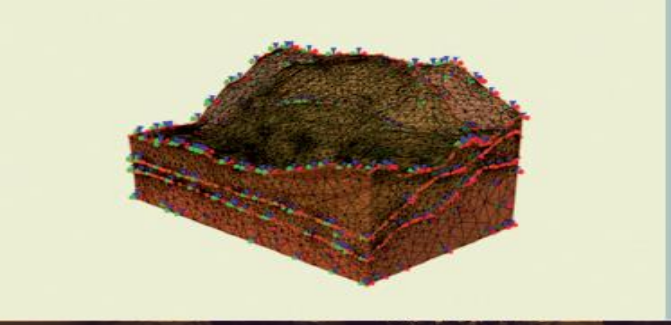
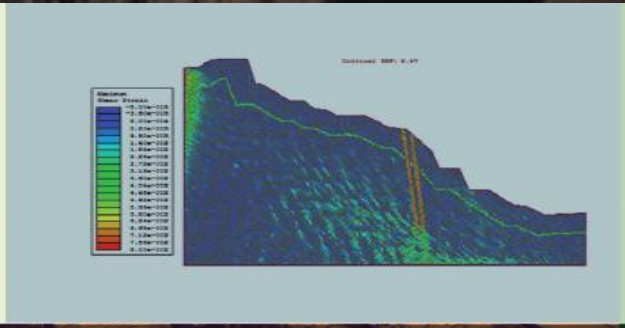
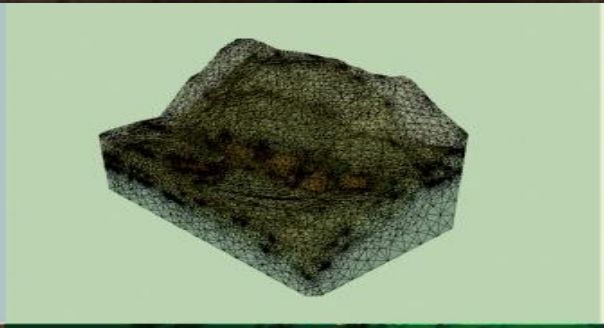
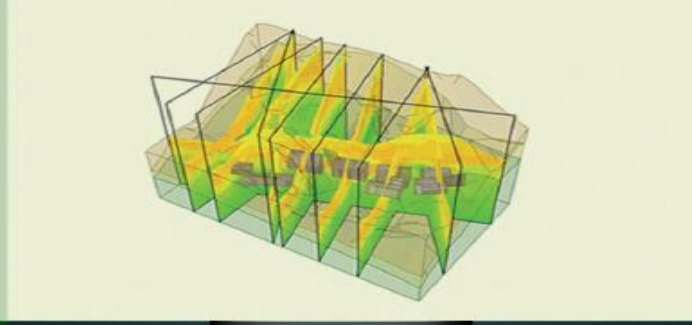
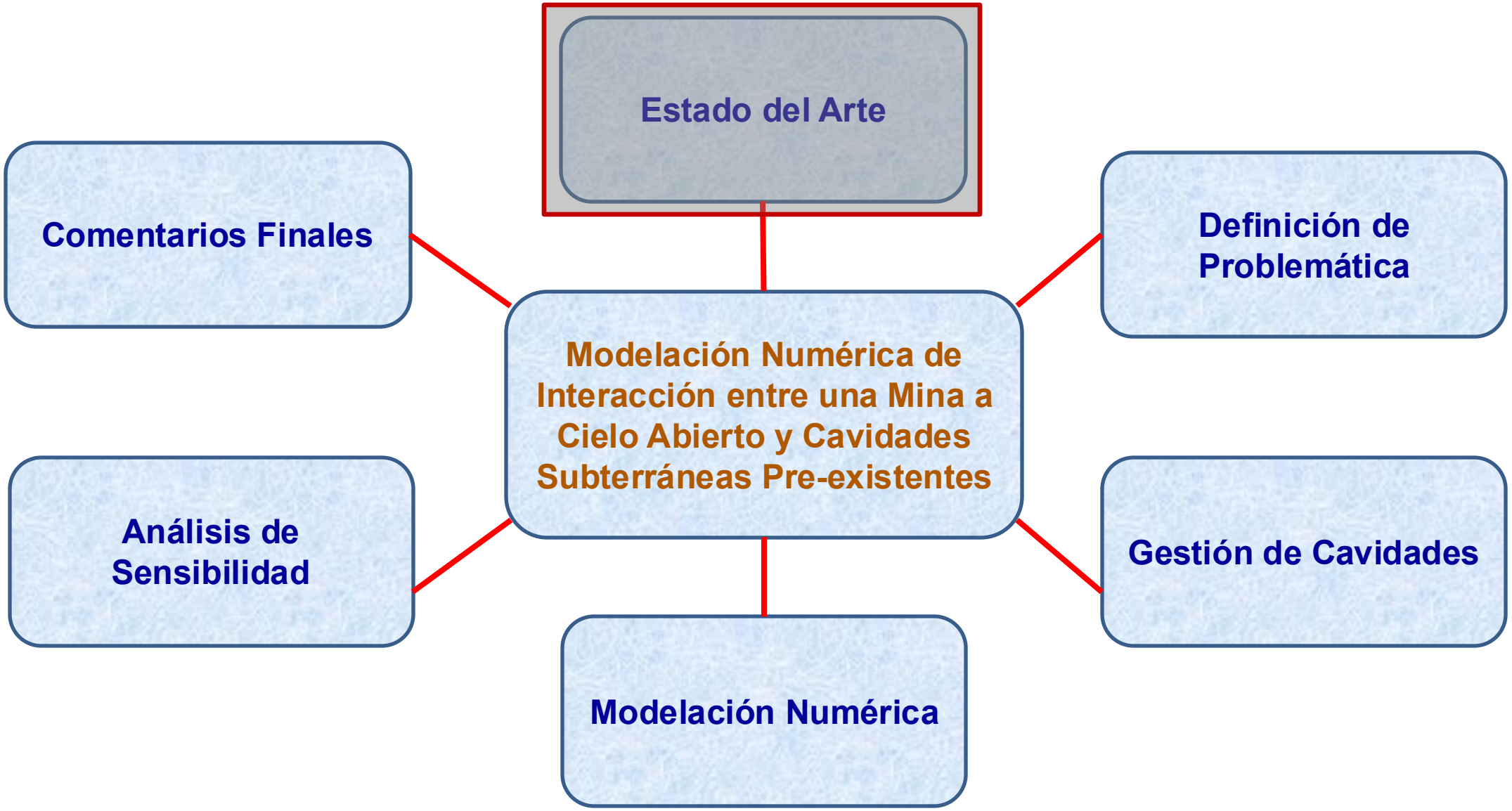
FF GeoMechanics

Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes

XXXVI CONVENCIÓN INTERNACIONAL DE MINERÍA ACAPULCO 2025
LA MINERÍA UNIDA POR MÉXICO

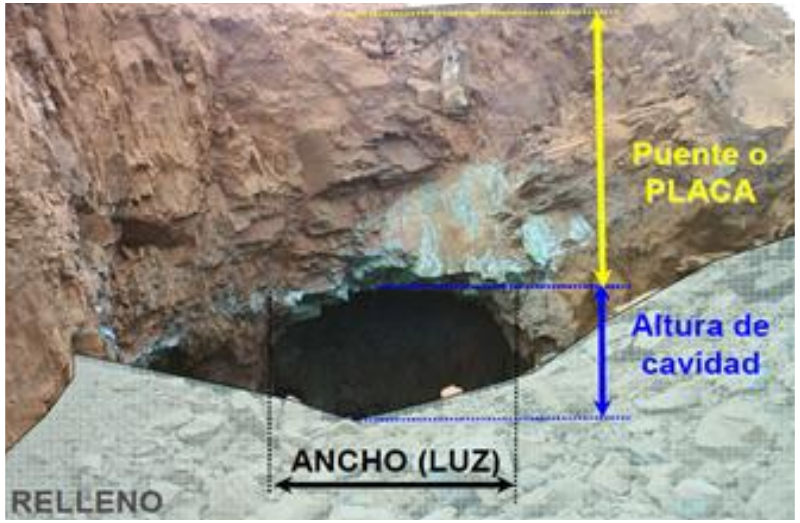





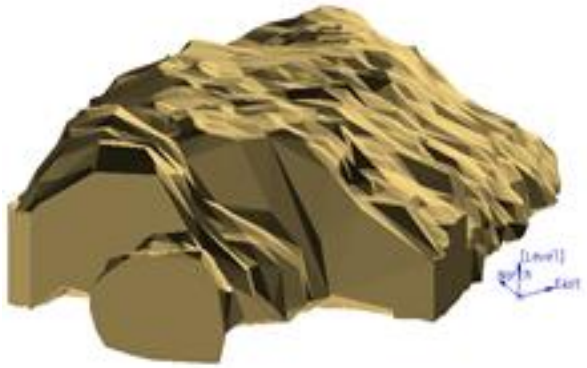
Fernando Fernández Lagazio
Dr Ing, MSc. Mining Geomechanics

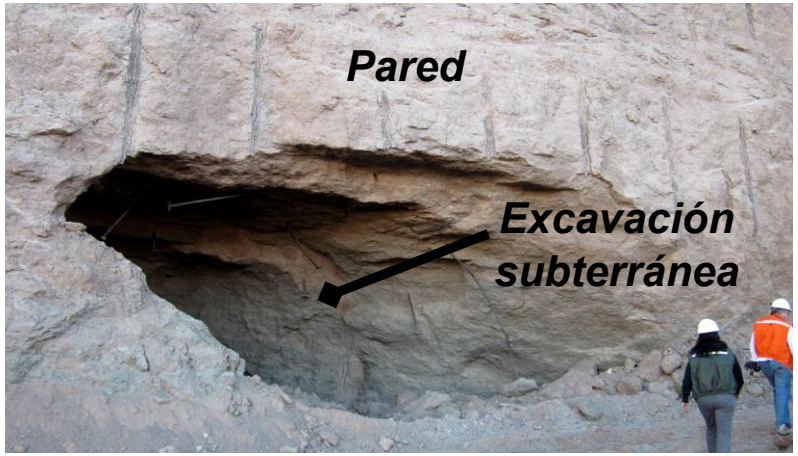

Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

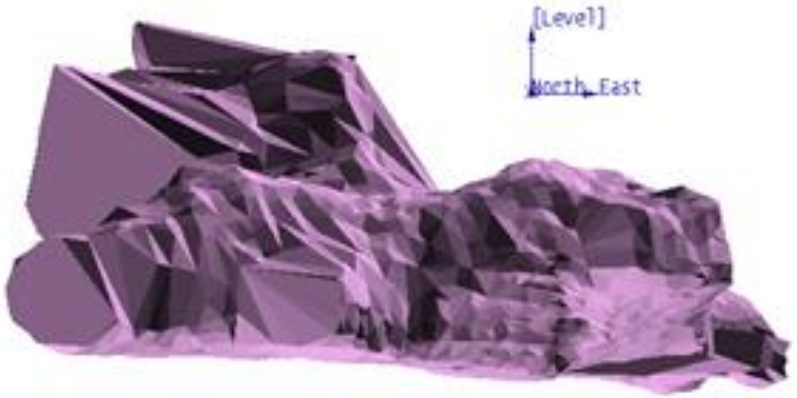
Estado del Arte

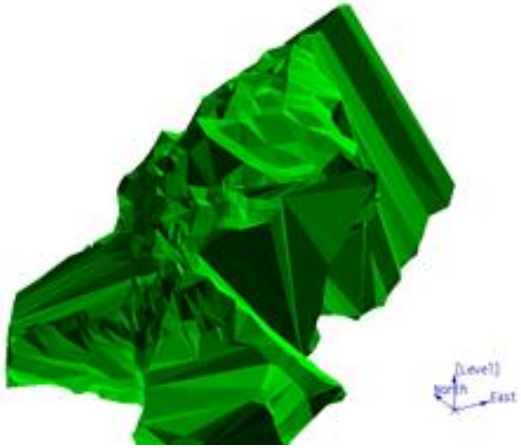
Muchas minas de tipo Open Pit se encuentran afectadas por cavidades subterráneas asociadas a trabajos históricos….





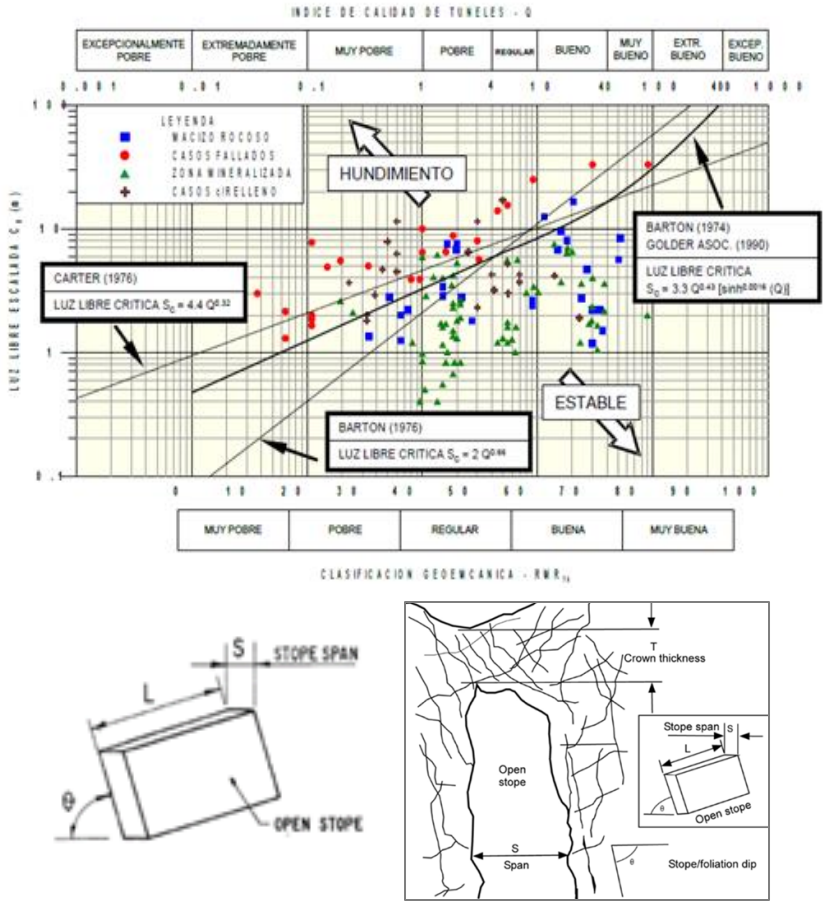




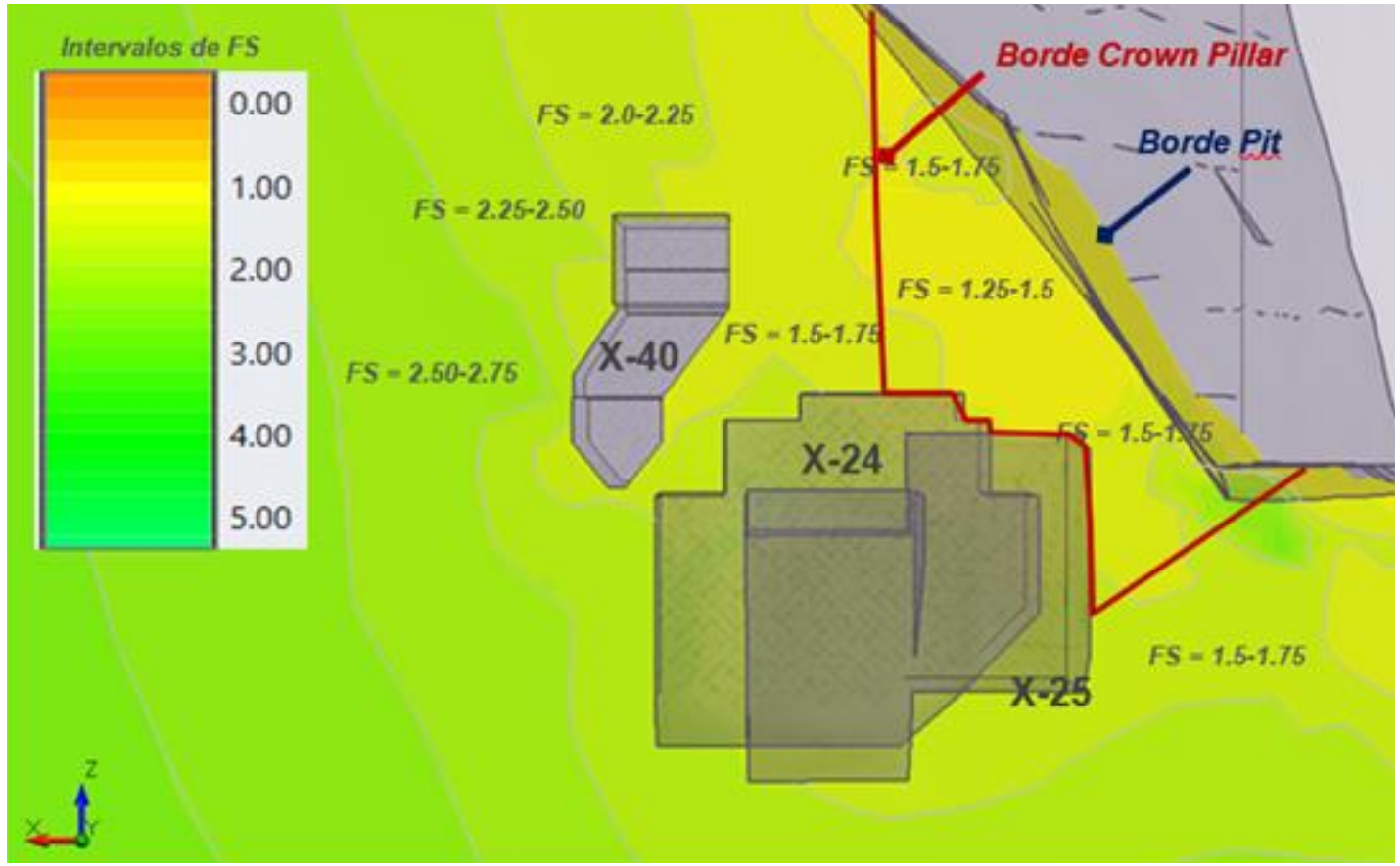


Estado del Arte

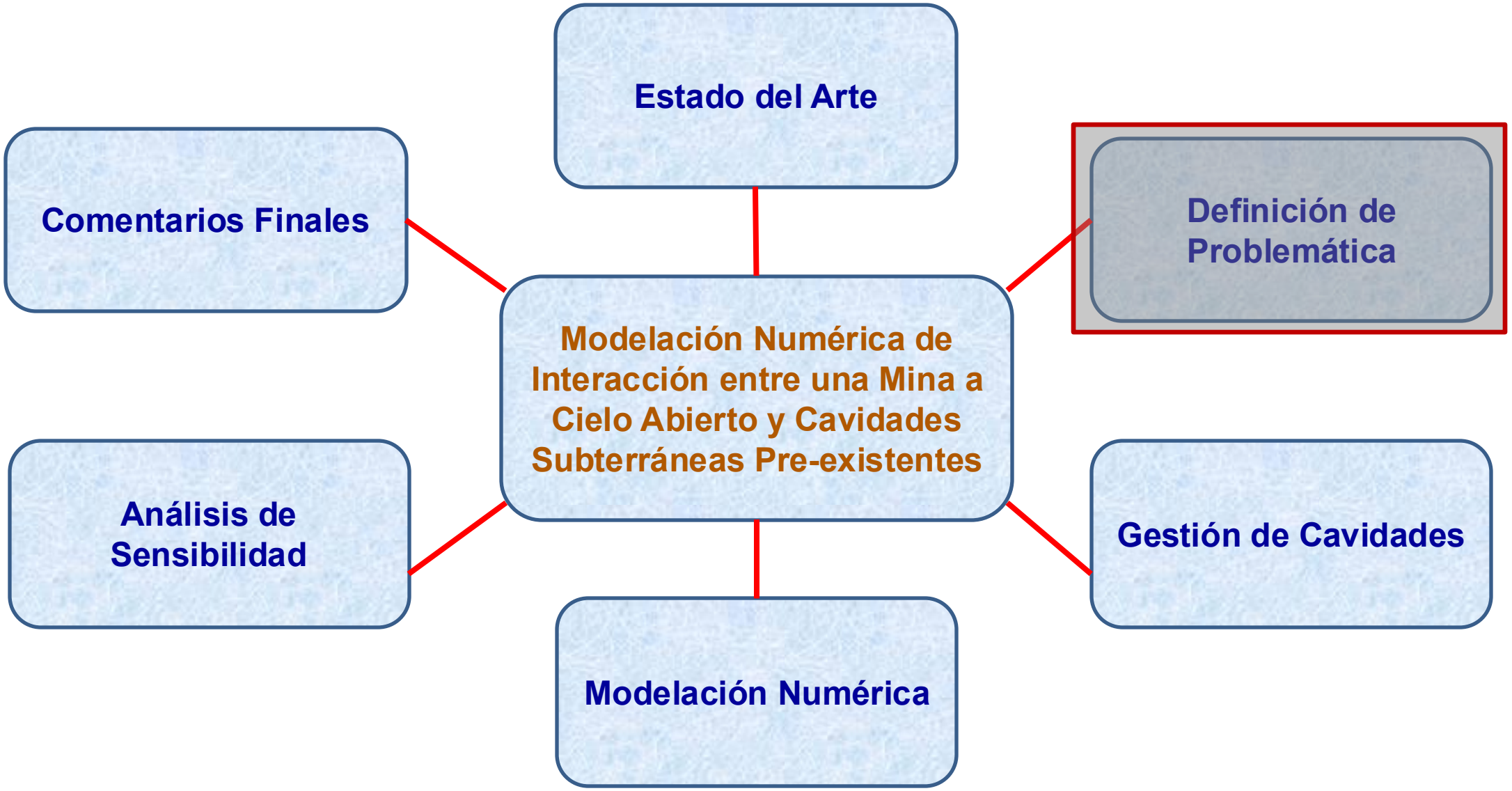
Debido a la complejidad de los problemas de interacción, los métodos empíricos tradicionales deben ser complementados con técnicas de modelación numérica.



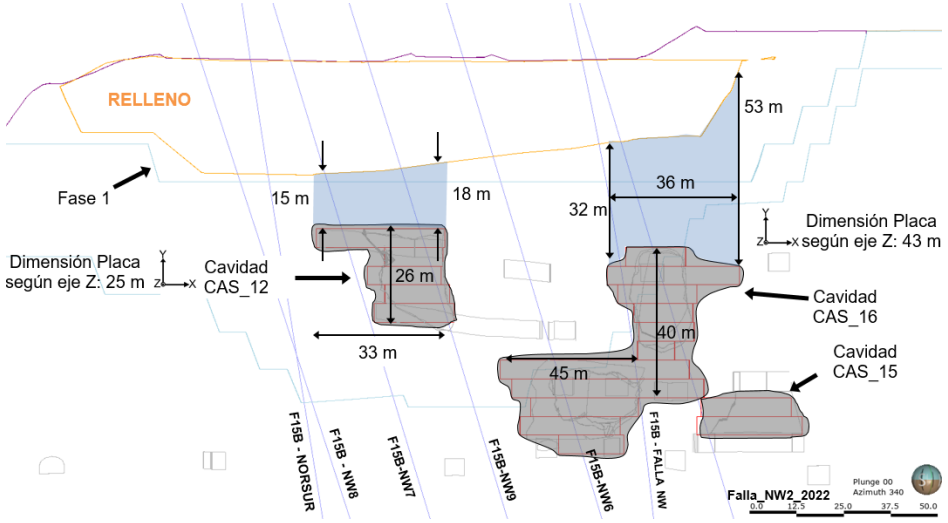
Fuente: Carter & Miller (1995), Carter (2014)

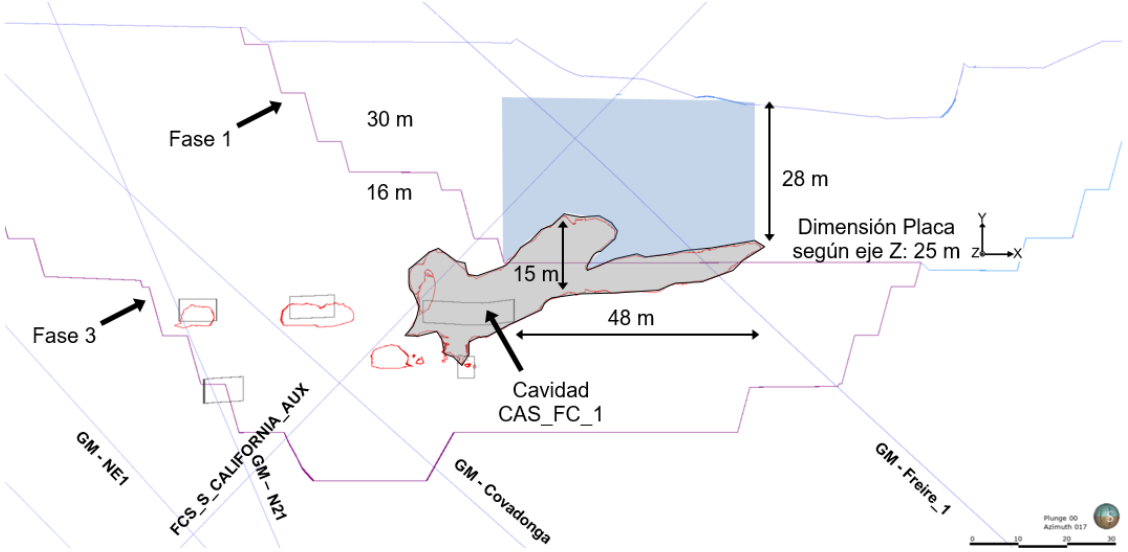


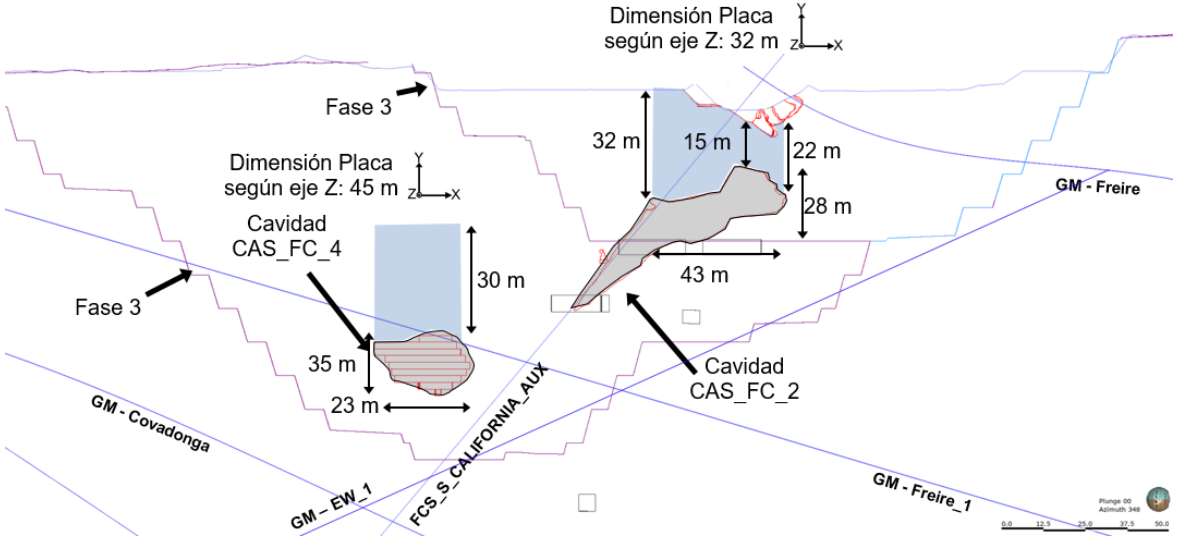
Fuente: FF GeoMechanics (2020)


Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

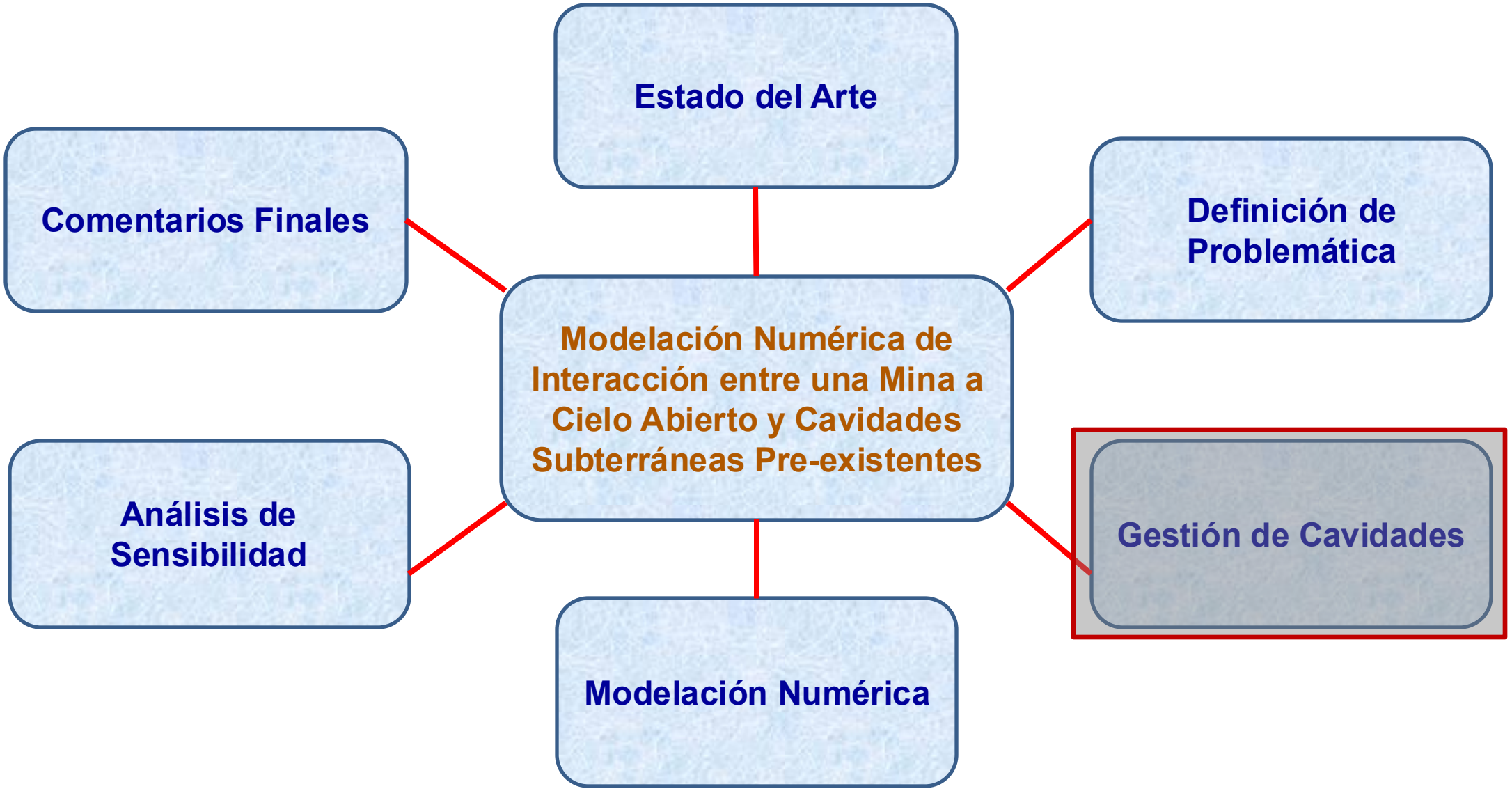
Definición de Problemática







Fuente: FF GeoMechanics (2025)


Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

Gestión de Cavidades

Estrategia General: Manejo y Control de Cavidades

I.-Etapa: Identificación y análisis Macro de zonas de Cavidades.

Desde la información extraída del programa mensual de Producción, se deben enunciar las zonas de relleno, cavidades, posibles zonas de riesgo, etc. Además de las placas a abordar durante la explotación del rajo en el mes programado.

II.-Etapa: Traspaso de Información a Ing. de Corto Plazo

Ingeniería de corto plazo, incluye dentro del plano de avance mina, la información proveída por geomecánica, referente al status de las cavidades presentes en el rajo. Esta etapa tiene por objeto divulgar esta información a todas las empresas colaboradoras que operan en el rajo.

III.-Etapa: Tiros de auscultación

El objeto de los tiros de Auscultación es verificar la información proveída por el modelo de cavidades. Dentro de esta etapa **el traspaso de información es decisiva,** siendo vital recoger datos como:

- Espesor de placa (mts)
- Condición del pozo (Rompe, No Rompe, Relleno)
- Altura de Cavidad (mts)

IV.-Etapa: Nota Técnica.

Corresponde al resumen de los datos entregados por los tiros de auscultación, en este documento se incluye la sgte. información:

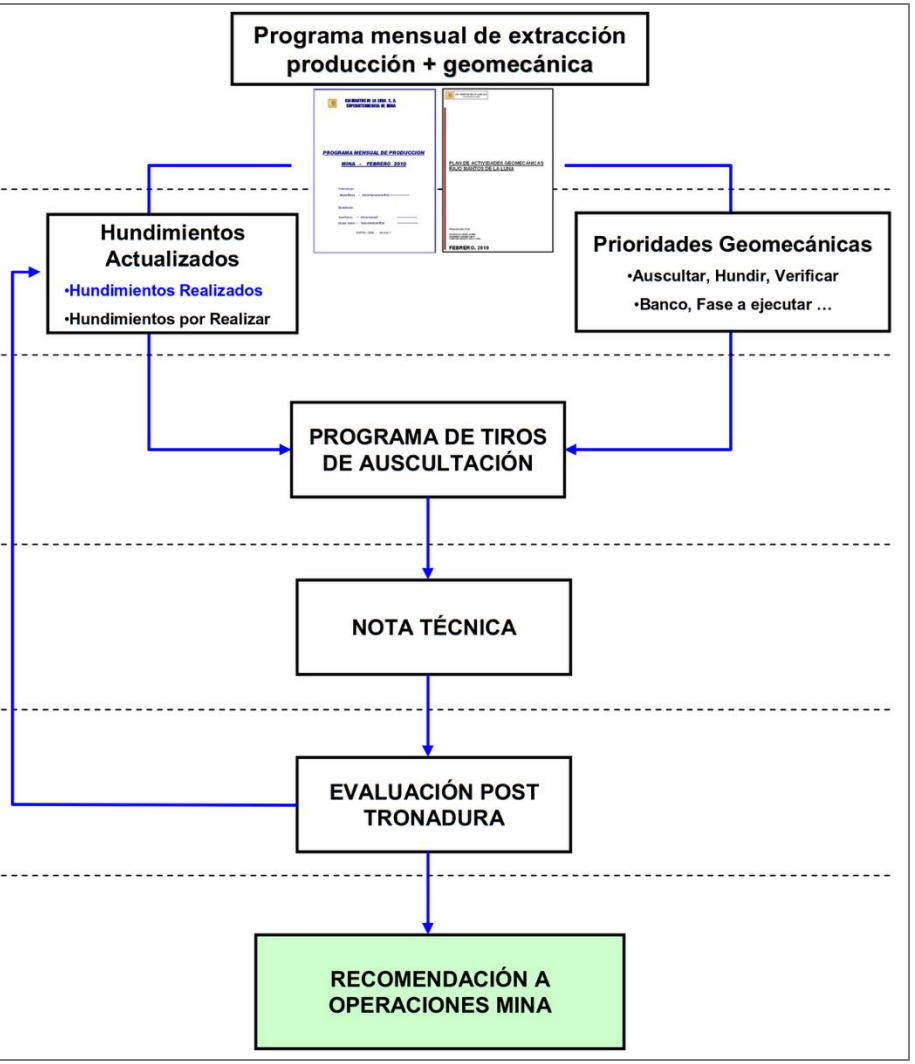
- Estabilidad Local y Global del sector (Factor de Seguridad)
- Perfiles a Escala
- Recomendación de Chimeneas de generación de cara libre.
- Malla de Hundimiento
- Resultados esperados post- tronadura

V.-Etapa: Evaluación Post Tronadura.

De acuerdo a los volúmenes involucrados en la tronadura de Hundimiento, se puede estimar el perfil de la pila tronada y con ello saber si la placa ha colapsada correctamente.

VI.-Etapa: Recomendación a Operaciones Mina.

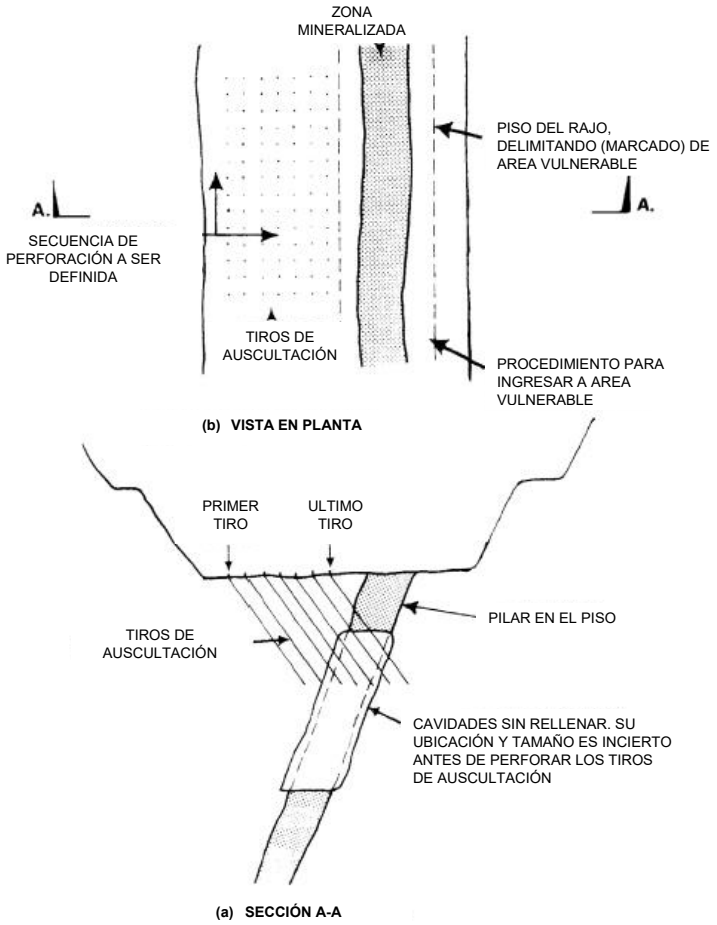
Si se encuentran resultados anómalos, es posible que existan sectores no colapsados por la tronadura de Hundimiento, para evitar poner en riesgo a la operación, Geomecánica debe entregar las zonas seguras para atacar los sectores en cuestión.

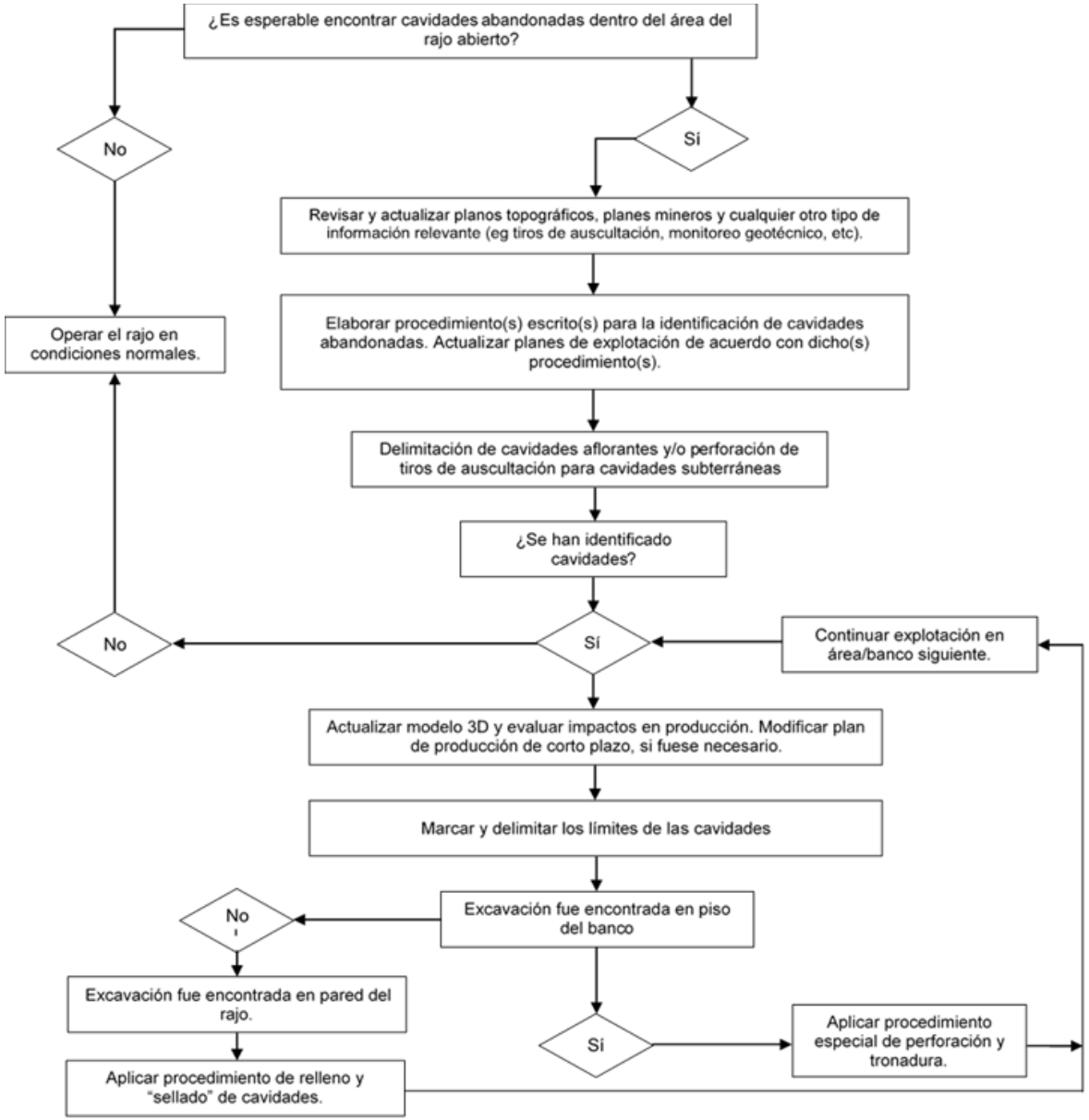


Fuente: FF GeoMechanics (2024)

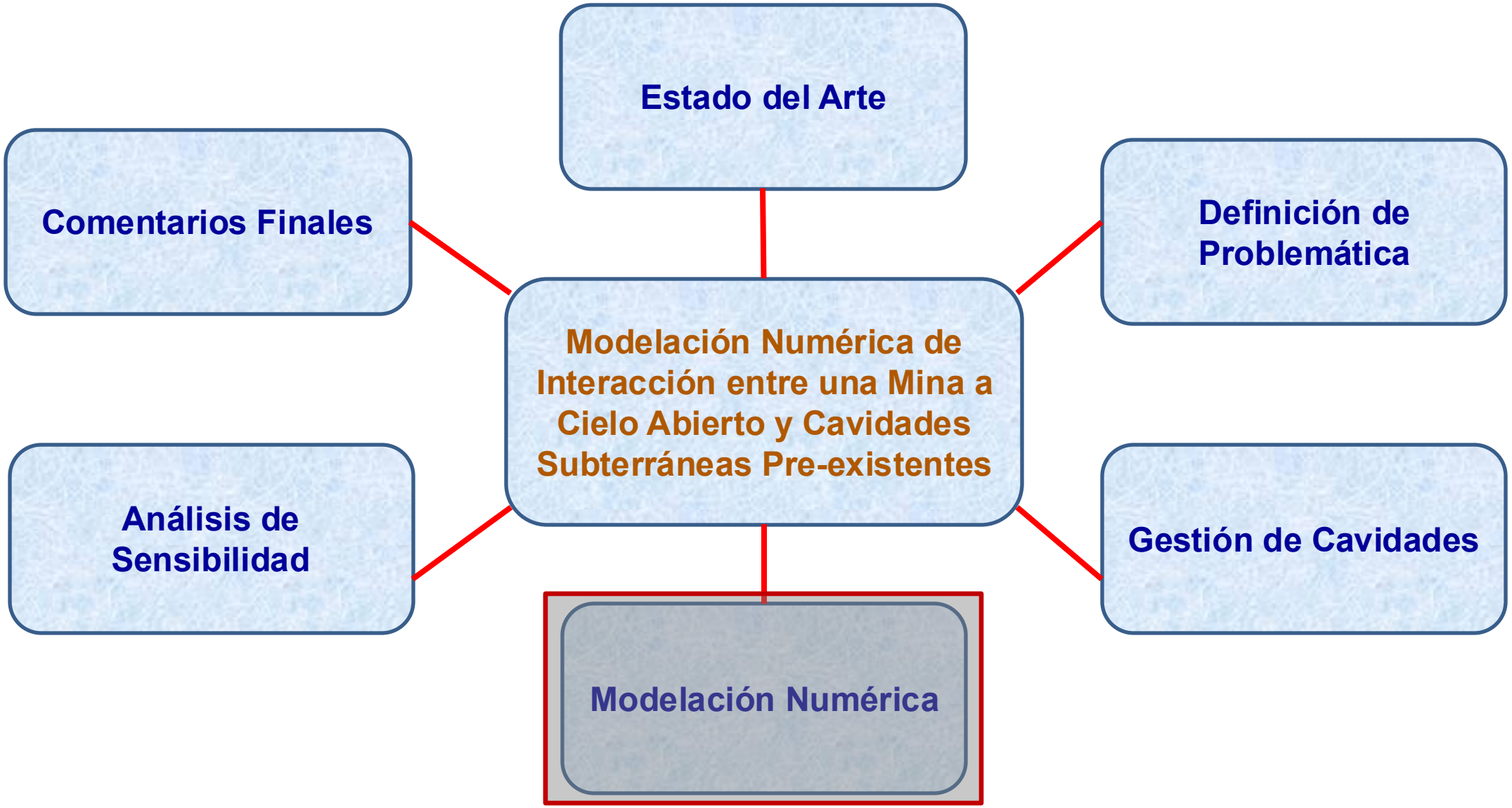
Gestión de Cavidades

Mapa de Proceso: Manejo y Control de Cavidades



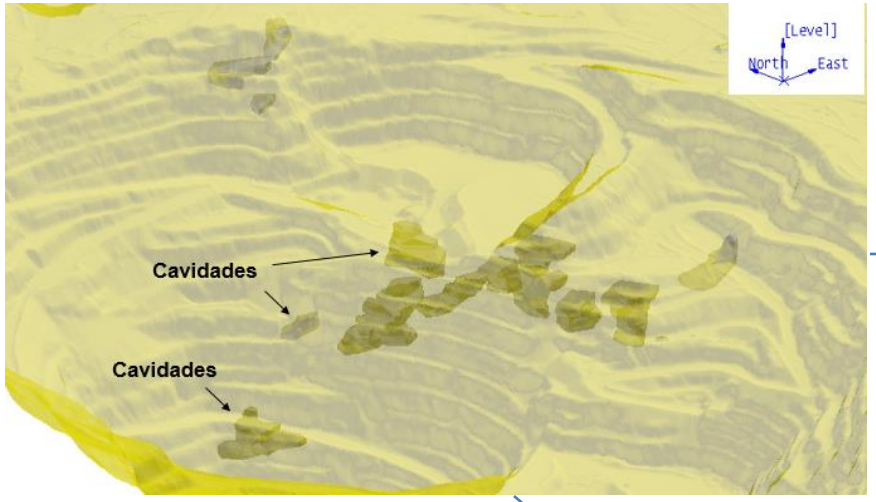


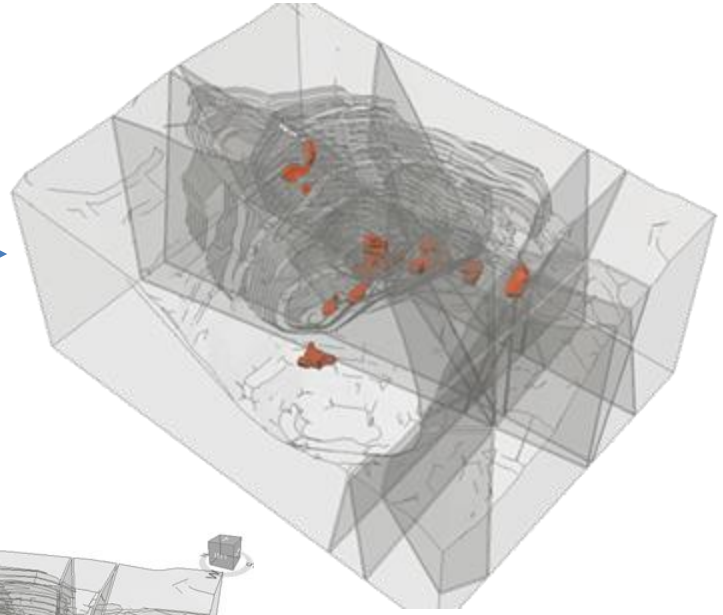
Fuente: FF GeoMechanics (2024), modificado de MOSHAB (WA, 2000)

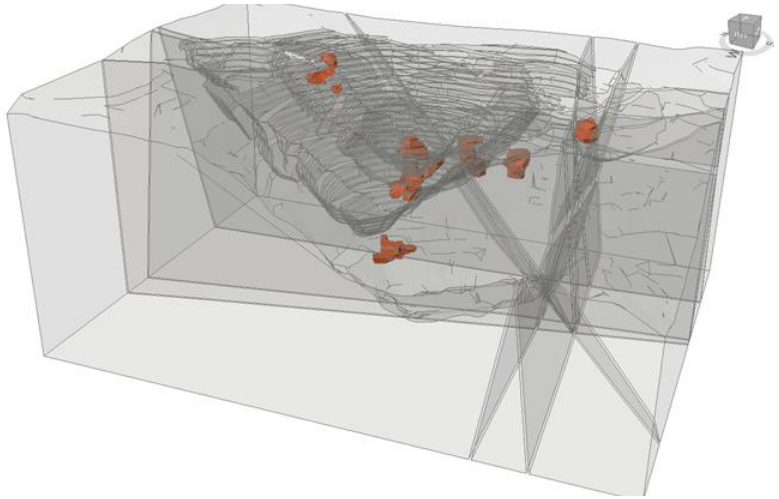

Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

Modelación Numérica

Análisis con software RS3: estabilidad de losas emplazadas entre el Open Pit y las Cavidades subterráneas presentes.







Fuente: FF GeoMechanics (2024)

Modelación Numérica

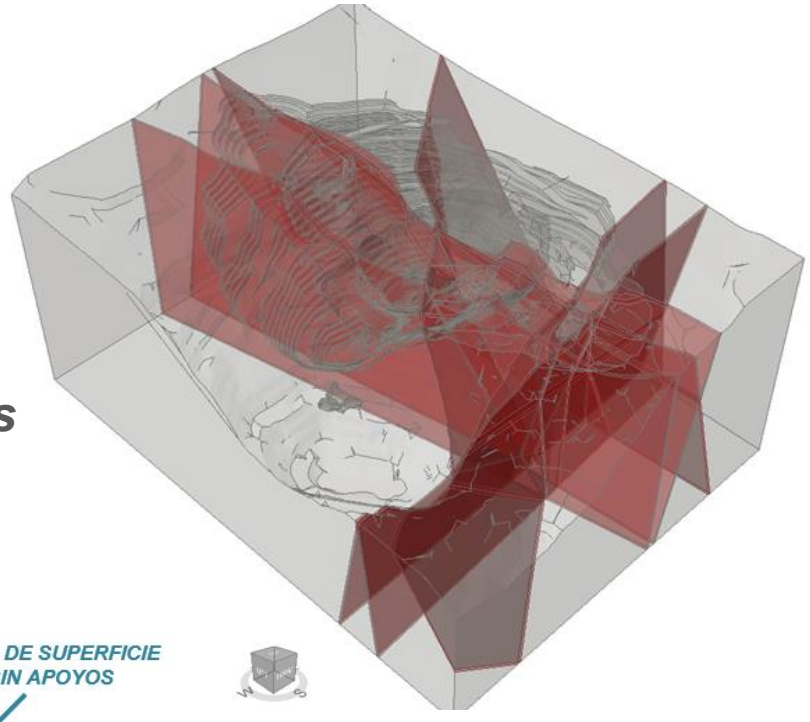
Geometría del Modelo

Condiciones de Borde

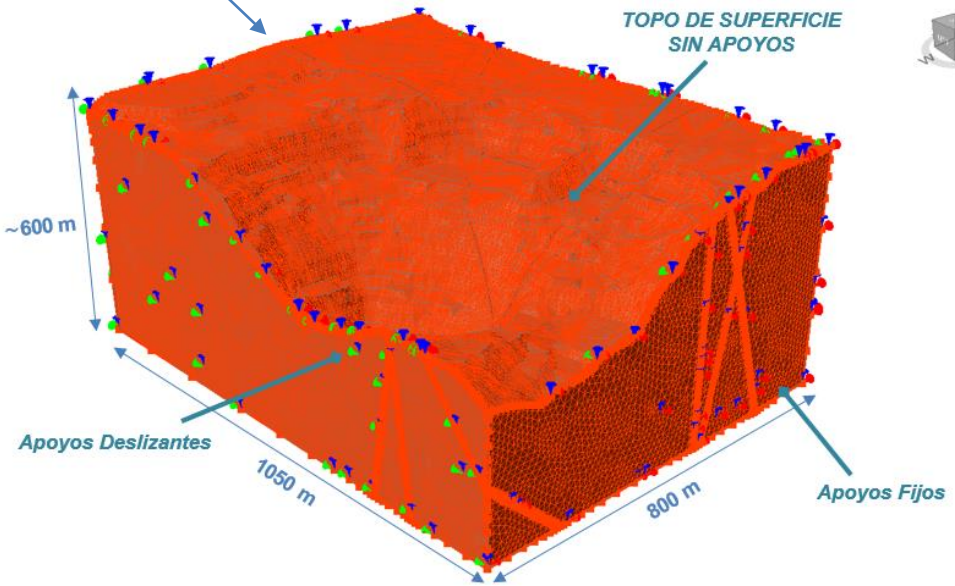
Parámetros de Entrada (Inputs): Esfuerzos y Materiales Constitutivos

Análisis de Estabilidad de Losas

Generación de Ábacos de Estabilidad de Losas

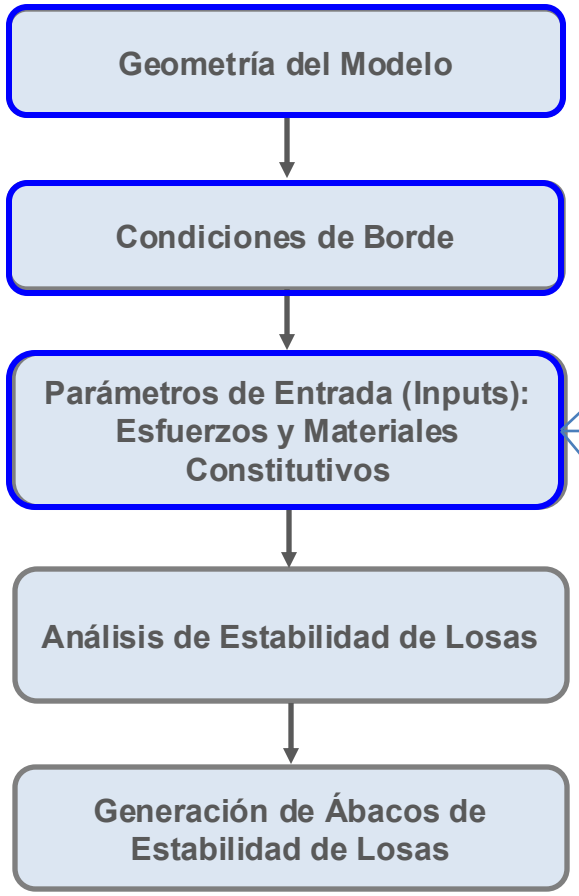


- *Open Pit*
- *Fallas*
- *Cavidades*



Fuente: FF GeoMechanics (2024)

Modelación Numérica



Sector	Esfuerzos Principales "In-Situ"	
	Magnitud (MPa)	Orientación
Distrito Minero	$\sigma_1 = \sigma_{xx} = 1.65 \times \sigma_v$	Rumbo E-W
	$\sigma_2 = \sigma_{yy} = 1.33 \times \sigma_v$	Rumbo N-S
	$\sigma_3 = \sigma_{zz} = 1.0 \times \sigma_v$	Vertical

Propiedades de Macizo Rocoso		
Parámetro	**Andesita y Brecha**	**Comentarios**
GSI	52	*Índice de Resistencia Geológica (Hoek). Dato de terreno.*
m_b	3.96	*Parámetro de Hoek-Brown. Peak.*
s	0.005	*Parámetro de Hoek-Brown. Peak.*
a	0.505	*Parámetro de Hoek-Brown.*
E_{rm}	11220 MPa	*Módulo de elasticidad (Young).*

Propiedades de Macizo Rocoso		
Parámetro	**Zonas de Falla**	**Comentarios**
GSI	30	*Índice de Resistencia Geológica (Hoek). Dato de terreno.*
m_b	0.98	*Parámetro de Hoek-Brown. Peak.*
s	0.0004	*Parámetro de Hoek-Brown. Peak.*
a	0.522	*Parámetro de Hoek-Brown.*
E_{rm}	1225 MPa	*Módulo de elasticidad (Young).*

Fuente: FF GeoMechanics (2024)

Modelación Numérica

Geometría del Modelo

↓

Condiciones de Borde

↓

Parámetros de Entrada (Inputs): Esfuerzos y Materiales Constituyentes

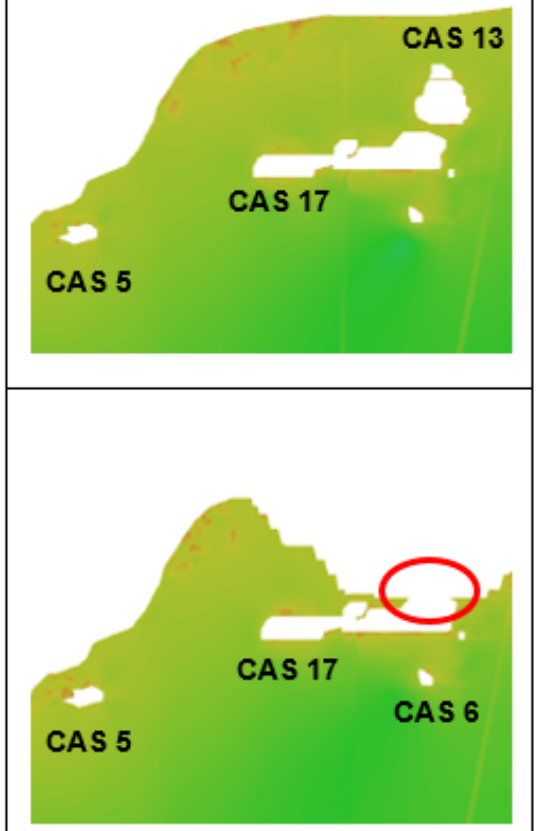
↓

Análisis de Estabilidad de Losas

↓

Generación de Ábacos de Estabilidad de Losas

Ejemplo de secciones con resultados del Modelo Numérico



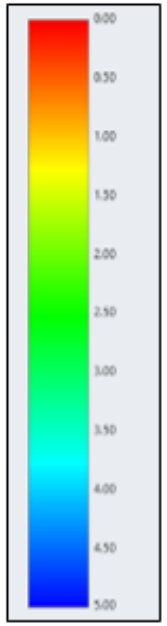


Figura	Leyenda	Sección	Fase	ID Cavidad	Espesor Losa (m)	H.R (m)	Rango F.S	Condición de estabilidad
	Factor de Seguridad	4	0	CAS 5	15.0	6.5	1.3 - 1.7	Estable
				CAS 13	32.0	8.0	1.4 - 2.0	Estable
				CAS 17	87.0	9.0	1.5 - 2.2	Estable
			1	CAS 5	15.0	6.5	1.0 - 1.3	Transición
				CAS 6	28.0	7.6	1.0 - 1.5	Transición
				CAS 17	7.0	9.0	< 1.0	Inestable (Conecta)

Fuente: FF GeoMechanics (2024)

Modelación Numérica

Geometría del Modelo

↓

Condiciones de Borde

↓

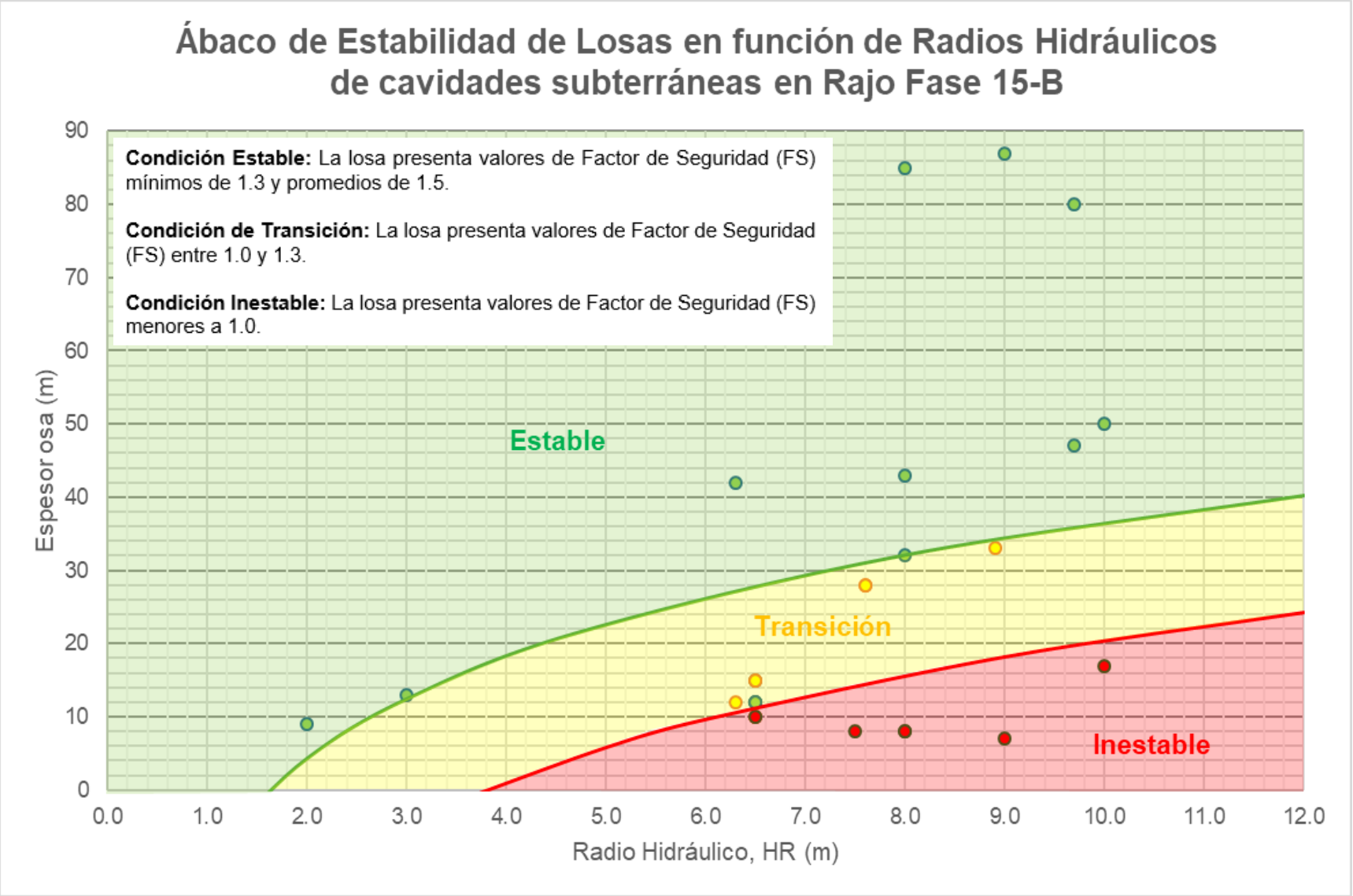
Parámetros de Entrada (Inputs): Esfuerzos y Materiales Constituyentes

↓

Análisis de Estabilidad de Losas

↓

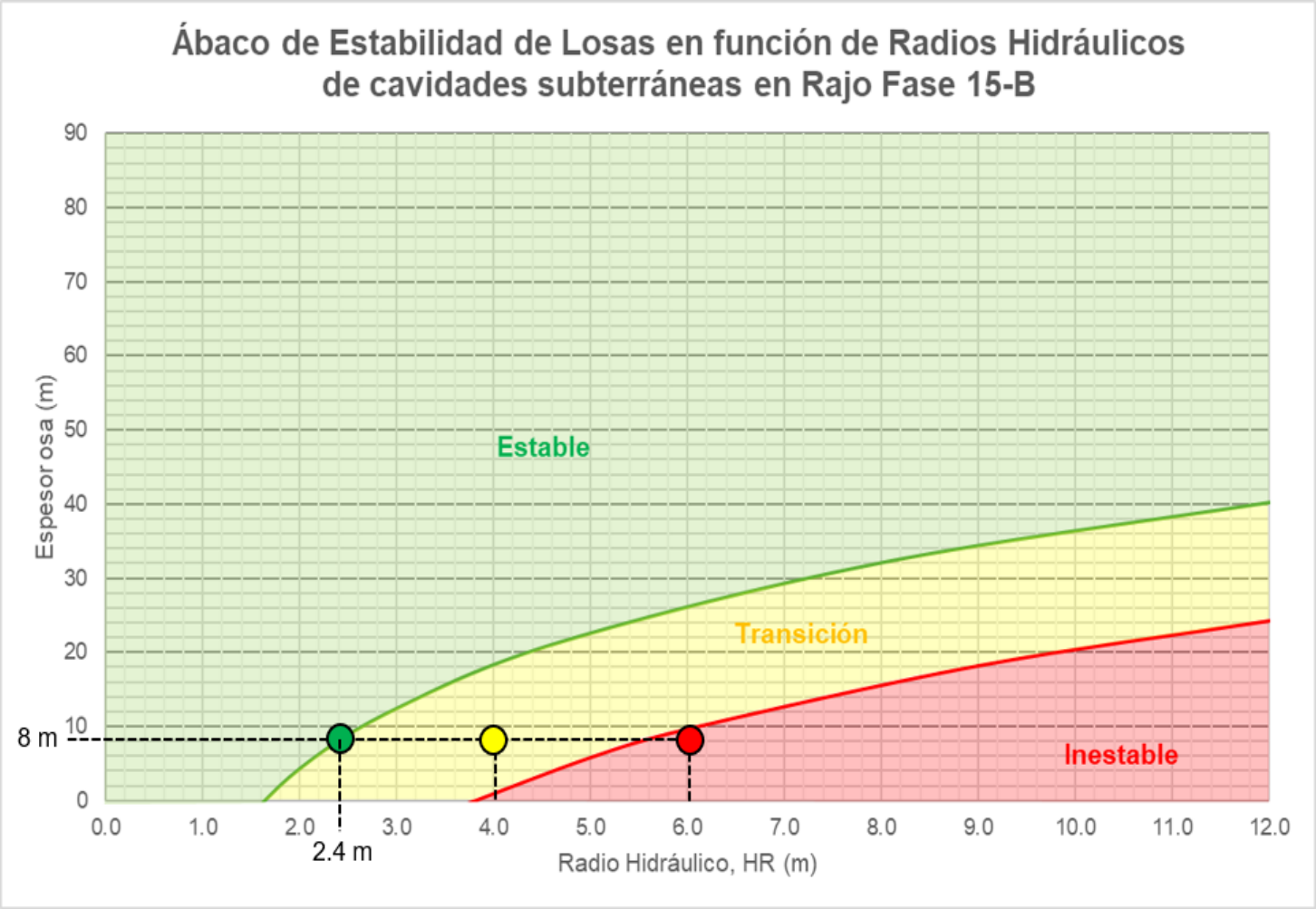
Generación de Ábacos de Estabilidad de Losas



Fuente: FF GeoMechanics (2024)

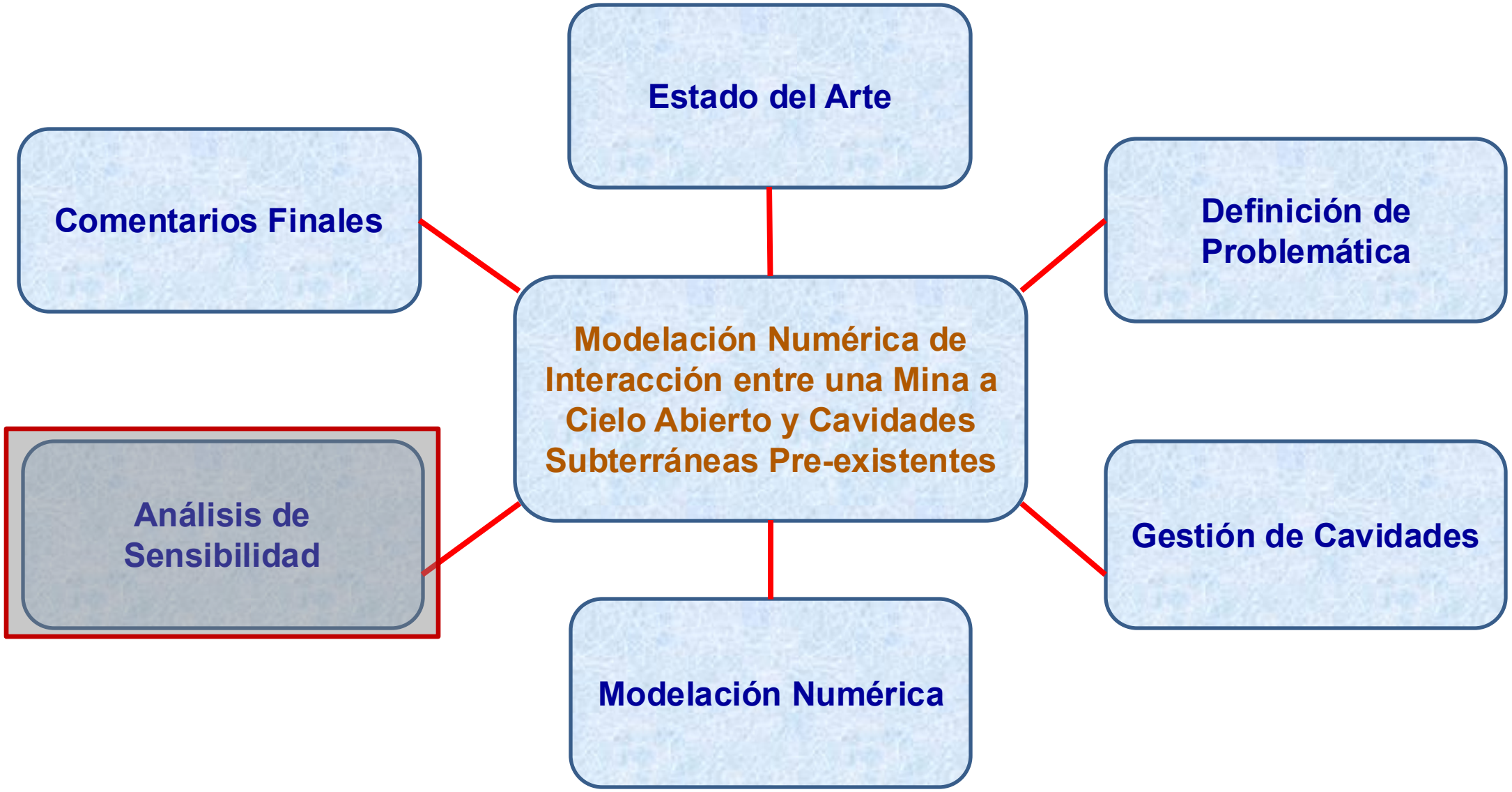
Modelación Numérica

Ejemplo de uso de Ábaco de Estabilidad



Fuente: FF GeoMechanics (2024)

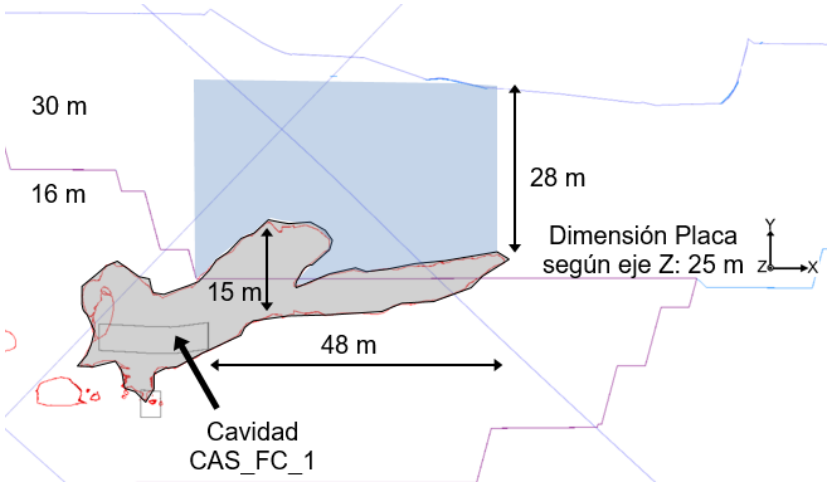
- El espesor de losa de 8 m es estable para HR ≤ 2.4 m, que corresponde a trabajo sobre galerías o caserones pequeños.
- La losa de 8 m sobre caserón con HR = 4.0 m, se encontrará en zona de transición, por lo que se deberá activar el protocolo de trabajo sobre cavidad subterránea.
- Si la cavidad es aún mayor, para HR > 6.0 m, la losa de 8 m de espesor se presentará en condición inestable, por lo que se deberá activar el protocolo de perforación para ejecutar la conexión forzada de la losa.

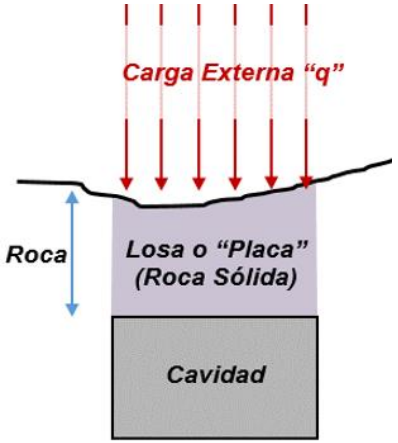

Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

Análisis de Sensibilidad

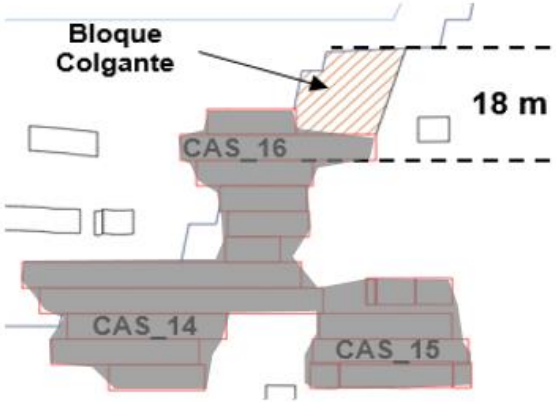
Uso de Metodología de Análisis de Placas y Rediseño para mejorar la estabilidad

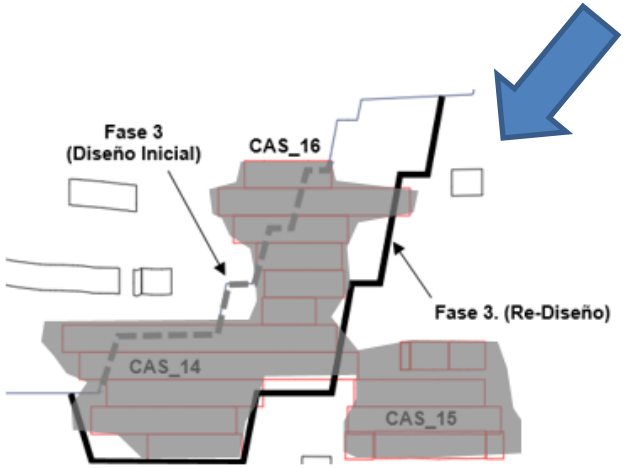
Cavidades en los Pisos

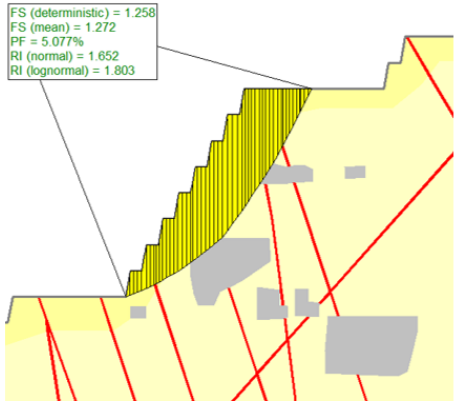




Cavidades en las Paredes o Taludes





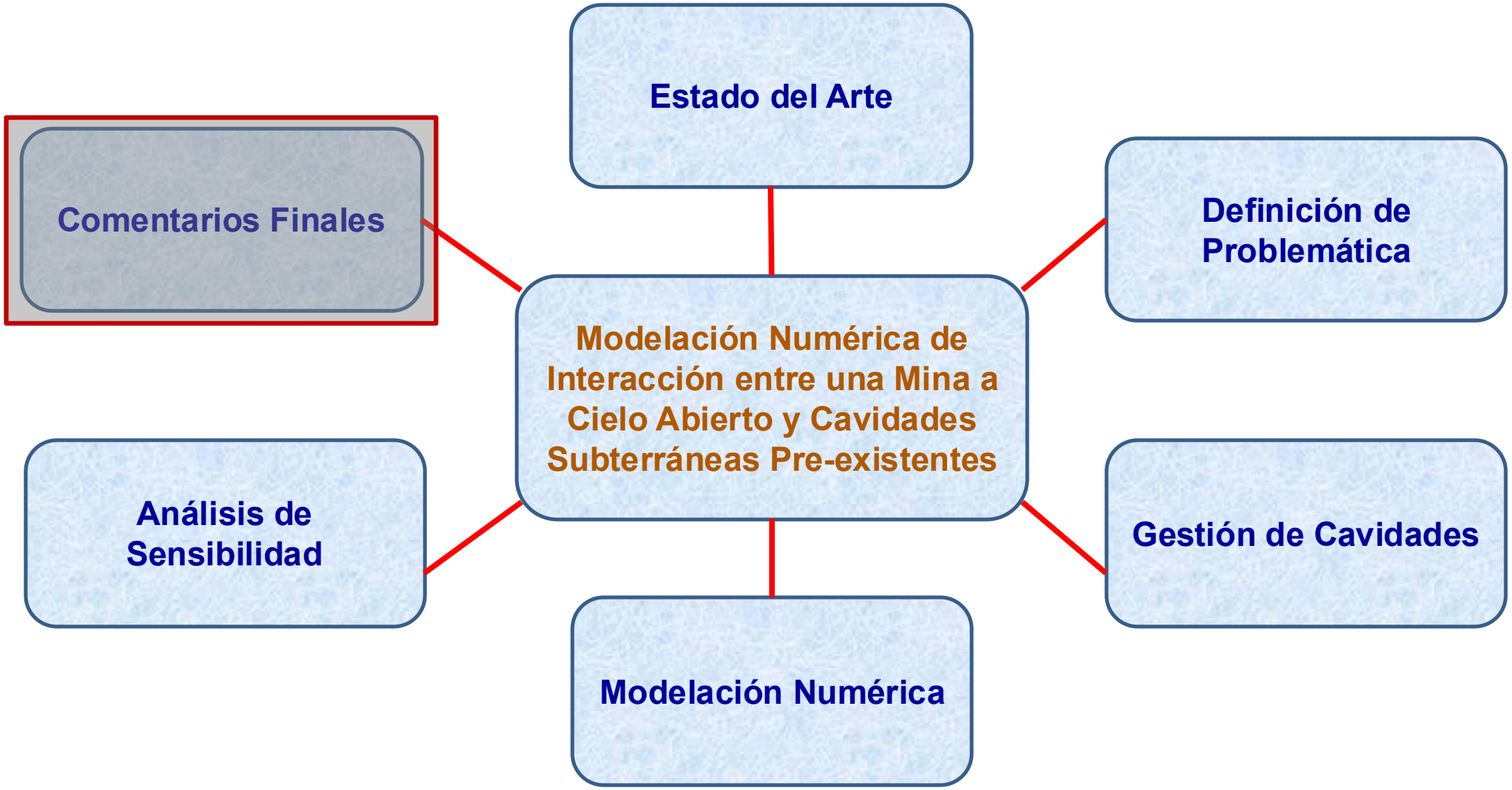


Para condición estática se obtiene un valor de FS = 1.26, y Probabilidad de Falla (PF) asociada, cercana a 5%.

Para condición sísmica (caso de operación), asociado a un coeficiente sísmico, Kh = 0.12, se obtiene un FS = 1.11 y Probabilidad de Falla (PF) cercano a 19%.

Los resultados obtenidos cumplen los criterios de aceptabilidad geotécnica.

Fuente: FF GeoMechanics (2025)


Estado del Arte
Comentarios Finales
Definición de Problemática
Modelación Numérica de Interacción entre una Mina a Cielo Abierto y Cavidades Subterráneas Pre-existentes
Análisis de Sensibilidad
Gestión de Cavidades
Modelación Numérica

Comentarios Finales

- La identificación adecuada de las cavidades subterráneas pre-existentes constituye un desafío para las explotaciones de *Open Pit* que se pueden ver afectadas por este tipo de condición .

- La construcción de un modelo geotécnico y estructural robusto es un requisito fundamental para el análisis de la interacción de un *OP* con cavidades subterráneas pre-existentes.

- Las técnicas de modelación numérica permiten identificar posibles áreas de vulnerabilidad geotécnica, antes de la ejecución de las fases de minado del *Pit*.

- En el contexto anterior, la elaboración de un Ábaco de Estabilidad que permite asociar los HR de las cavidades y los potenciales tamaños de losas/placas, asociadas a éstas, a partir de modelación numérica, constituye una herramienta simple y práctica para el análisis inicial de este tipo de problemática.

- La metodología aquí planteada deberá ser sensibilizada a partir de nueva información y antecedentes geotécnicos, obtenidos a partir del monitoreo de las condiciones de campo, junto con complementar las técnicas numéricas, con métodos analítico-empíricos.

FF GeoMechanics
INGENIERIA . GEOMECANICA . GEOTECNIA . LABORATORIO MEC. DE ROCAS
MUCHAS GRACIAS
Fernando Fernández Lagazio