pared de la Escuelita.

*Tabla 1. Mediciones realizadas con brújula*

ID	Inclinación	Dirección de la inclinación	ID	Inclinación	Dirección de la inclinación	ID	Inclinación	Dirección de la inclinación
1	26	117	19	57	306	37	75	275
2	24	113	20	72	314	38	76	262
3	30	106	21	71	313	39	73	333
4	24	108	22	65	321	40	82	341
5	29	96	23	68	300	41	79	348
6	21	101	24	58	216	42	76	1
7	43	104	25	60	222	43	77	11
8	33	117	26	77	216	44	78	2
9	75	321	27	65	247	45	77	244
10	89	136	28	60	253	46	50	99
11	322	88	29	62	251	47	46	99
12	80	318	30	62	251	48	38	109
13	74	316	31	62	251	49	54	95
14	70	307	32	64	240	50	83	299
15	74	231	33	64	242	51	88	126
16	69	227	34	60	248	52	88	125
17	80	232	35	77	268			
18	84	196	36	78	272			

**Actividad 1.1**

Grafica los datos en la red estereográfica en el software *DIPS*. No olvides que la notación que estamos utilizando en la tabla de datos (Tabla 1) es Inclinación/Dirección de la inclinación (*Dip/Dip Direction*). Revisa que la notación en *DIPS* sea la correcta.

En la Figura 5 te presento como se ven los datos en *DIPS* 8, utilizando un diagrama de concentración de polos generado directamente en el software.

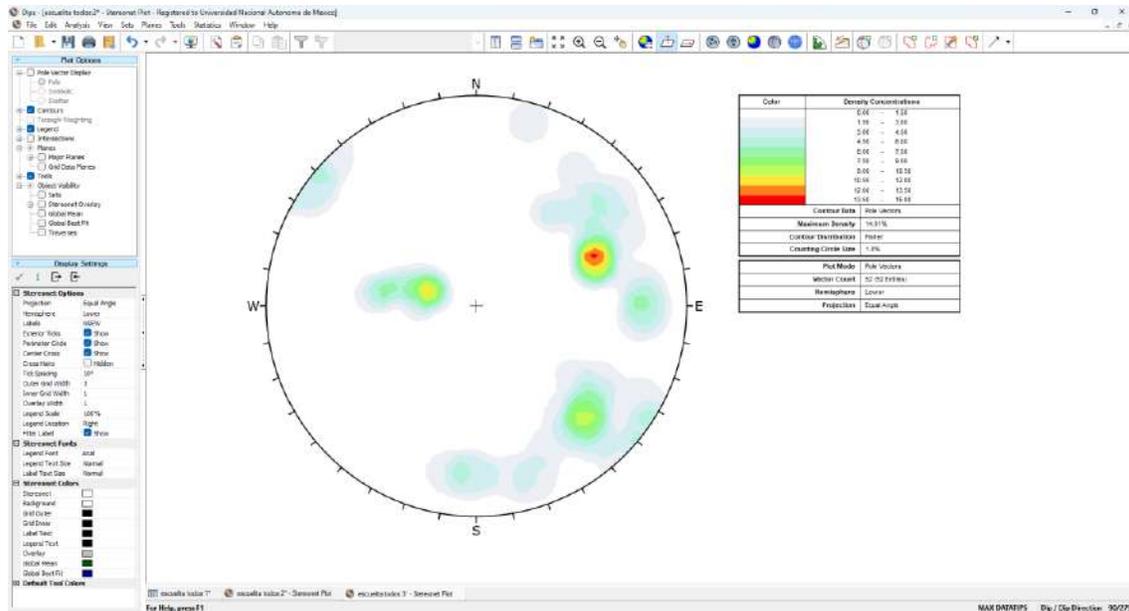


Figura 5. Diagrama de contorno de polos en DIPS 8.

Analiza, reflexiona y responde:

P1.1 ¿Cuántas familias de discontinuidades puedes identificar?

**Actividad 1.2**

Analiza el diagrama de concentración de polos que has generado, define la orientación de las familias principales, y llena la siguiente tabla:

Tabla 2. Identificación de las familias a partir de mediciones con brújula

Mediciones con brújula en campo		
No. Familia	Inclinación	Dirección de la inclinación
1		
2		
3		
4		
.		
.		

Analiza, reflexiona y responde:

P1.2 ¿Qué criterios utilizaste para elegir las familias?

## Actividad 2. Obtener las familias principales de discontinuidades del talud a partir de una nube de puntos usando el software *Discontinuity Set Extractor* (DSE).

Adrián Riquelme (Riquelme et. al. 2014), desarrollo el programa *Discontinuity Set Extractor* (DSE) para obtener las familias de orientaciones preferenciales de un macizo rocoso. Los datos de entrada para el programa son nubes de puntos obtenidas con LiDAR o fotogrametría. La forma en que logra esto se divide en 3 partes (Figura 6); la primera consiste en encontrar un plano que se ajuste a un grupo de elementos de la nube, esto lo hace con algoritmos de vecinos cercanos (*Nearest Neighbour Searching*) y posteriormente haciendo una prueba de coplanaridad. En la segunda parte hace estimación de la densidad y asigna cada elemento a una familia (10 precargadas, pero se puede modificar). Finalmente, en tercera parte, realiza análisis de clústeres y calcula el error de ajuste.

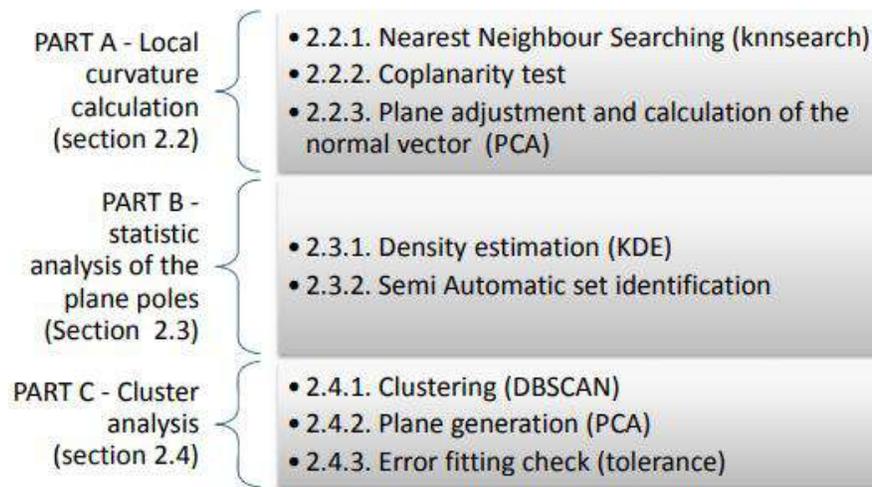


Figura 6. Diagrama de flujo para la metodología DSE, (Riquelme et. al. 2014).

### Actividad 2.1

Descarga e instala el software de acceso libre DSE de Riquelme. Actualmente ya está disponible la versión 3.00 (<https://personal.ua.es/en/ariquelme/discontinuity-set-extractor-software.html>). DSE está programado en Matlab y probado en su versión 2020a, por lo que para poder ejecutarlo necesitaras instalar Matlab 2020a. Si eres estudiante o académico de la UNAM puedes descargar Matlab en: <https://www.software.unam.mx/producto/matlab/>, recuerda que para ello debes tener una cuenta con terminación institucional de la UNAM.

## Actividad 2.2

Aunque los procesos que realiza DSE 3.00 están optimizados y reducen en buena medida los tiempos de proceso, conviene reducir el tamaño de la nube de puntos. Para esto realiza un submuestreo de la nube de puntos en *CloudCompare*. Para tener detalle sobre cómo realizar el submuestreo, te recomendamos leer la *Guía de Aprendizaje Autónomo 3*. Guarda la nueva nube de puntos que debe ser más ligera y tener menos elementos.

## Actividad 2.3

Utiliza la nube de puntos submuestreada para analizarla con DSE, sigue el flujo de trabajo en el programa (Figura 7):

1. Normal vector and poles. Calcula los vectores normales a cada punto con el test de coplanaridad.
2. Density and principal poles extraction. Calcula la función de densidad con el número de familias que se le indique. A partir de aquí puedes ver las figuras con las herramientas de ploteo (*Plot*, barra derecha en DSE)
3. Assigning a DS to each point. Asigna cada punto de la nube a las familias.
4. Clúster análisis. Realiza el análisis de clústeres pudiendo manipular el error de ajuste y permite guardar el resultado.

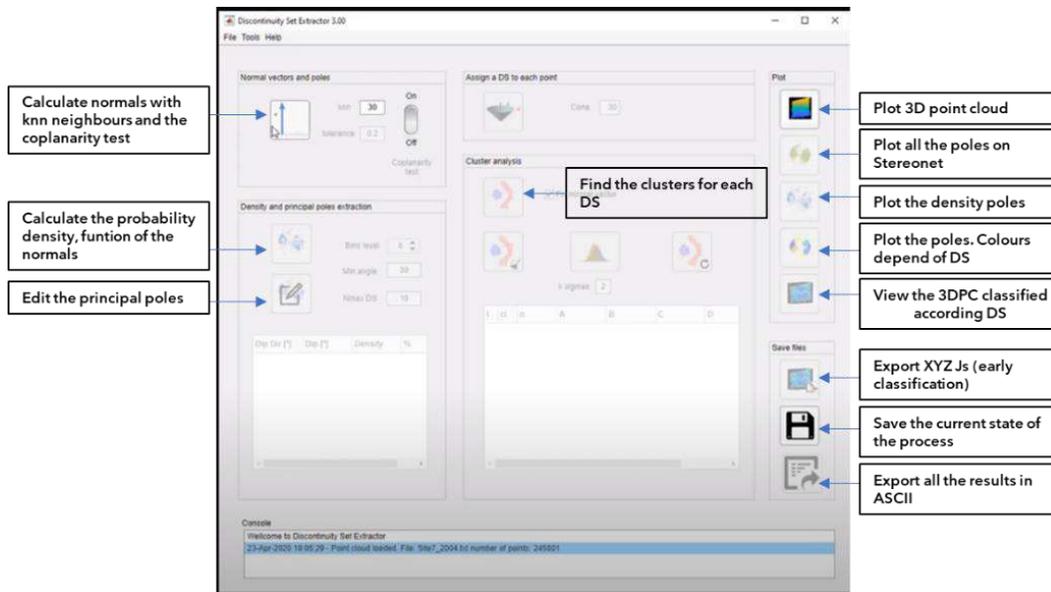


Figura 7. Interfaz de DSE, (Riquelme, 2014; Actualización-DSEv3.00-2020)

Para seguir el procedimiento con detalle te invitamos a ver el video: <https://www.youtube.com/watch?v=rarJ8AKNWgg&t=494s>.

Analiza, reflexiona y responde:

P2.1 ¿Te parece que las 10 familias que detecta de forma predefinida son las que en realidad existen en el macizo rocoso analizado?

### Actividad 3. Graficar las familias de discontinuidades, al igual que el plano del talud.

Ahora grafica los planos de las familias de discontinuidades y la orientación del talud en una proyección equiangular en *DIPS*. Para ello, abre un nuevo proyecto, y sigue el procedimiento:

- Añade las familias de discontinuidades como datos y entra a la vista del estereograma con polos. Para visualizarlos deberás activar la casilla *Grid Data Planes* en la barra de opciones de ploteo (*plot options*) a la izquierda de la pantalla. También, en la barra de menús en la parte superior de la ventana, entra al menú *View*, luego a la opción *Pole / Dip Vector Mode*, y finalmente da clic en la opción *Dip Vector Mode* (Figura 8a). Verás que en el estereograma se representan los planos con una marca sobre la línea que representa el vector de inclinación del plano, mientras que los polos desaparecen (Figura 8b).

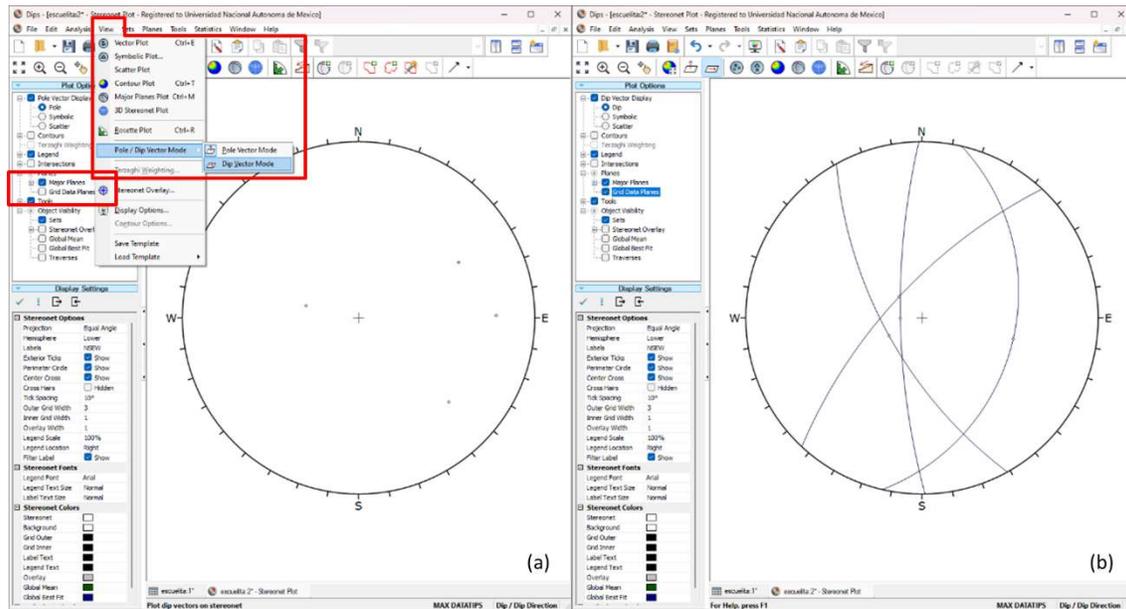


Figura 8. Opciones para la visualización de los datos en *DIPS*.

- Añade el plano del talud como plano mayor definido por el usuario. Para ello, utiliza la herramienta señalada en la Figura 9, da clic en cualquier lugar del estereograma, y en la ventana emergente ingresa los datos de orientación del talud:  $90^\circ / 166^\circ$

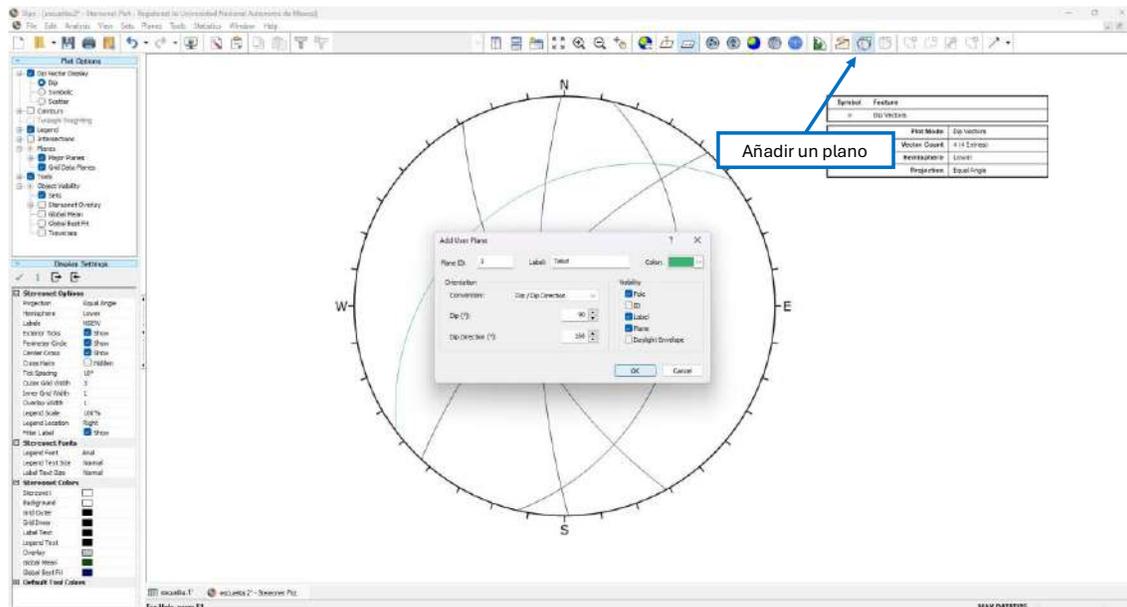


Figura 9. Función para añadir manualmente un plano principal en DIPS.

Analiza, reflexiona y responde:

P.3.1 ¿Cómo es la orientación de las familias principales respecto del talud?

P.3.2 ¿Crees que alguna de las familias podría conducir a una falla a través de las discontinuidades? ¿Cuáles?

P.3.3 ¿Cuáles criterios crees que se deben cumplir para que sea posible una falla por discontinuidades?

**Actividad 4. Realizar un análisis cinemático para determinar la posibilidad de ocurrencia de un mecanismo de falla a partir de la geometría del talud y las discontinuidades.**

Markland (1972) desarrolló un método para el análisis cinemático que determina las discontinuidades que pueden conducir una falla plana, en cuña o por volteo, y descarta las que no. Es un método conservador, pues considera que las discontinuidades son persistentes en todo el macizo rocoso, y que no tienen cohesión, dejando la estabilidad únicamente en términos del ángulo de fricción interna,  $\phi$  (Kliche, C., 1999).

**Actividad 4.1**

Para que una falla a través de discontinuidades ocurra, se deben cumplir algunas condiciones:

- a) Que el vector que conduce a la falla tenga un ángulo de inclinación ( $\beta$ , buzamiento/*plunge*) menor que la inclinación de la cara del talud ( $\Psi$ , *dip*)
- b) Que el vector que conduce a la falla tenga un ángulo de inclinación ( $\beta$ ) mayor al ángulo de fricción de la discontinuidad ( $\varphi$ )
- c) Que el vector que conduce a la falla tenga una dirección de inclinación  $\pm 20^\circ$  de la dirección de inclinación de la cara del talud (*dip direction*) (Hoek & Bray, 1981)

La última condición se debe a que, fuera de este límite de  $\pm 20^\circ$ , el deslizamiento se bloquea con las rocas contiguas.

Para verificar estas condiciones, agregarás algunos elementos extra al estereograma.

No se conoce el ángulo de fricción de las discontinuidades en el afloramiento que estás analizando. Sin embargo, en la literatura se reportan valores para basaltos de  $31^\circ - 36^\circ$  para condiciones húmedas, y de  $35^\circ - 38^\circ$  para condiciones secas (Zhang, 2016).

**TABLE 6.11** Basic Friction Angles  $\phi_b$  for Different Rocks

Rock Family	Rock Type	$\phi_b$ Dry (Degrees)	$\phi_b$ Wet (Degrees)
Sedimentary	Conglomerate	35	
	Chalk	32	
	Limestone	31–37	27–35
	Mudstone	31–33	27–31
	Sandstone	26–35	25–34
	Shale		27
	Siltstone	31–33	27–31
Igneous	Basalt	35–38	31–36
	Dolerite	36	32
	Coarse-grained granite	31–35	31–33
	Fine-grained granite	31–35	29–31
	Porphyry	31	31
Metamorphic	Amphibolite	32	
	Gneiss	26–29	23–26
	Schist	25–30	21
	Slate	25–30	21

Based on Barton, N., Choubey, V., 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.*, 10, 1–54; Alejano, L.R., González, J., Muralha, J., 2012. Comparison of different techniques of tilt testing and basic friction angle variability assessment. *Rock Mech. Rock Eng.*, 45, 1023–1035.

Figura 10. Ángulos de fricción básicos para diferentes litologías (Zhang, 2016)

Analiza, reflexiona y responde:

P.4.1 ¿Cómo crees que afecte la variación del ángulo de fricción en la estabilidad geométrica del talud?

Para realizar el ejercicio, añade un cono con  $trend = 0$ ,  $plunge = 90^\circ$ , y ángulo =  $90^\circ - \varphi$ . Considera  $\varphi = 35^\circ$ . Para los límites laterales dibuja dos líneas rectas que pasen por el centro, y tengan un rumbo  $\pm 20^\circ$  del  $dip\ direction$  del talud (Figura 11).

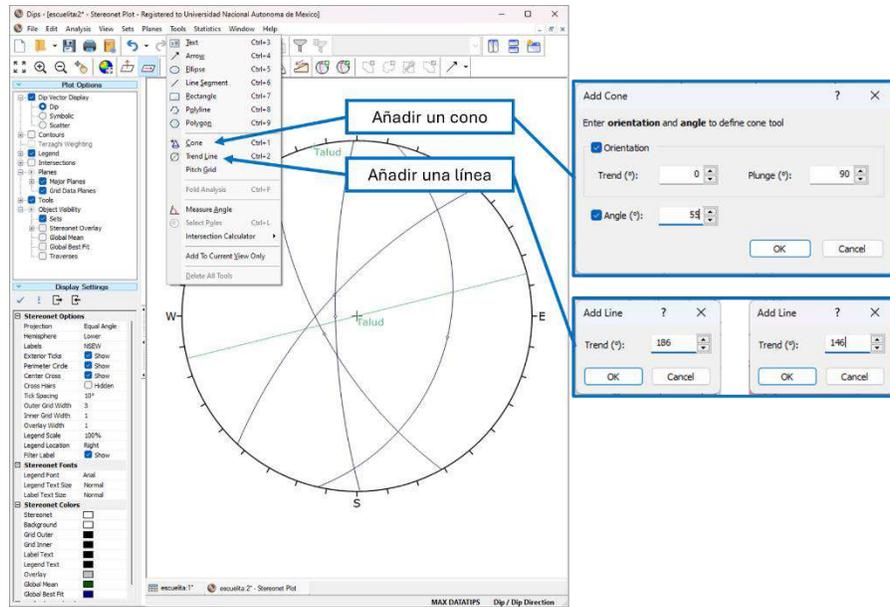


Figura 11. Funciones para añadir elementos geométricos en DIPS.

A continuación, te muestro el estereograma que obtuvimos.

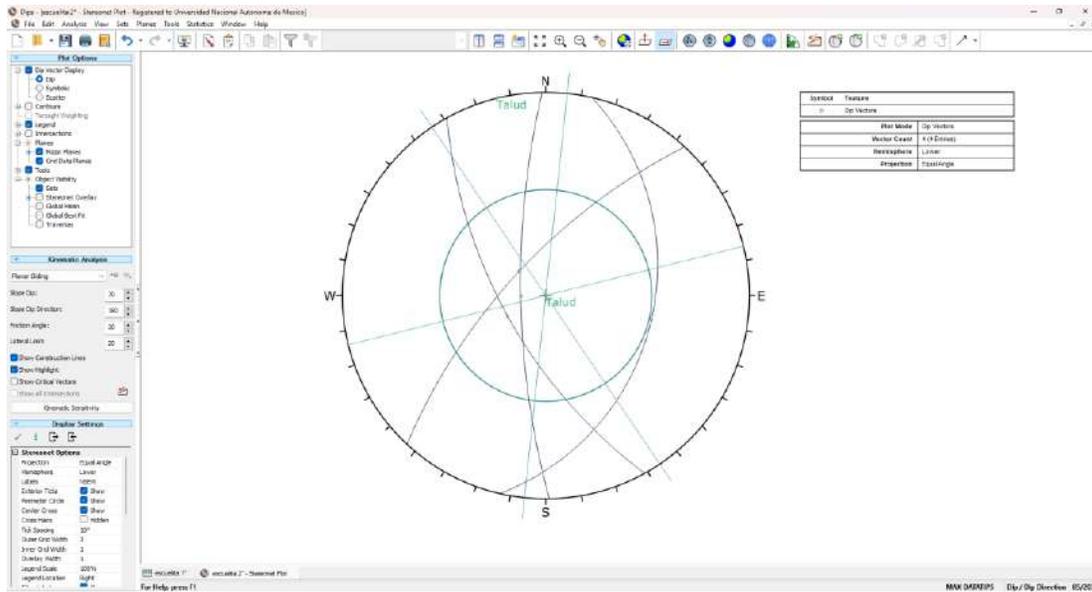


Figura 12. Construcción del análisis cinemático.

### **Actividad 4.2**

Una falla plana ocurre cuando un bloque desliza por una superficie de discontinuidad, siguiendo directamente la dirección de la máxima pendiente, representada en un estereograma con el vector de la familia de discontinuidades.

Si dicho vector se encuentra ubicado en el espacio entre el círculo de fricción, el plano del talud (con  $\beta < \Psi$ ), y los límites laterales, esa familia tiene probabilidad de generar una falla plana.

Observa los planos y polos que tienes en tu estereograma.

*Analiza, reflexiona y responde:*

P.4.2 ¿Cómo es el plano de una familia de discontinuidades que genera falla plana respecto del plano del talud en la proyección estereográfica?

P.4.3 ¿Hay alguna familia de discontinuidades que pueda generar falla plana para el ejercicio?

### **Actividad 4.3**

En una falla en cuña, el bloque deslizante sigue al vector de la intersección entre dos discontinuidades. En el estereograma, este vector se encuentra en la intersección de los círculos mayores de dos familias de discontinuidades.

Si la intersección se encuentra en el espacio entre el círculo de fricción, el plano del talud (con  $\beta < \Psi$ ), y los límites laterales, la combinación de esas familias puede generar una falla en cuña.

*Analiza, reflexiona y responde:*

P.4.4 ¿Cómo son los planos de las familias de discontinuidades que forman cuñas respecto del plano del talud en proyección estereográfica?

P.4.5 ¿Hay familias que puedan generar falla en cuña para el ejercicio?

### **Actividad 4.4**

El caso de la falla por volteo tiene consideraciones diferentes. El método de Markland señala que se deben cumplir dos condiciones para que ocurra una falla por volteo:

- a) Que exista una discontinuidad con inclinación menor que el ángulo de fricción ( $\beta < \varphi$ ), la cual funcionará como base del bloque,
- b) Que exista una discontinuidad que dé respaldo al bloque, tenga un ángulo de inclinación  $\beta$  cercano a  $90^\circ$ , y dirección de inclinación paralela a la del talud, pero en sentido opuesto.

Si en el estereograma identificas un par de familias de discontinuidad con esta configuración, existe el riesgo de una falla por volteo.

*Analiza, reflexiona y responde:*

P.4.6 ¿Cómo se observan en el estereograma los planos capaces de generar falla por volteo respecto del plano del talud?

P.4.7 ¿Hay familias que puedan generar falla por volteo para el ejercicio?

#### **Actividad 5. Comparar los resultados con los obtenidos utilizando un software.**

*DIPS* tiene una función para realizar análisis cinemáticos de manera automática con los planos representativos de las familias de discontinuidades, o con la totalidad de los datos estructurales.

##### **Actividad 5.1**

Para hacer el análisis automático con los planos representativos, abre un proyecto nuevo de *DIPS* e introduce los datos de las familias de discontinuidades como datos.

Ve al menú *Analysis*, y luego a *Kinematic Analysis*. Se desplegará una ventana para configurar la función como la que te muestro en la Figura 13.

En la ventana, elije las siguientes opciones:

- Tipo de falla: falla plana (*planar sliding*)
- Modo de representación: *dip*
- Ingresas los datos de la orientación del talud y el ángulo de fricción en la sección *Kinematic Properties*.

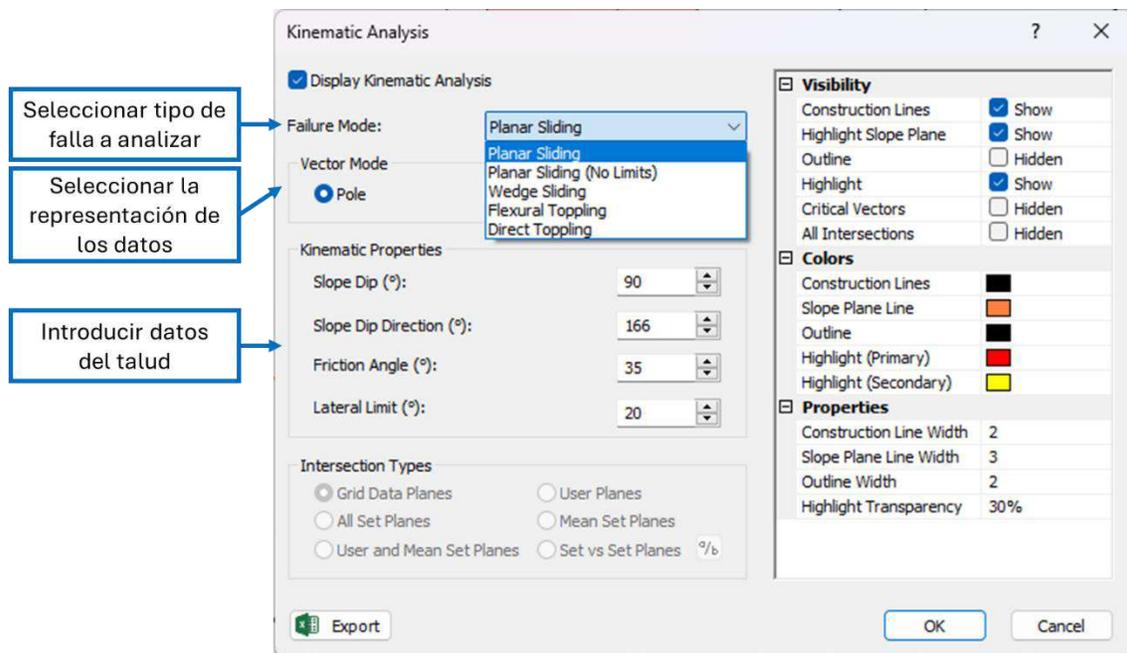


Figura 13. Opciones de configuración del análisis cinemático en DIPS.

En el estereograma aparecieron los elementos que dibujaste en la actividad 4.1. La zona marcada en rojo representa las orientaciones de los vectores que pueden generar falla plana. Además, en la tabla a la derecha del estereograma verás una parte que señala el porcentaje de vectores críticos (Figura 14), es decir, los que pueden generar salida de bloques.

Vuelve a abrir la ventana de configuración y observa los resultados para los demás tipos de falla.

*Analiza, reflexiona y responde:*

P.5.1 ¿El resultado que arroja DIPS es el mismo que obtuviste al construir el estereograma de forma manual?

Una vez más abre la ventana de configuración. Ahora cambia el modo de representación por Polo (*Pole*) y observa lo que ocurre. En la Figura 14 te muestro como ejemplo el caso del análisis de falla por cuña con la representación con polos.

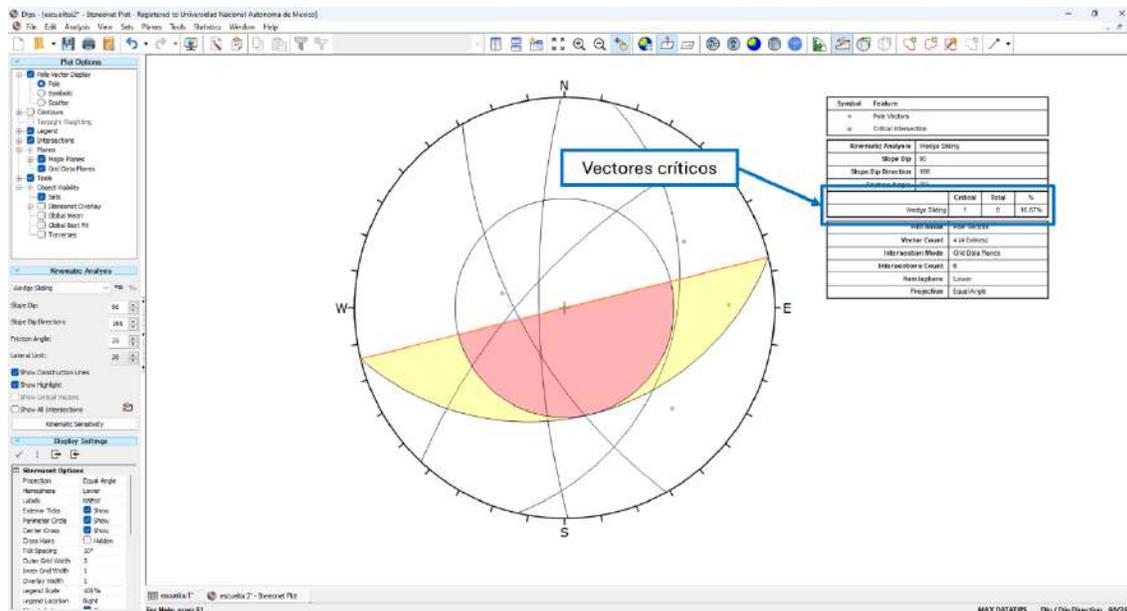


Figura 14. Análisis cinemático para falla en cuña en DIPS, usando planos principales.

P.5.2 ¿Cómo cambia el estereograma?

P.5.3 ¿El resultado es el mismo? Concluye al respecto.

### Actividad 5.2

Finalmente, realiza el análisis automático considerando todos los datos estructurales. Puedes usar el primer archivo que utilizaste para definir las familias de discontinuidades en la Actividad 1.

Abre el análisis cinemático, y configúralo con la representación que prefieras, para visualizar cada tipo de falla. En la Figura 15 te muestro como ejemplo el análisis de falla en cuña con polos.

*Analiza, reflexiona y responde:*

P.5.2 ¿Se obtiene el mismo resultado utilizando los planos principales o considerando todos los datos?

P.5.3 ¿Cuál método crees que sea mejor, considerando todos los planos levantados en campo o únicamente los planos representativos de las familias de discontinuidades? ¿por qué?

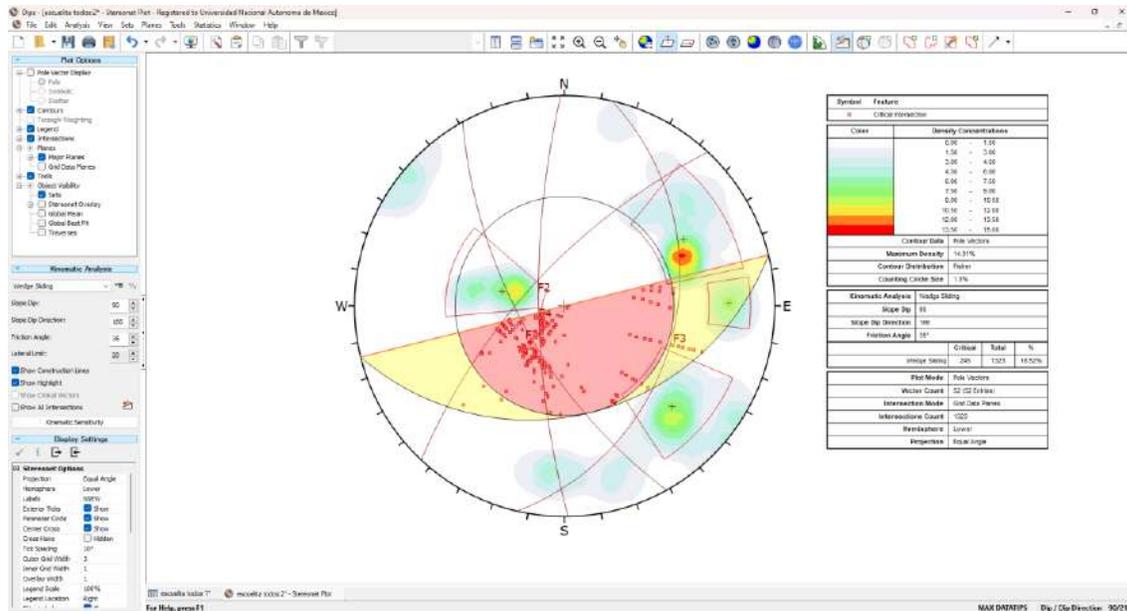


Figura 15. Análisis cinemático para falla en cuña en DIPS usando la totalidad de datos.

## 6. Resultados y reporte

El reporte de la realización de esta práctica deberá incluir al menos los siguientes aspectos:

- i. Introducción
- ii. Equipo y materiales
- iii. Métodos (procedimiento)
- iv. Resultados
- v. Discusión de resultados

Para esta sección deberás responder a las preguntas de las secciones “*Analiza, reflexiona y responde*”

- vi. Conclusiones

Para esta sección te puedes apoyar de las preguntas de las secciones “*Analiza, reflexiona y responde*”

- vii. Referencias

## 7. Referencias citadas

Hoek, E. & Bray, J. (1981). Rock slope engineering. *The Institution of Mining and Metallurgy*, 402.

Hudson, J. A., & Harrison, J. P. (2000). Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Elsevier.

Kliche, C. A. (1999). Rock slope stability. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Ramírez-Oyanguren, P., & Alejano-Monge, L. R. (2004). Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes. Red DESIR, Madrid.

Riquelme, A. J., Abellán, A., Tomás, R., & Jaboyedoff, M. (2014). A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. *Computers & Geosciences*, 68, 38-52.

Zhang, L. (2016). Engineering properties of rocks. Butterworth-Heinemann.