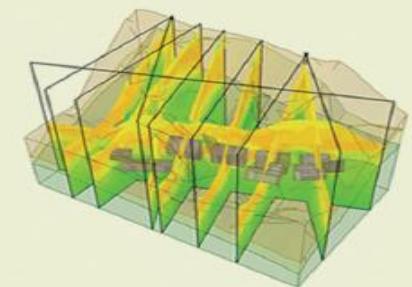
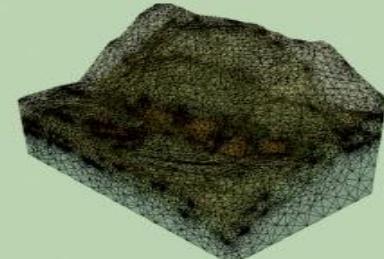
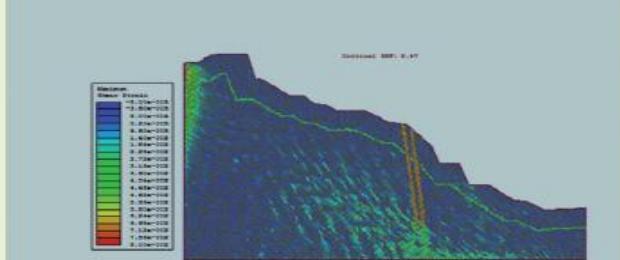
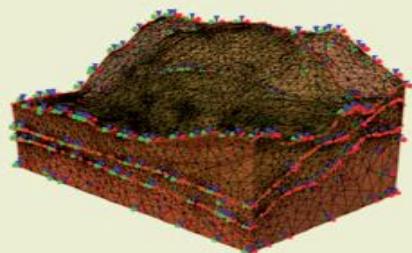




FF GeoMechanics

Modelo Numérico Tridimensional para Evaluar la Estabilidad Debido a la Ocurrencia de Eventos de Subsistencia en una Mina Subterránea



*Fernando Fernández Lagazio
Dr Ing, MSc. Mining Geomechanics*



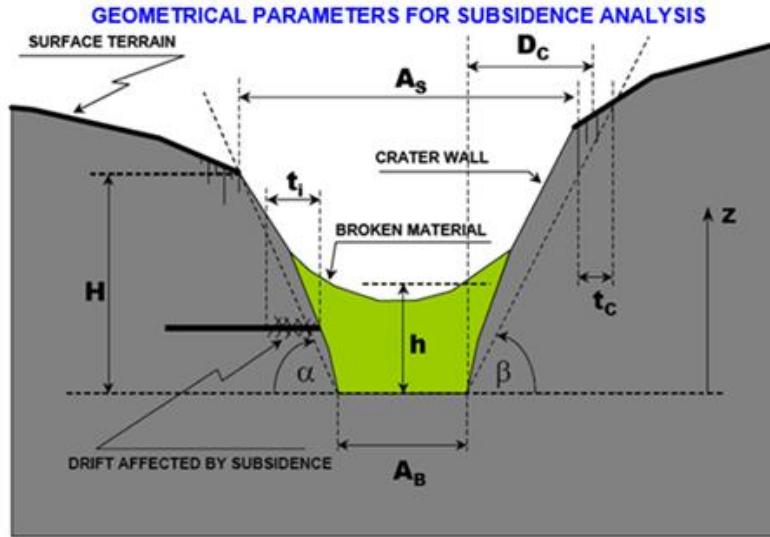
Estado del Arte

El gran problema se asocia a la ocurrencia de subsidencia “no deseada debido a falta de control del proceso”.



Estado del Arte

El proceso controlado se encuentra asociado (generalmente) a las minas explotadas a través de métodos de hundimiento (o “caving”).



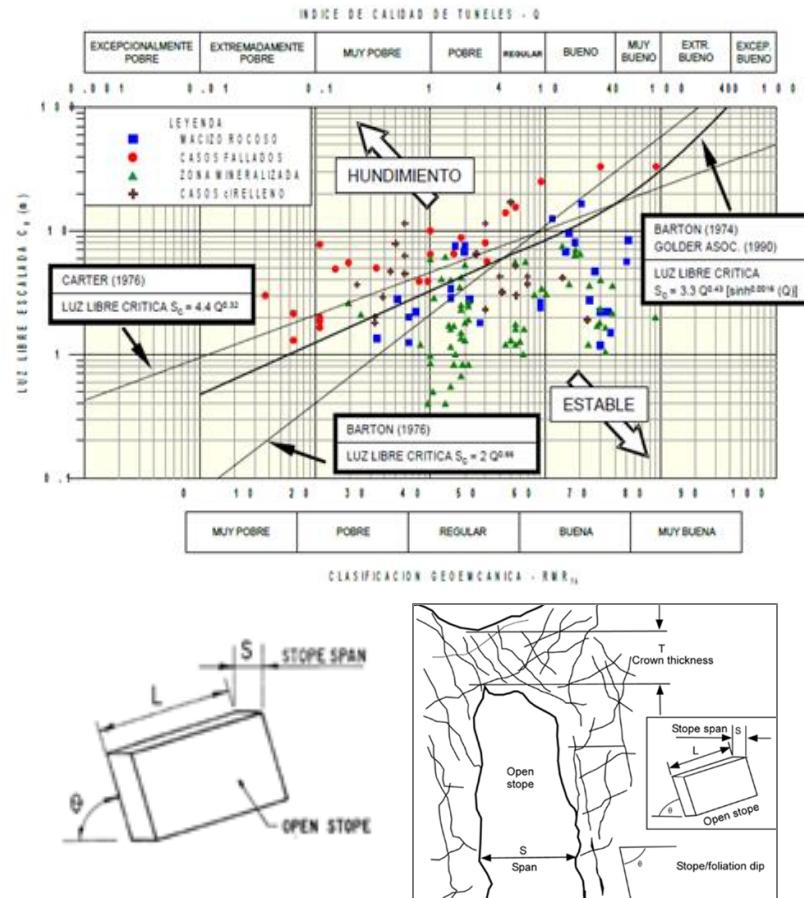
- H Crater depth (crater wall height)
- h Average height of the column of broken rock
- A_B Area of the base of the crater
- A_S Area of the crater at surface
- α Angle of break
- β Angle of fracture
- t_i Extent of the zone of influence at an elevation z above the base of the crater
- t_c Extent of the cracked zone at surface
- D_C Distance to the main cracks

Fuente: modificado de Karzulovic (1999)

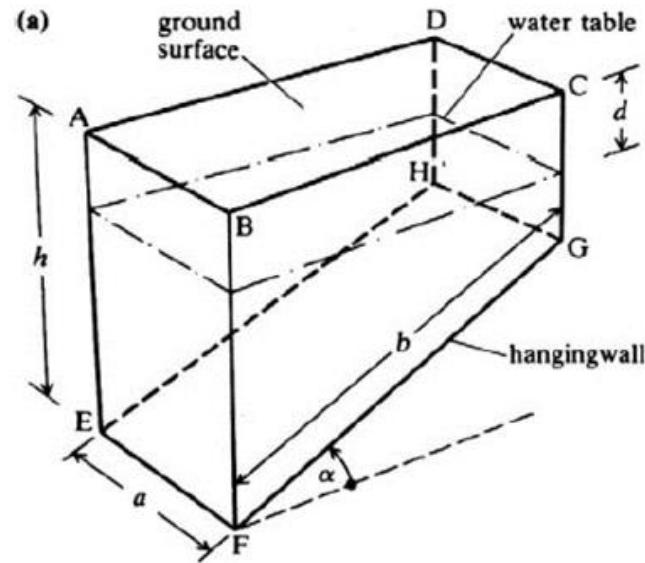


Estado del Arte

Los métodos tradicionales (analíticos y empíricos) deben ser complementados con modelación numérica.

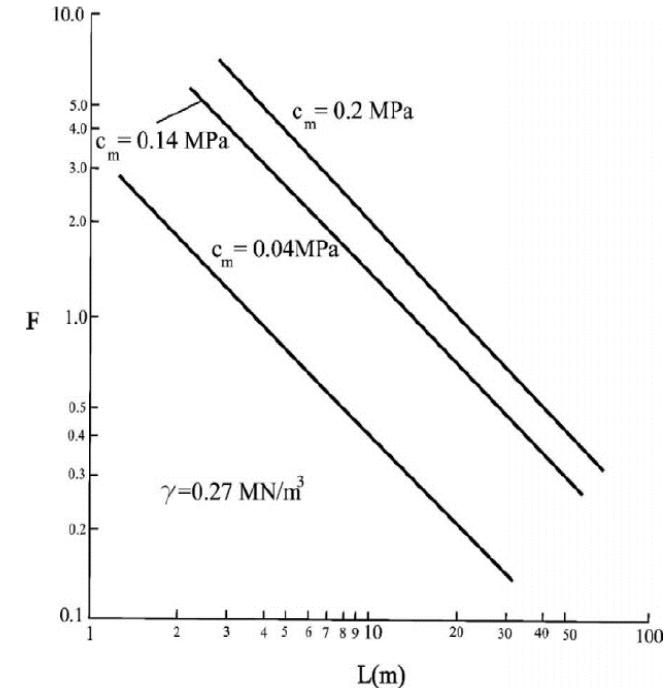


Fuente: Carter & Miller (1995), Carter (2014)

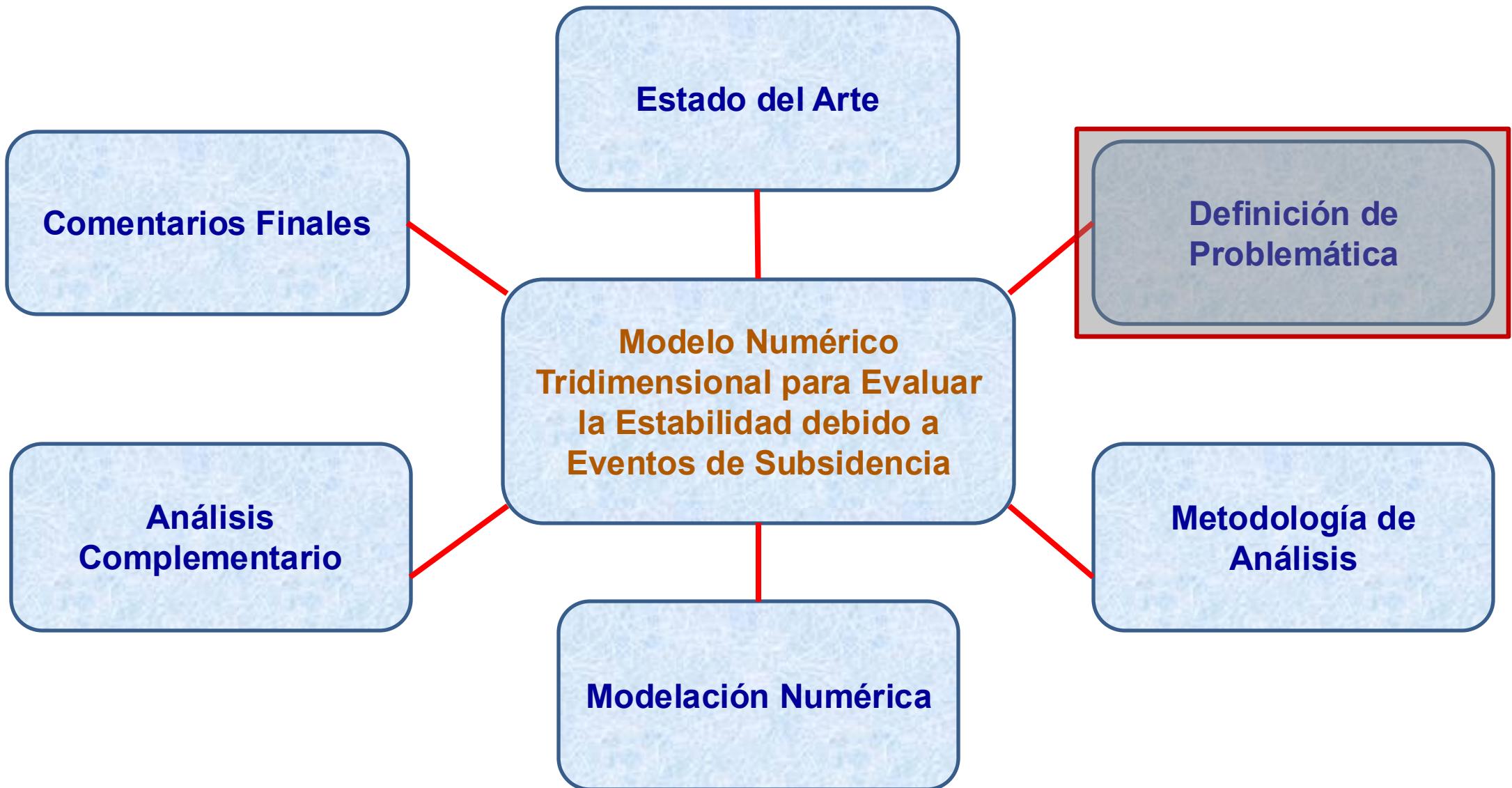


$$F = \frac{2(a+b)A\sigma_c^{1-B}}{\gamma^2 abhk(1+B)} [(k\gamma h - \sigma_{tm})^{1+B} - |\sigma_{tm}|^{1+B}]$$

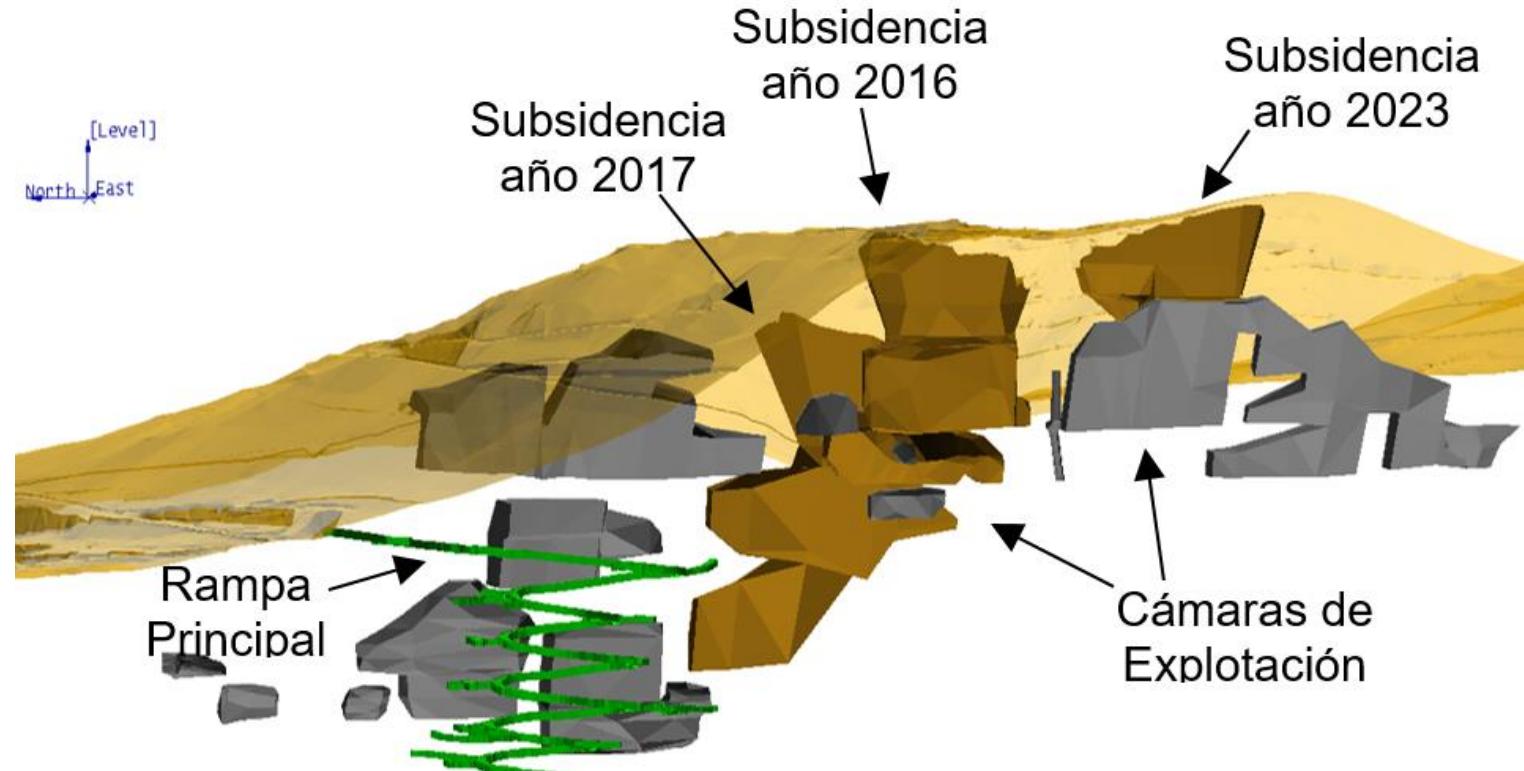
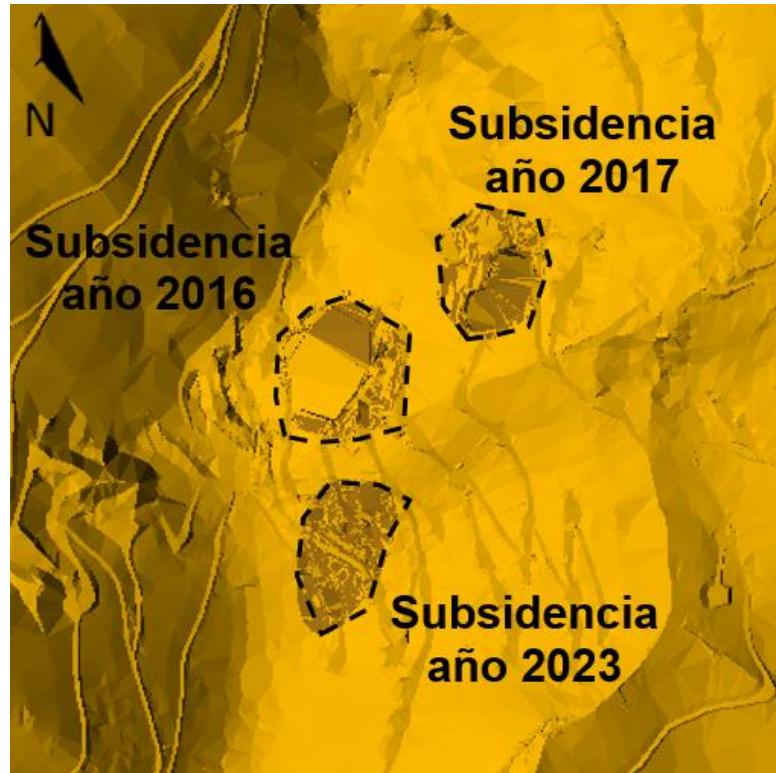
Fuente: Atkinson (1975)



Fuente: Bétourney y otros (1994)

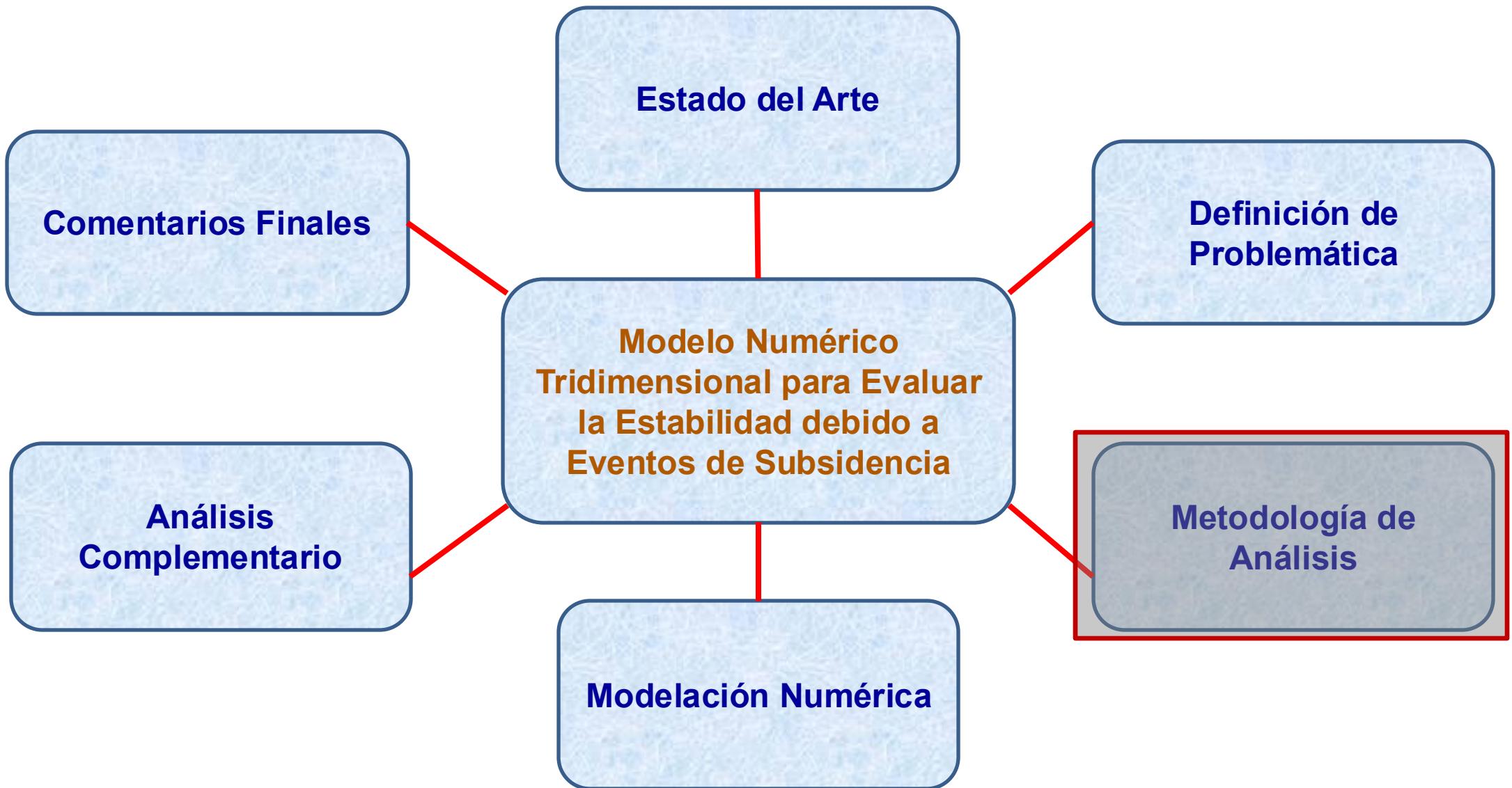


Definición de Problemática



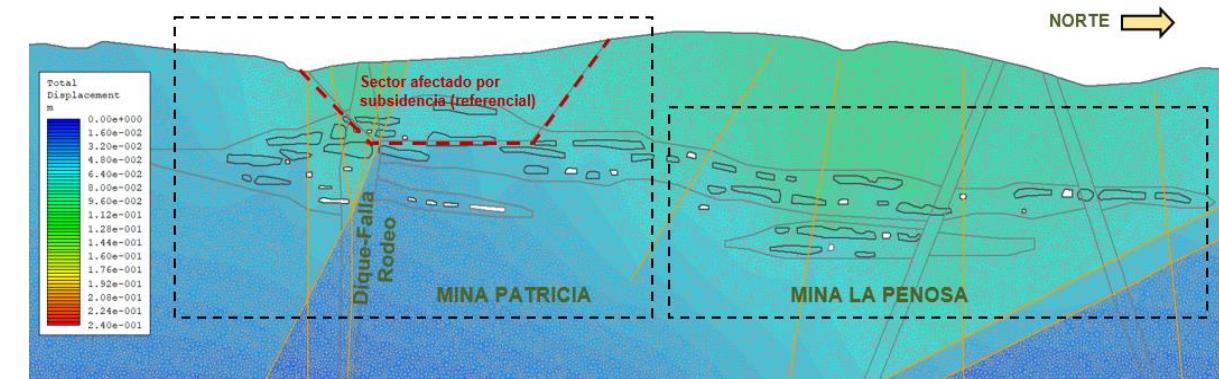
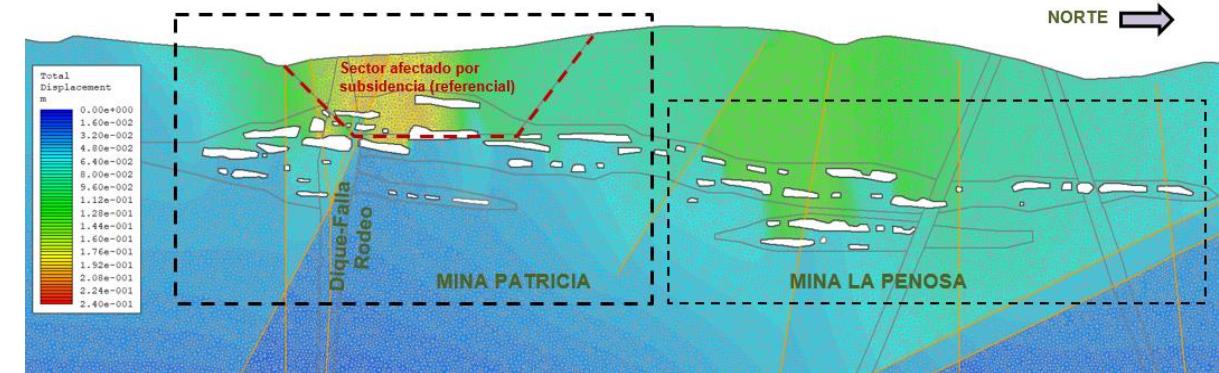
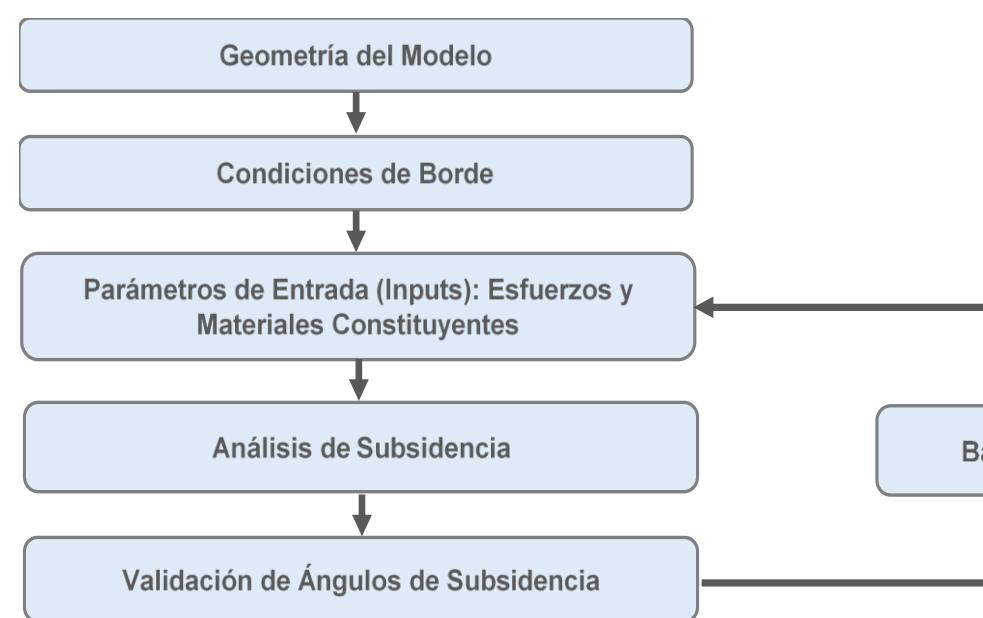
Fuente: FF GeoMechanics (2023)

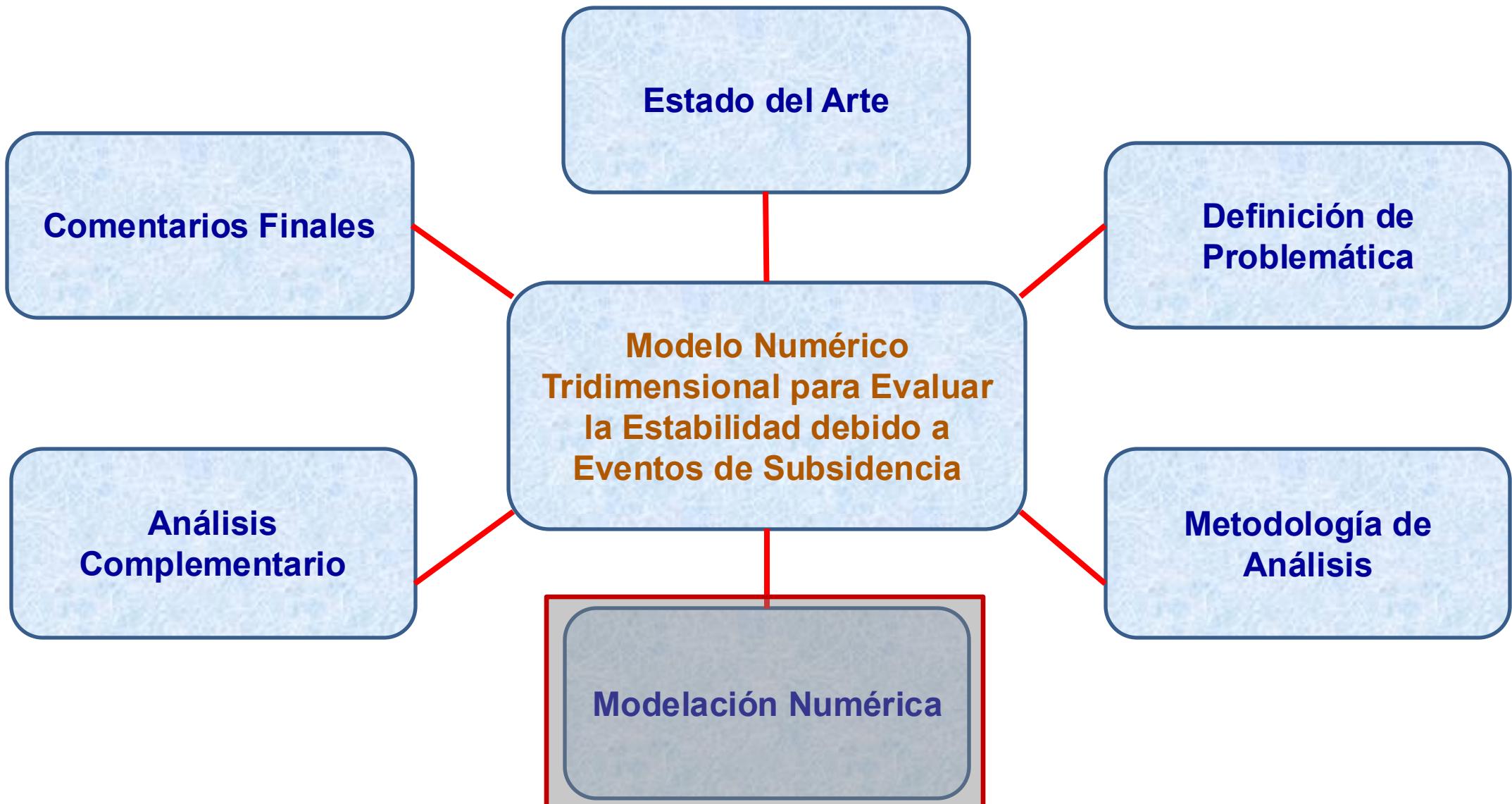
En base a estos eventos de subsidencia:
¿Cuál es el área de restricción o de exclusión en superficie?



Metodología de Análisis

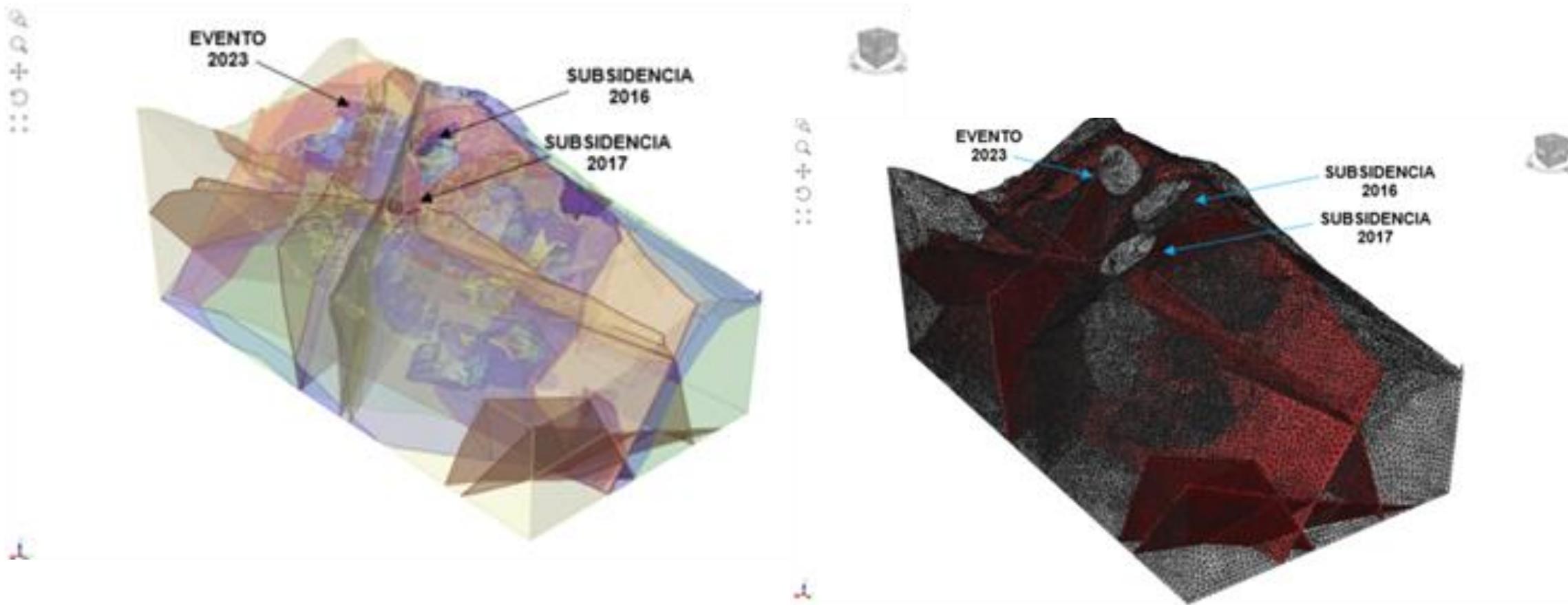
Sustentada en experiencias previas de modelamiento, considerando la deformación del macizo rocoso.





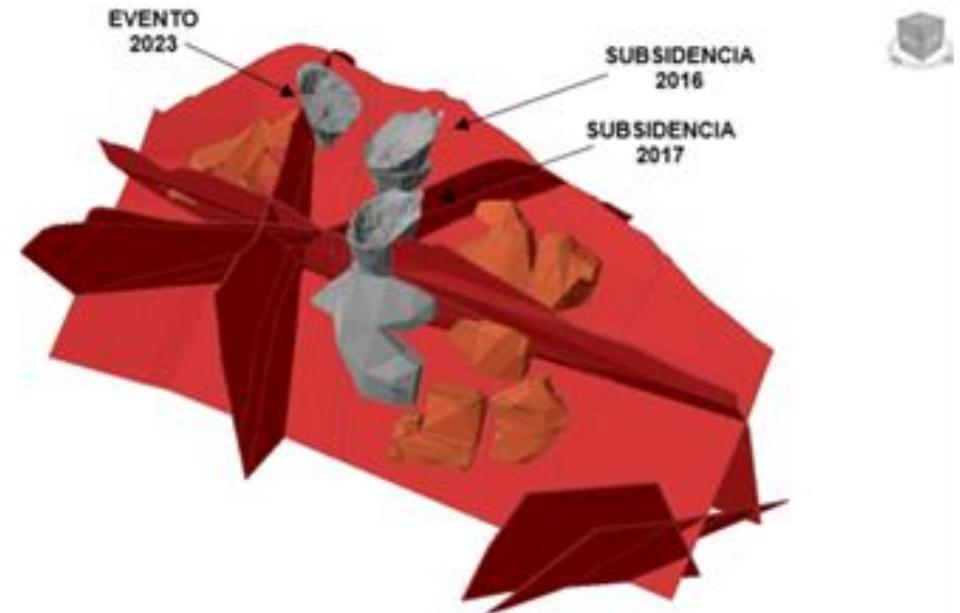
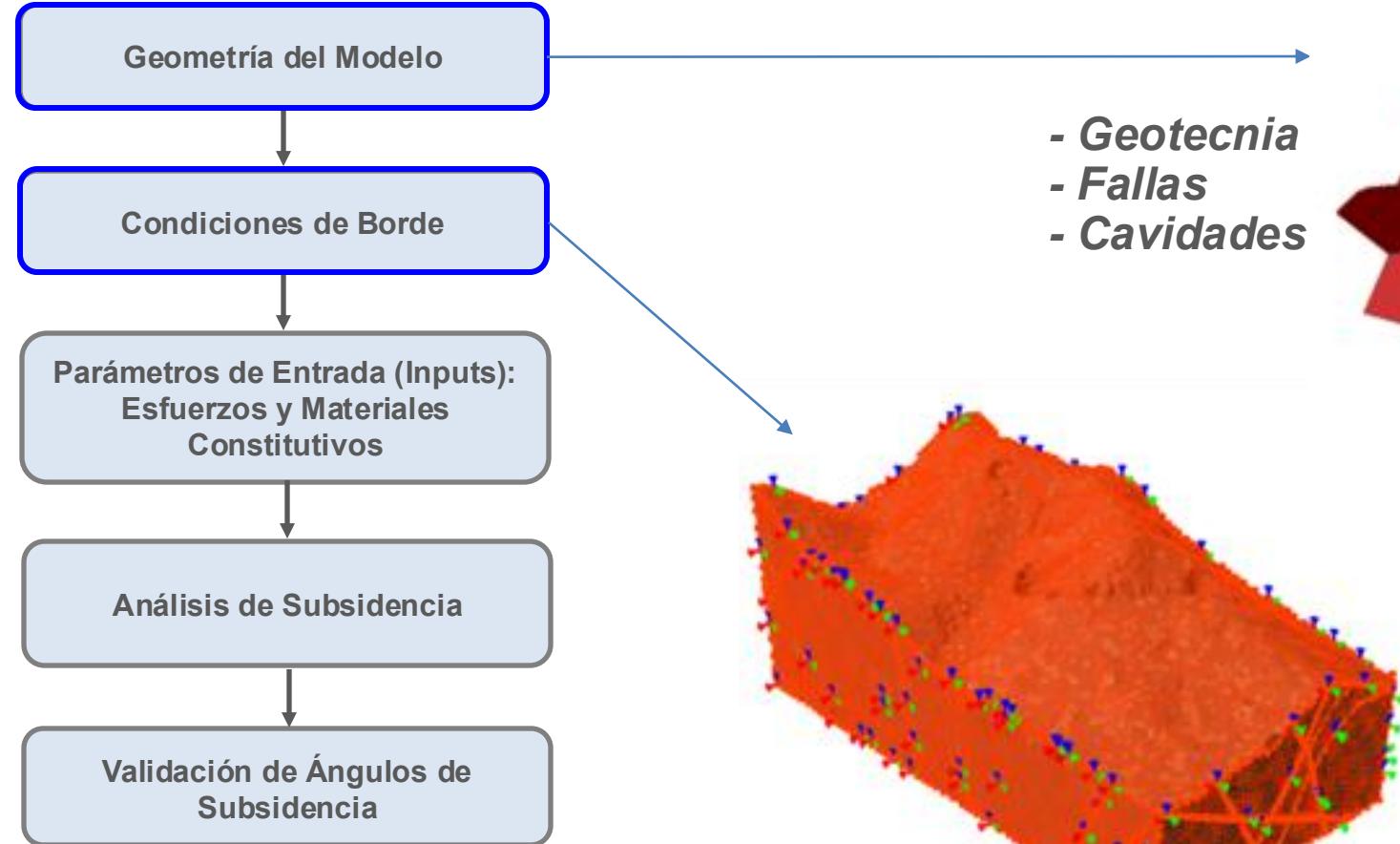
Modelación Numérica

Análisis con software RS3: modelación elástica y elástico-plástica.



Fuente: FF GeoMechanics (2022-2025)

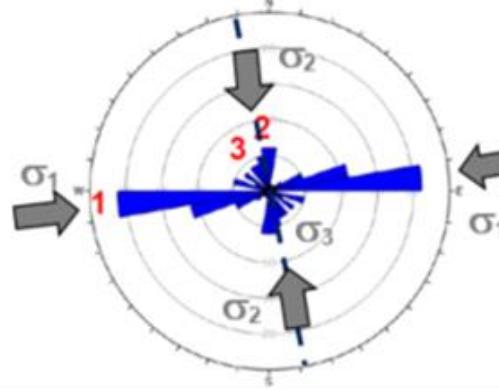
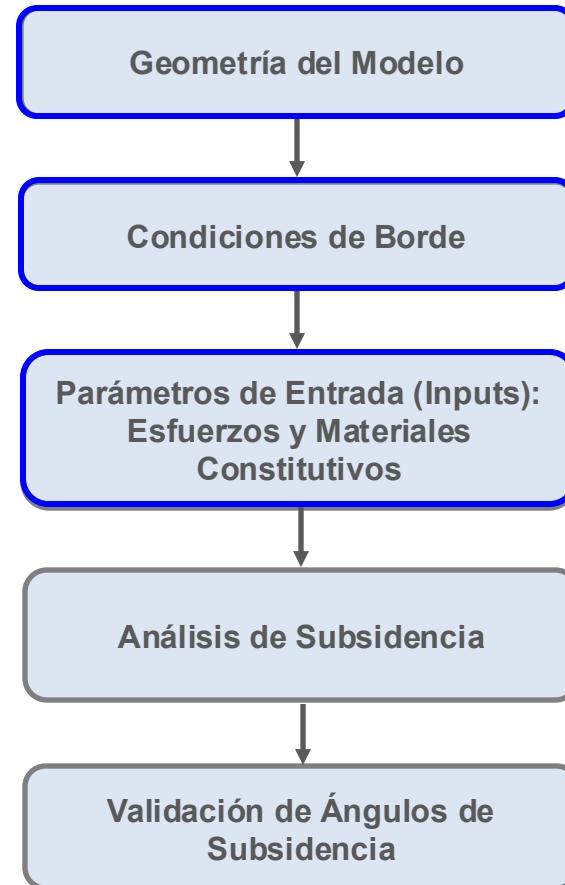
Análisis con software RS3: modelación elástica y elástico-plástica.



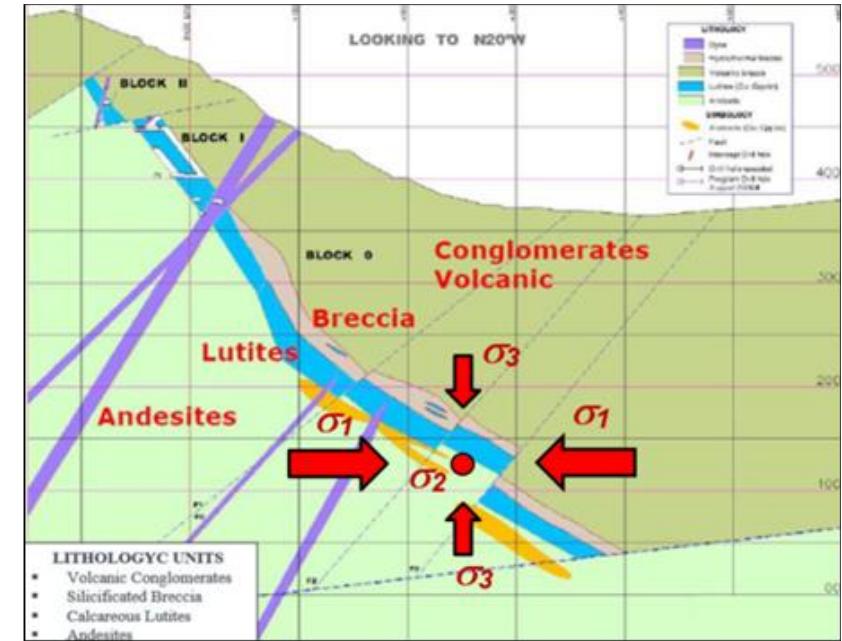
Fuente: FF GeoMechanics (2022-2025)

Modelación Numérica

Análisis con software RS3: modelación elástica y elástico-plástica.



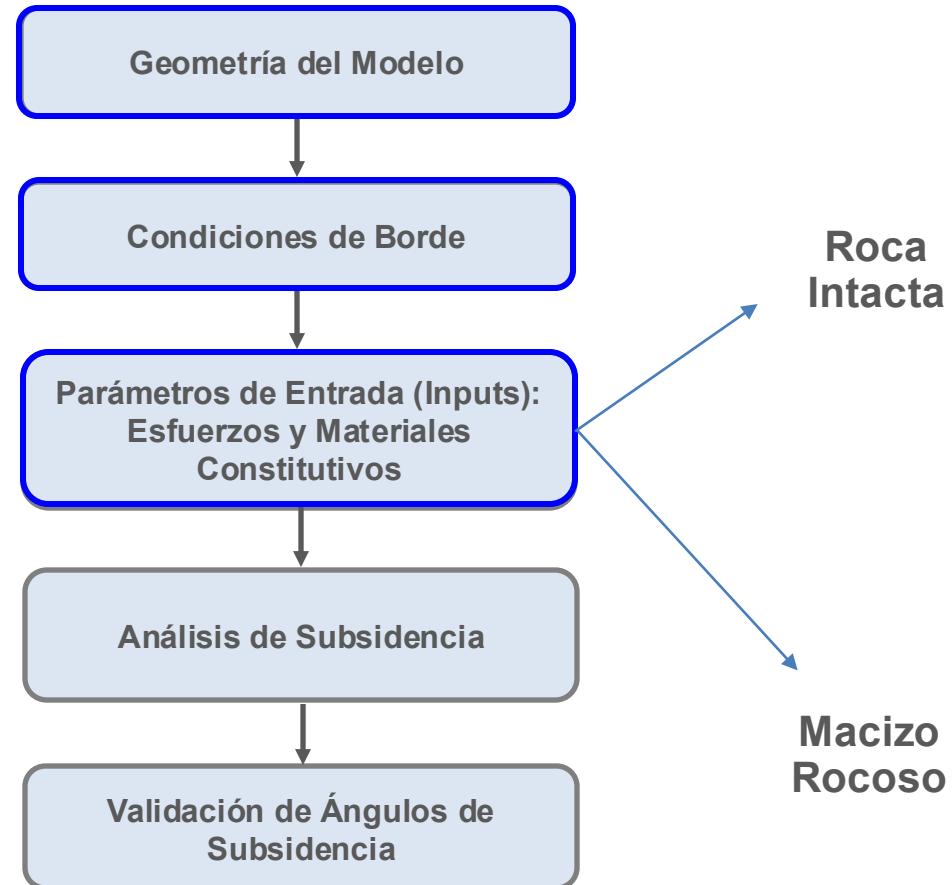
SISTEMA	DIP (°)	DIPDIR (°)
1	87	168
2	89	64
3	65	230



Esfuerzos Principales “In-Situ”	
Magnitud (MPa)	Orientación
$\sigma_1 = \sigma_{xx} = 1.6 \times \sigma_v$	Rumbo E-W
$\sigma_2 = \sigma_{yy} = 1.4 \times \sigma_v$	Rumbo N-S
$\sigma_3 = \sigma_{zz} = 1.0 \times \sigma_v$	Vertical

Fuente: FF GeoMechanics (2022-2025)

Análisis con software RS3: modelación elástica y elástico-plástica.

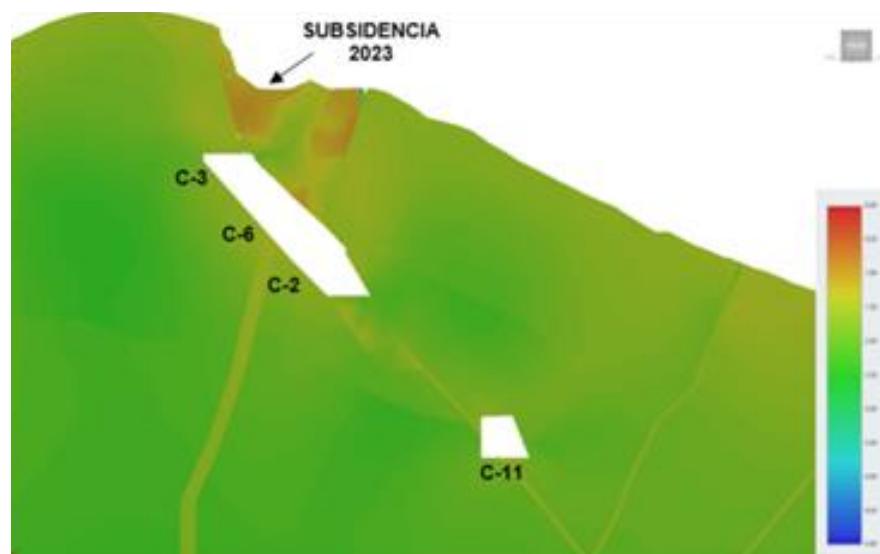
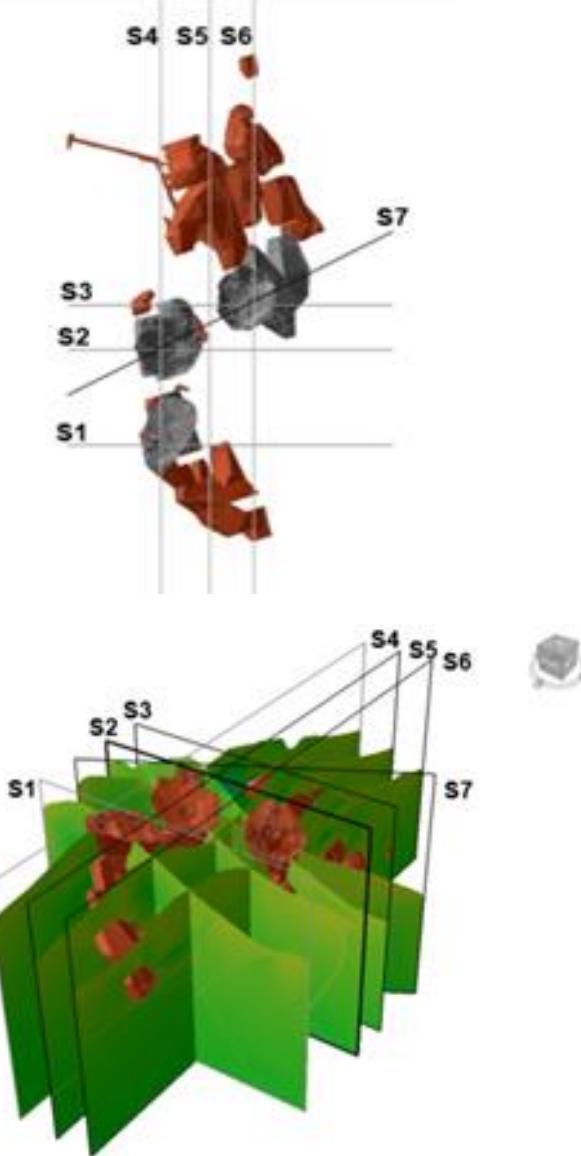
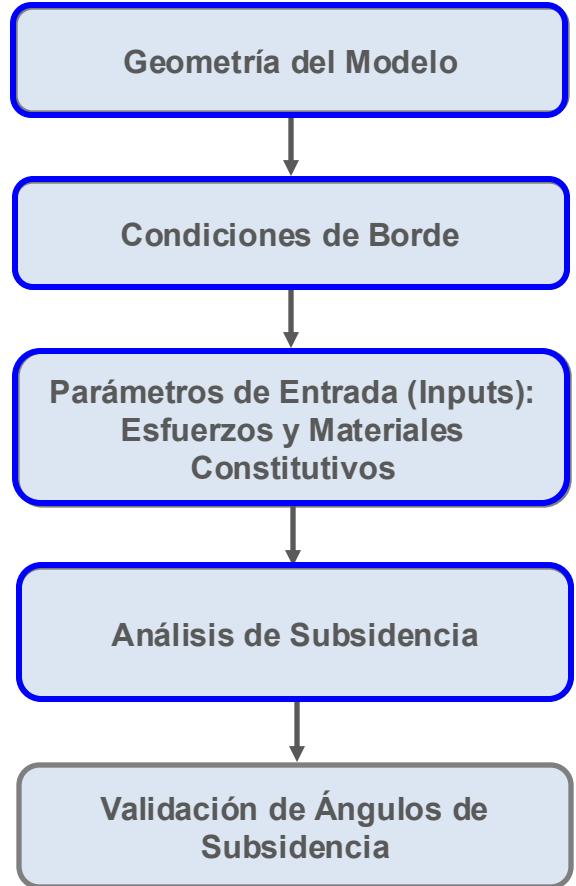


Unidad Geotécnica	UGT-1	UGT-2	UGT-3	UGT-4	UGT-5
Litología	Andesita	Lutita Calcárea	Brecha Volcánica	Dique	Falla y Halo
GSI	55	60	65	52	30
Densidad (g/cm^3)	2.75	2.74	2.63	2.79	2.40
σ_{c50} (MPa)	181*	145	159	149	40
v	0.25	0.27	0.25	0.22	0.35
E_i (GPa)	64	68	51	52	28
m_i	24	14	18	25	10
σ_{c50} : Resistencia a la Compresión			v : Razón de Poisson		
E_i : Modulo de Young			m_i : Parámetro criterio de Hoek & Brown		

Propiedades de Macizo Rocoso (determinadas con software RocData)					
Parámetro	UGT-1	UGT-2	UGT-3	UGT-4	UGT-5
GSI	55	60	65	52	30
m_b	4.81	3.36	5.16	4.50	0.82
s	0.007	0.012	0.021	0.005	0.001
a	0.504	0.503	0.502	0.505	0.522
E_{rm}	26129 MPa	35360 MPa	32217 MPa	17981 MPa	2279 MPa
Símbología y definición de parámetros					
GSI	Índice de Resistencia Geológica (Hoek). Dato de terreno.				
m_b	Parámetro de Hoek-Brown. Peak.				
s	Parámetro de Hoek-Brown. Peak.				
a	Parámetro de Hoek-Brown.				
E_{rm}	Módulo de elasticidad (Young).				

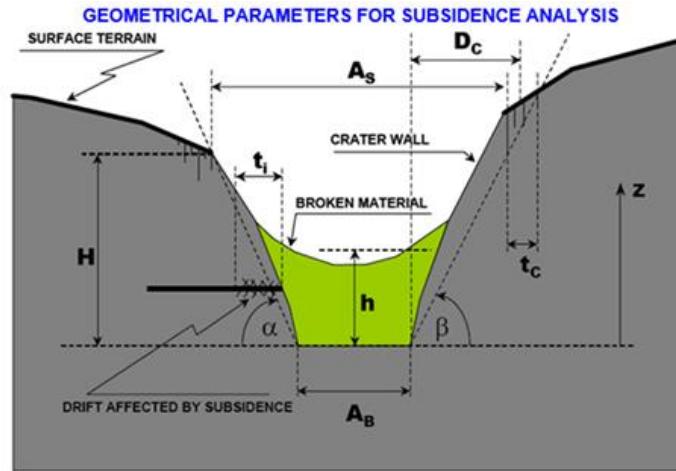
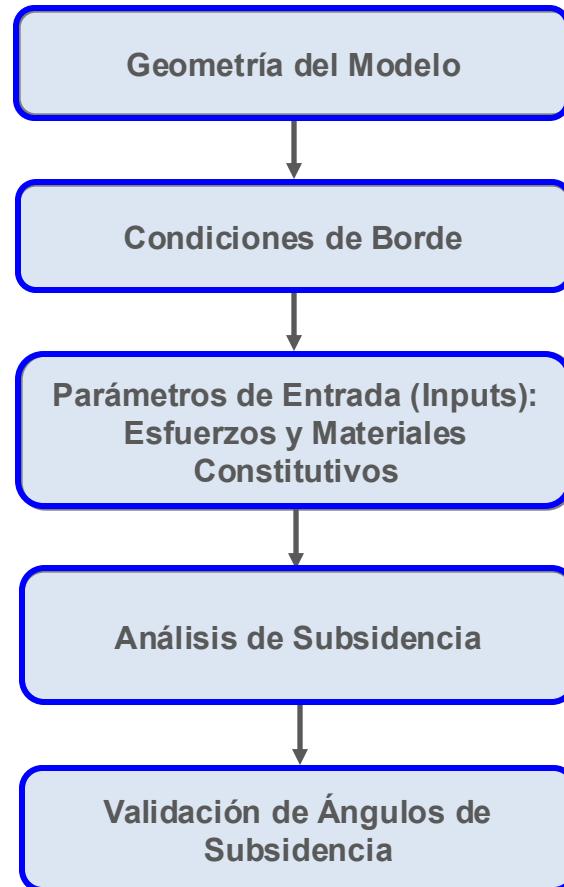
Fuente: FF GeoMechanics (2022-2025)

Modelación Numérica

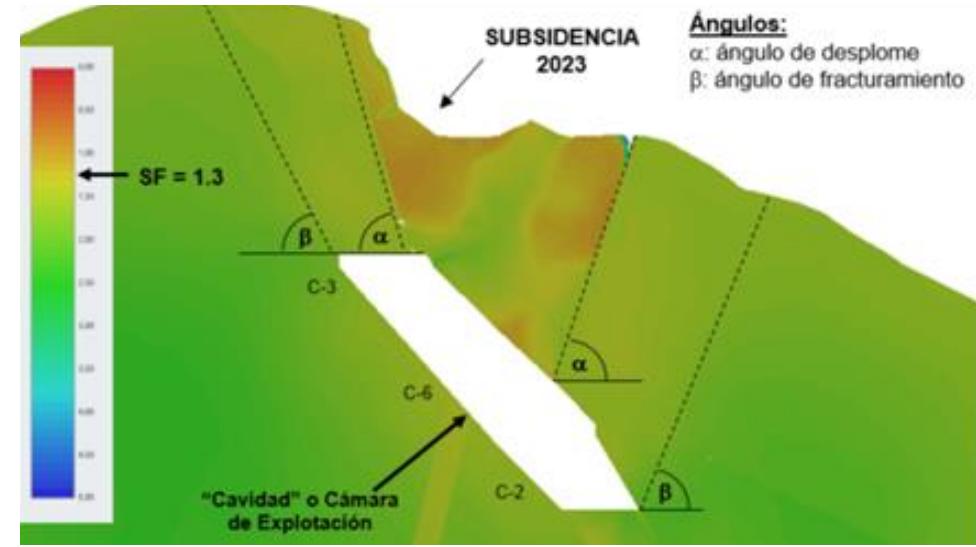


Fuente: FF GeoMechanics (2024)

Modelación Numérica



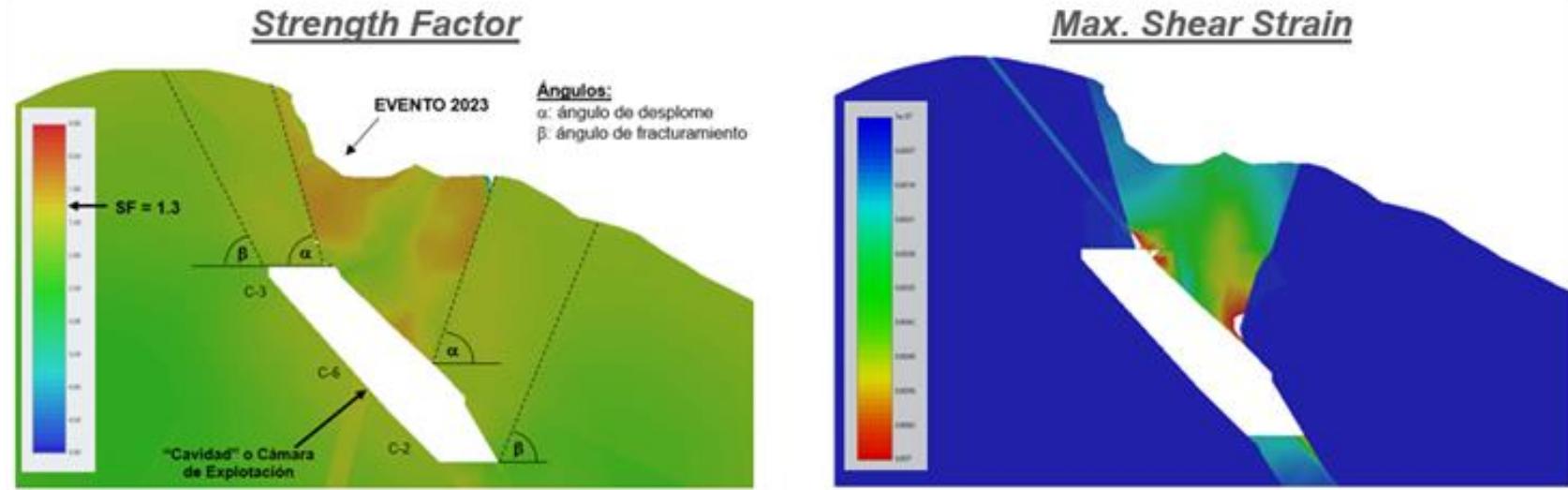
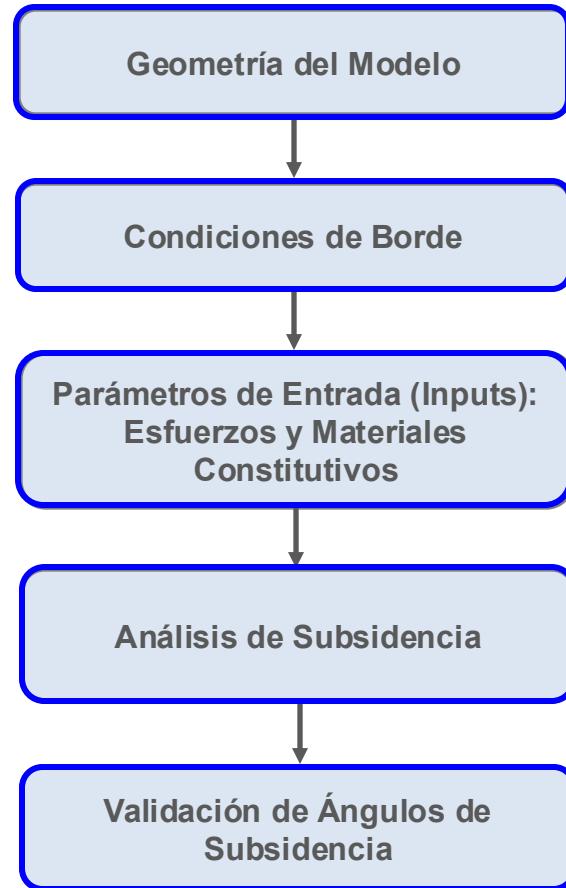
- H Crater depth (crater wall height)
- h Average height of the column of broken rock
- Ab Area of the base of the crater
- As Area of the crater at surface
- α Angle of break
- β Angle of fracture
- t_i Extent of the zone of influence at an elevation z above the base of the crater
- t_c Extent of the cracked zone at surface
- D_c Distance to the main cracks



Ángulos:
 α : ángulo de desplome
 β : ángulo de fracturamiento

Las zonas de daño permiten definir los ángulos de quiebre y fracturamiento asociados al fenómeno de subsidencia.

Modelación Numérica



Las zonas de daño permiten definir los ángulos de quiebre y fracturamiento asociados al fenómeno de subsidencia.

Las deformaciones obtenidas a través de modelos elástico-plásticos se comparan con los "SF" de los modelos elásticos para la determinación de los ángulos de subsidencia.

Modelación Numérica

Geometría del Modelo

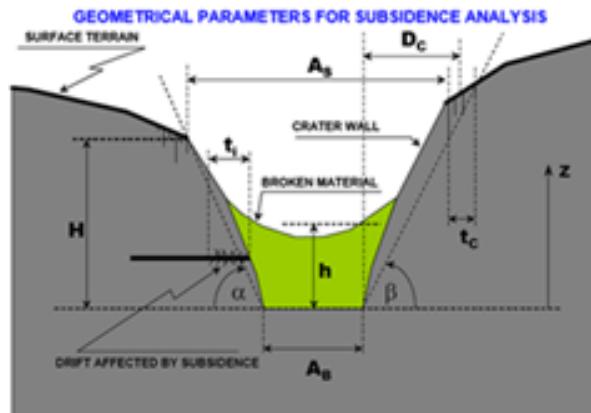
Condiciones de Borde

Parámetros de Entrada (Inputs):
Esfuerzos y Materiales
Constitutivos

Análisis de Subsidencia

Validación de Ángulos de
Subsidencia

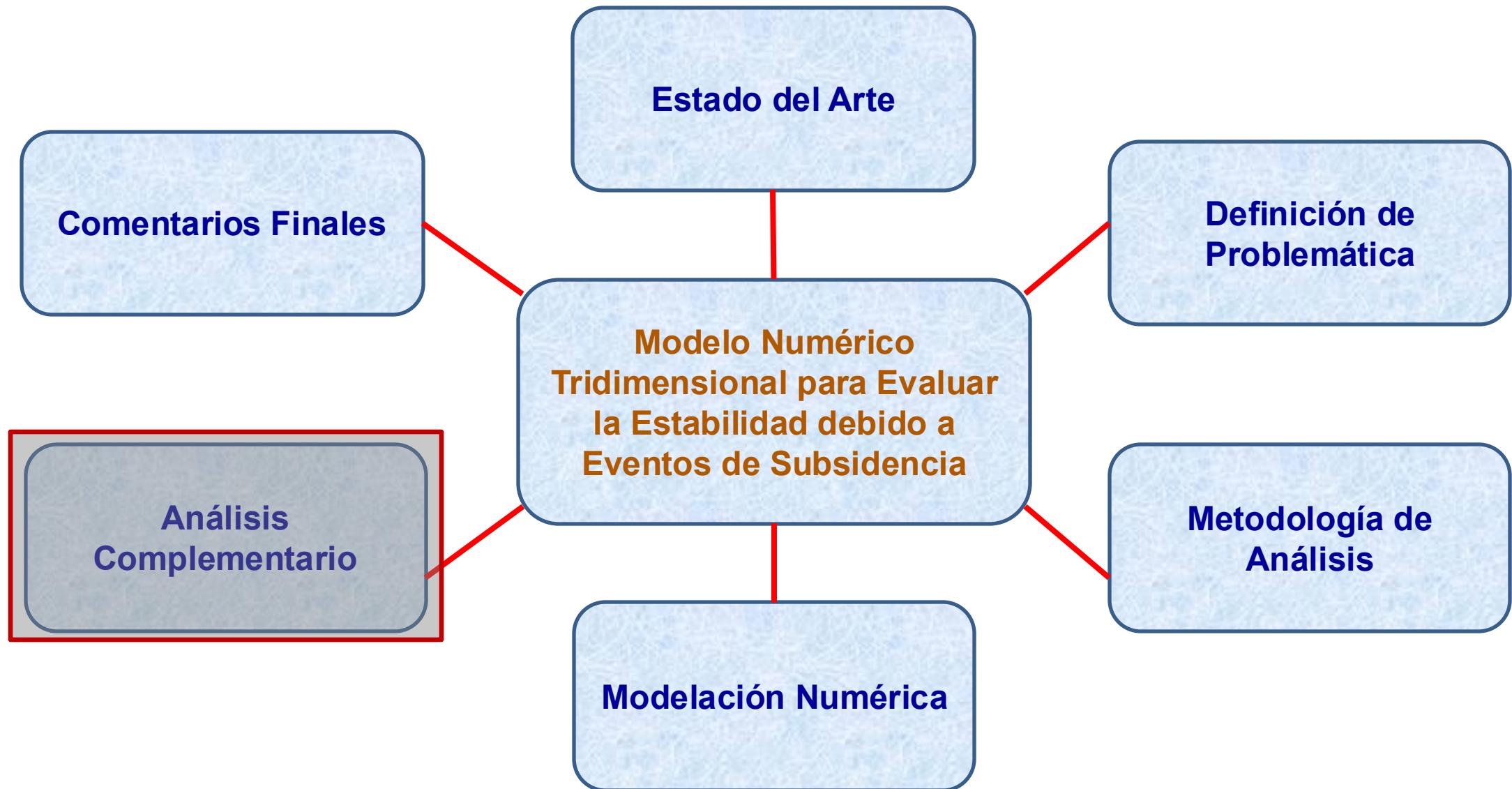
Resultados de Modelo Numérico



- H Crater depth (crater wall height)
h Average height of the column of broken rock
 A_B Area of the base of the crater
 A_S Area of the crater at surface
 α Angle of break
 β Angle of fracture
 t_i Extent of the zone of influence at an elevation z above the base of the crater
 t_c Extent of the cracked zone at surface
 D_c Distance to the main cracks

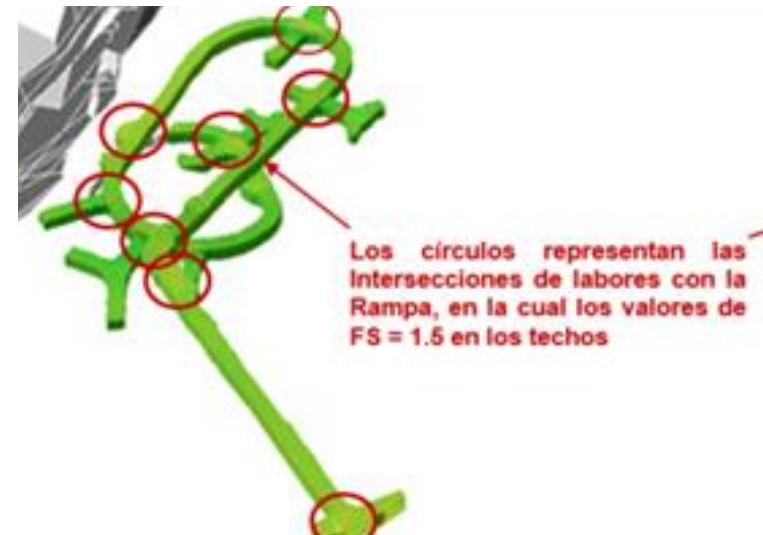
Sección de Análisis	Pared Oeste (W)		Pared Este (W)	
	α	β	α	β
S1	78°	65°	78°	65°
S2	70°	60°	80°	60°
S3	70°	62°	80°	65°
Sección de Análisis	Pared Sur (S)		Pared Norte (N)	
	α	β	α	β
S4	78°	70°	80°	60°
S5	No se visualizan los cráteres de subsidencia en esta sección.			
S6	75°	55°	80°	62°
Sección de Análisis	Pared Suroeste (SW)		Pared Noreste (NE)	
	α	β	α	β
S7	74°	65°	75°	60°

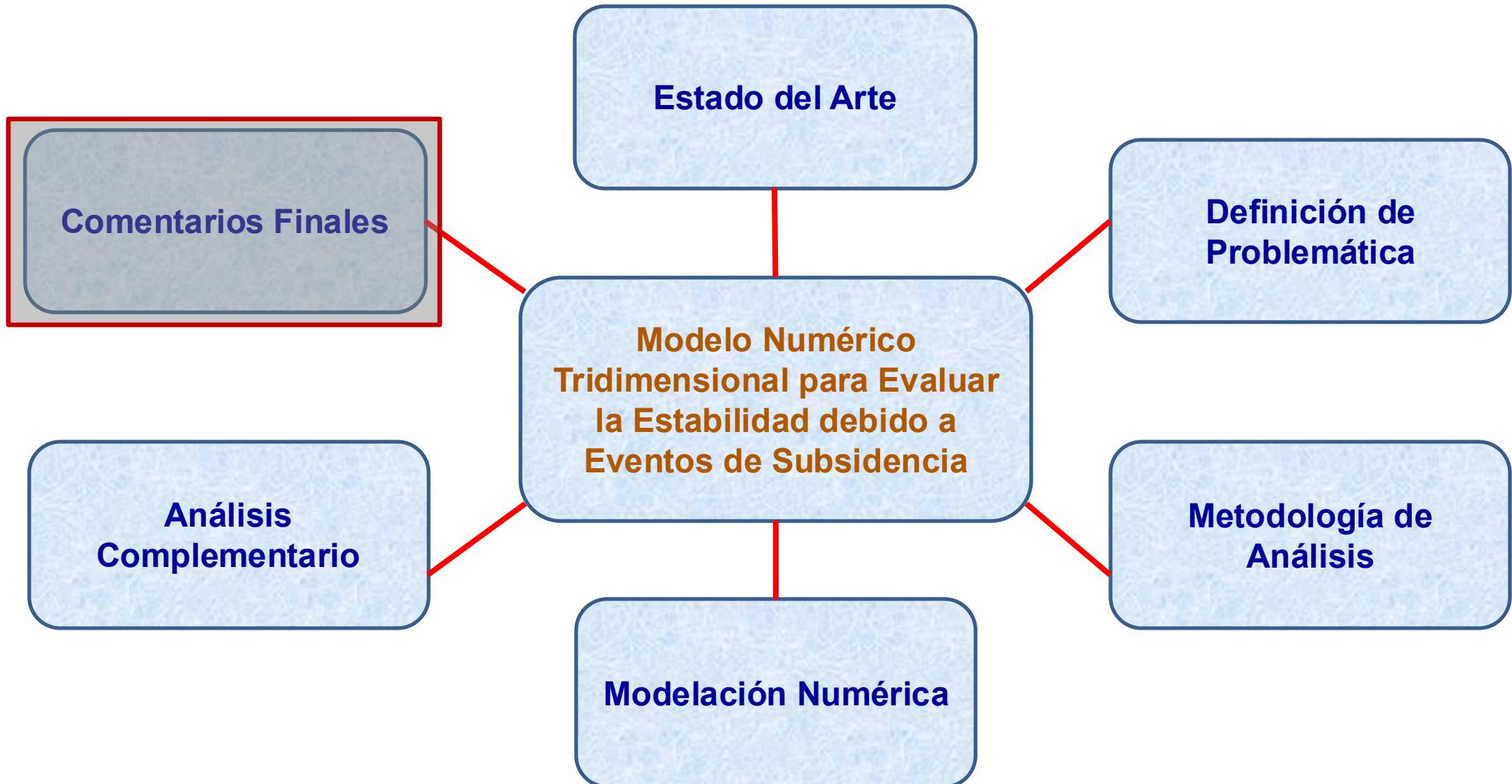
Los modelos permiten estimar los ángulos de subsidencia, y a través de éstos, se define la Zona de Exclusión o Restricción en superficie.



Análisis Complementario

Se analiza la condición de estabilidad de la Rampa de Acceso debido al evento de subsidencia ocurrido el año 2023.





Comentarios Finales

- El gran problema de este tipo de fenómeno se asocia a mecanismos no controlados, debido a la conexión entre las explotaciones subterráneas y la superficie, como consecuencia de la fractura y quiebre de la columna del macizo rocoso.
- Los análisis desarrollados a través de técnicas numéricas tridimensionales, descritos en esta publicación técnica, se han sustentado en la construcción de un modelo geotécnico-estructural generado a través de mapeos geotécnicos, ensayos de laboratorio de mecánica de rocas y registros de daños en interior y exterior mina.
- De esta forma, a partir de información geotécnica confiable, y mediante modelos numéricos, se obtienen ángulos de subsidencia que determinan las zonas de quiebre y fractura del macizo rocoso, las cuales permiten definir las áreas de exclusión y/o restricción de acceso y emplazamiento de infraestructura subterránea y de superficie.



MUCHAS GRACIAS

Fernando Fernández Lagazio