



LA GEOMECANICA EN EL PROCESO DE DISEÑO DE MINAS SUBTERRANEAS

MSc. Ing. Néstor David Córdova Rojas

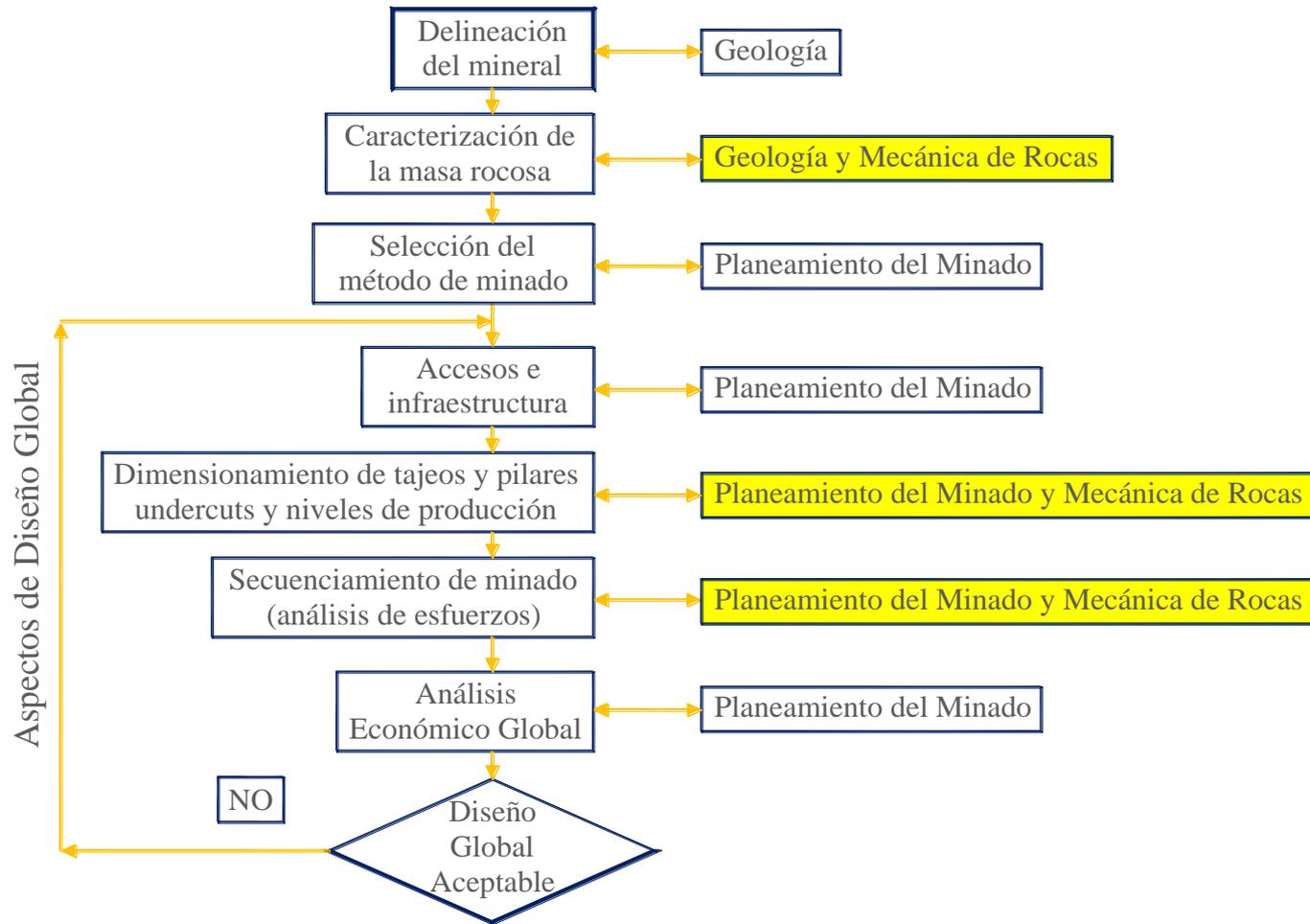
DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles

I SIMPOSIO DE GEOTECNIA

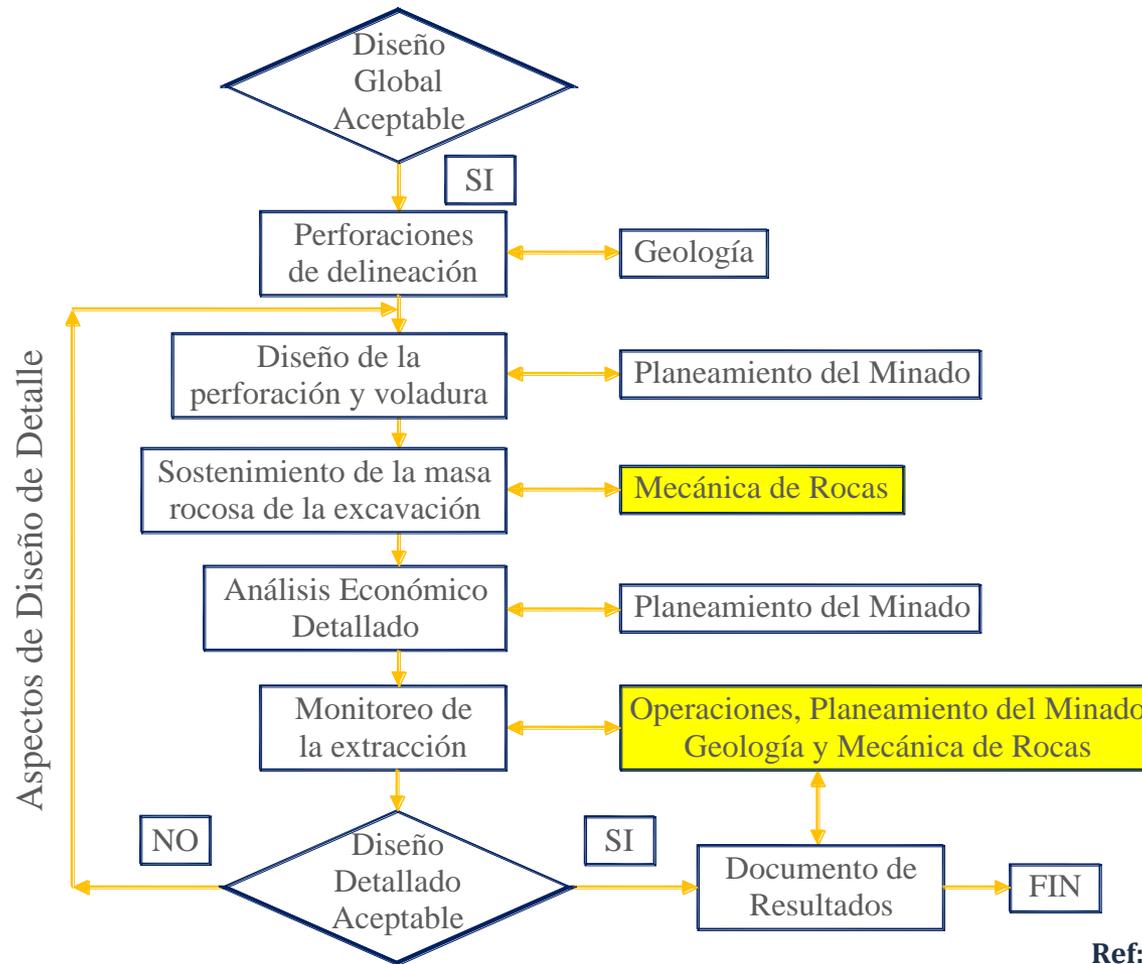
“La Geotecnia como solución en obras civiles y mineras”

Lima 25 de abril del 2019

PROCESO DE DISEÑO DEL MINADO SUBTERRANEO

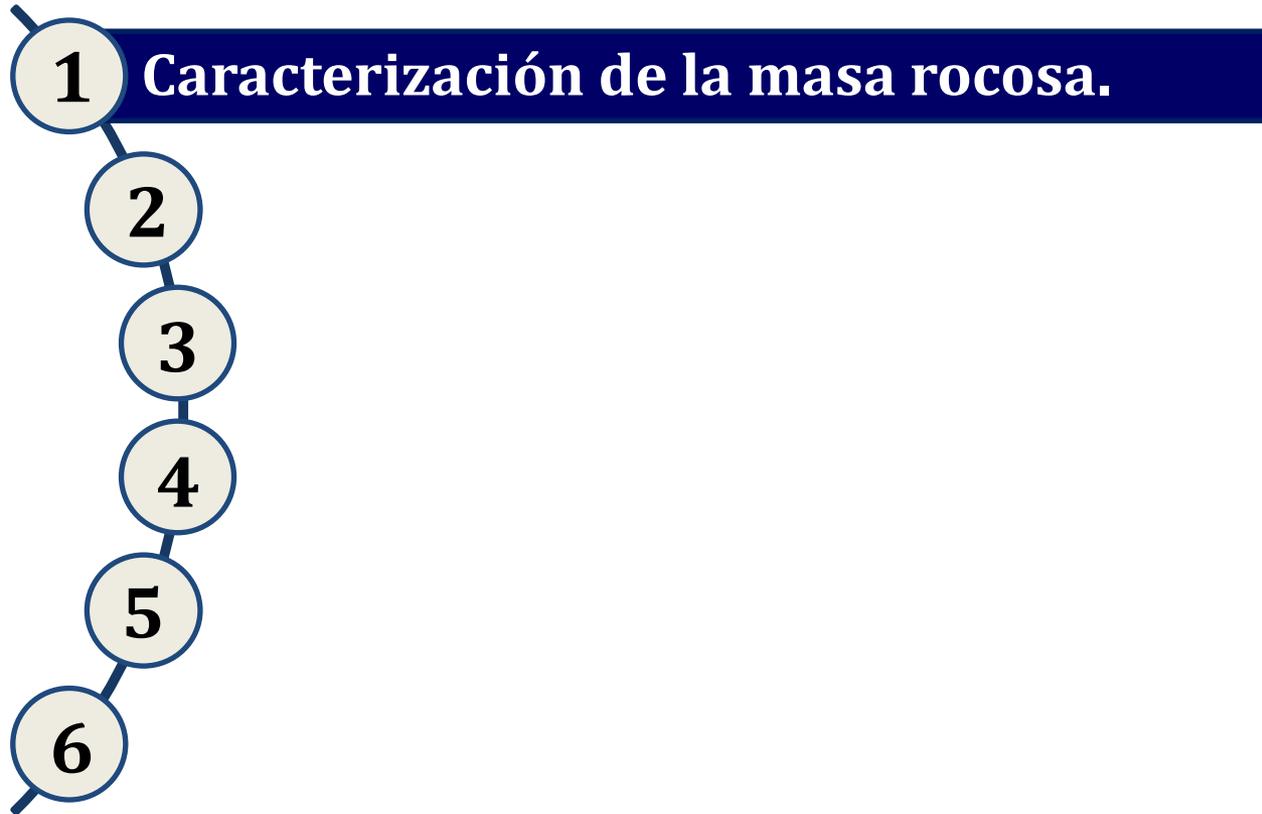


PROCESO DE DISEÑO DEL MINADO SUBTERRANEO

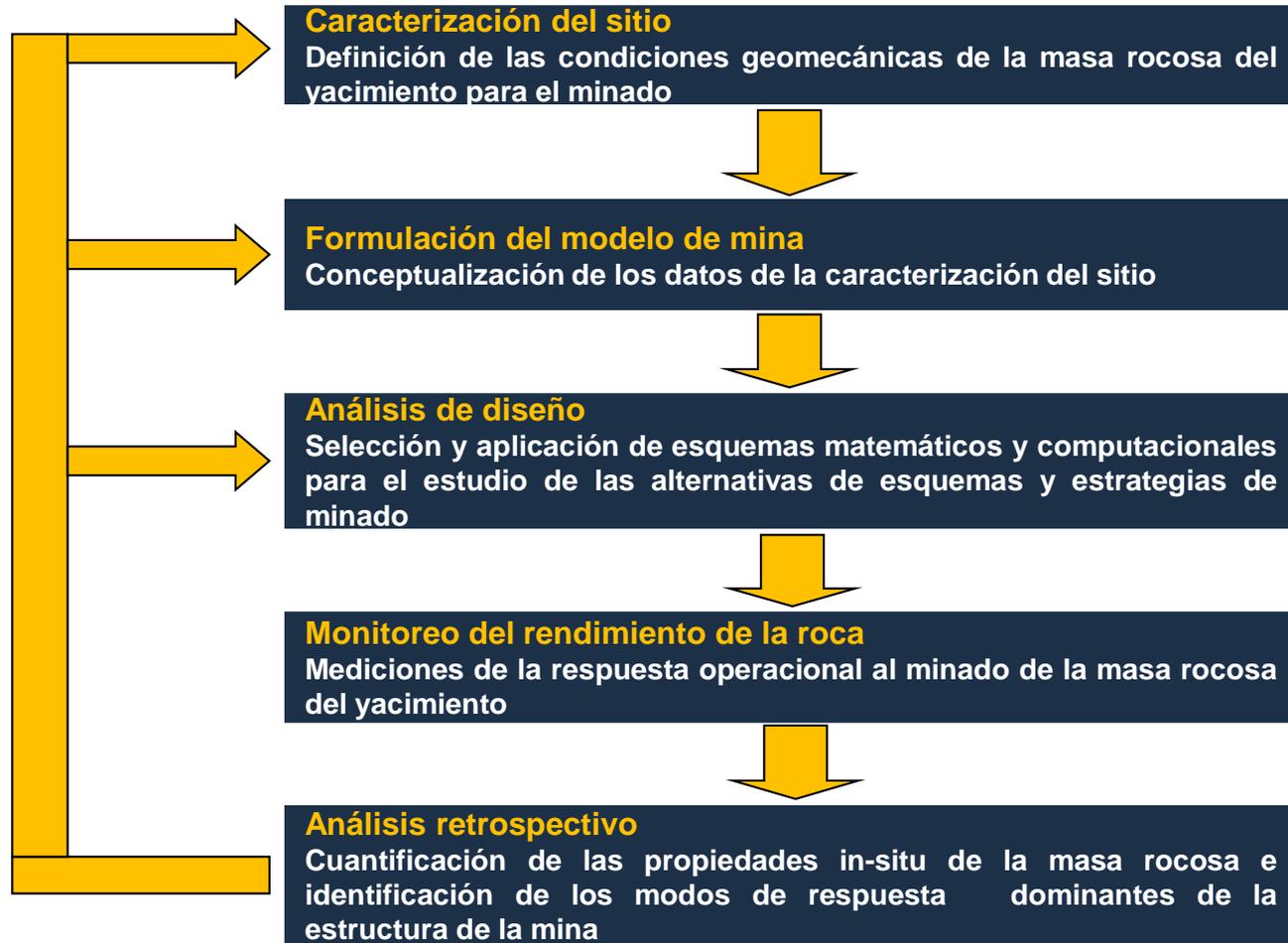


Ref: E. Villaescusa
Nov-2008

- 1** Caracterización de la masa rocosa.
- 2** Selección del método de minado.
- 3** Dimensionamiento del minado.
- 4** Secuenciamiento del minado.
- 5** Sostenimiento.
- 6** Monitoreo de la extracción.



COMPONENTES Y LOGICA DE UN PROGRAMA GEOMECANICO



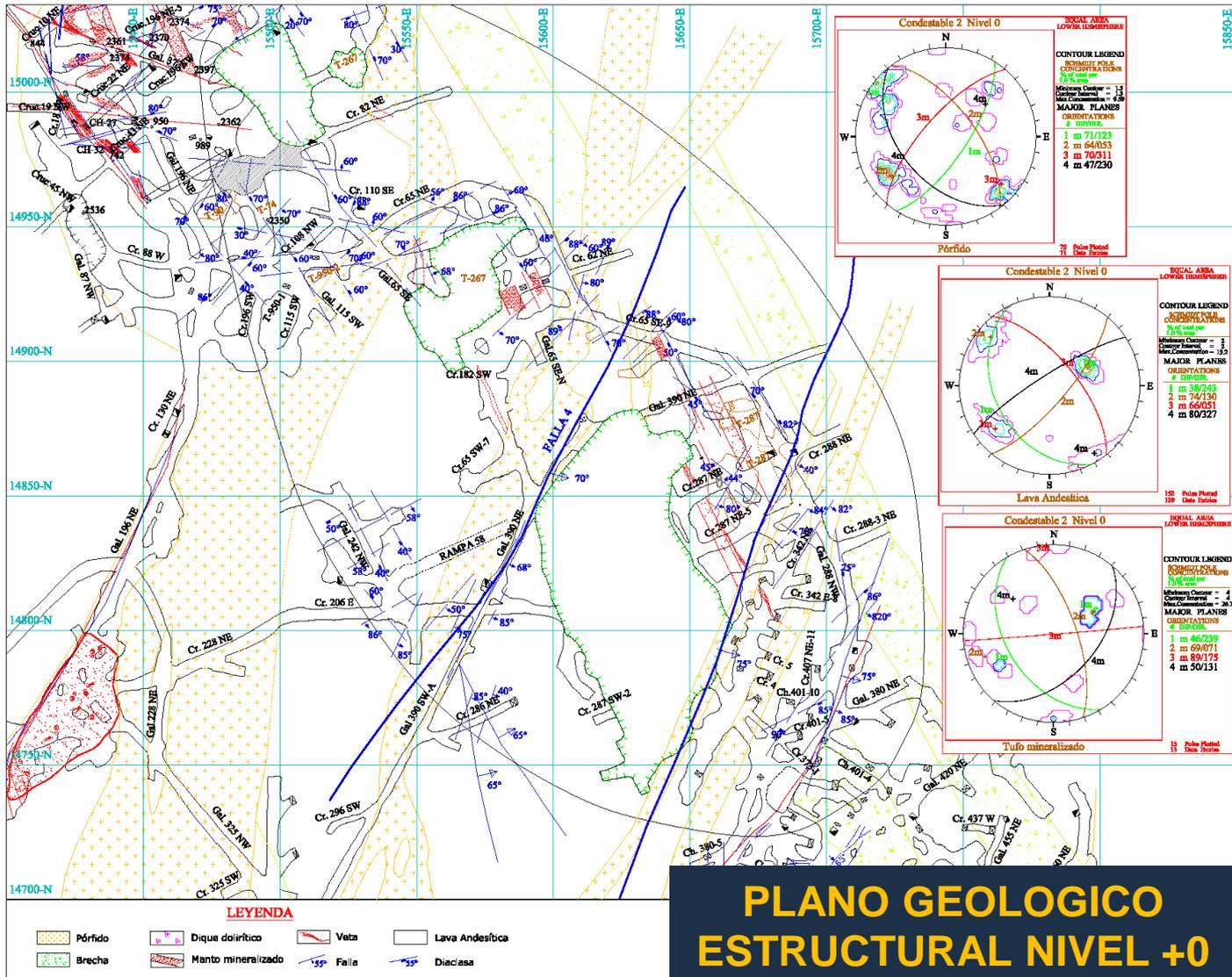
CARACTERIZACION DE SITIO

- **Definir las diferentes unidades litoestratigráficas asociadas al cuerpo mineralizado.**
- **Determinación de las propiedades de resistencia y deformación de las unidades lito-estratigráficas.**
- **Definición de las propiedades geométricas y mecánicas de los sistemas de discontinuidades menores.**
- **Ubicación y descripción de las propiedades de las discontinuidades mayores.**
- **Estimación de la resistencia in-situ del medio rocoso a partir de las propiedades de sus elementos constituyentes.**
- **Determinación del estado de esfuerzos in-situ en el área de minado.**
- **Investigación de la hidrogeología del cuerpo mineralizado y su entorno.**

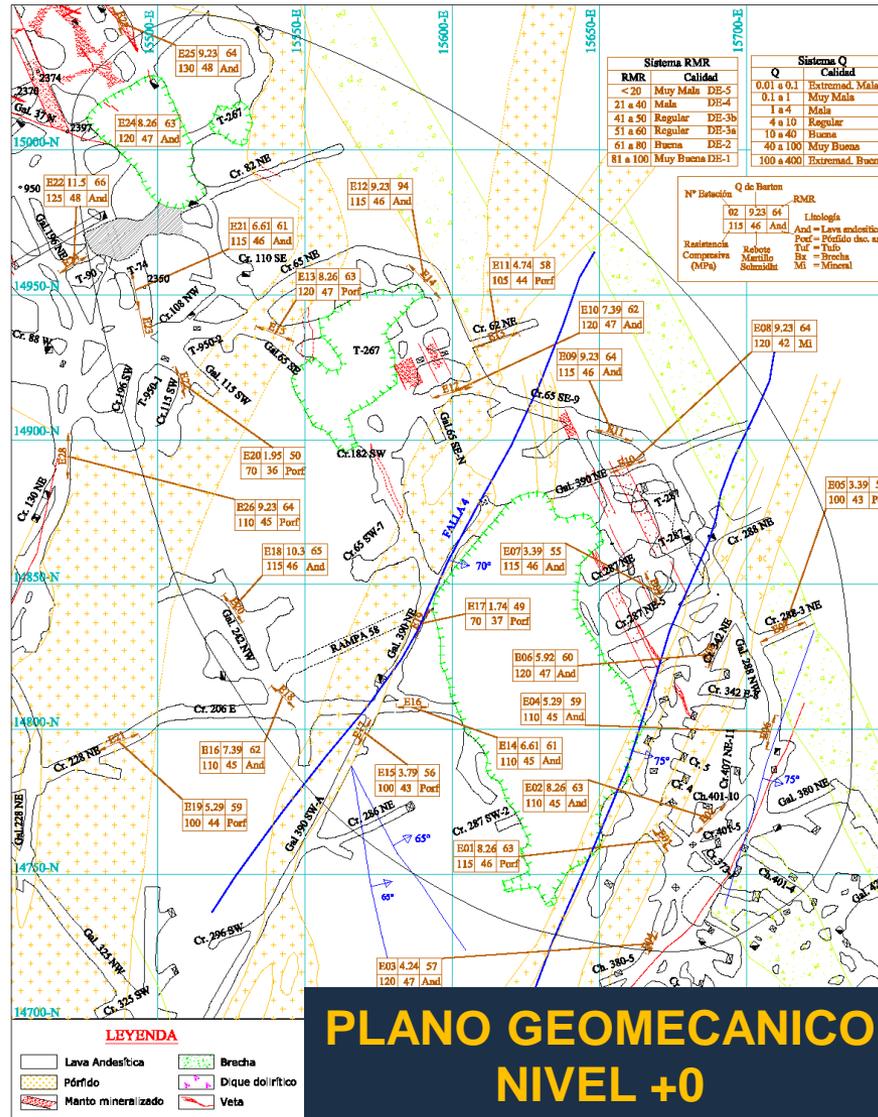
FORMULACION DEL MODELO DE MINA

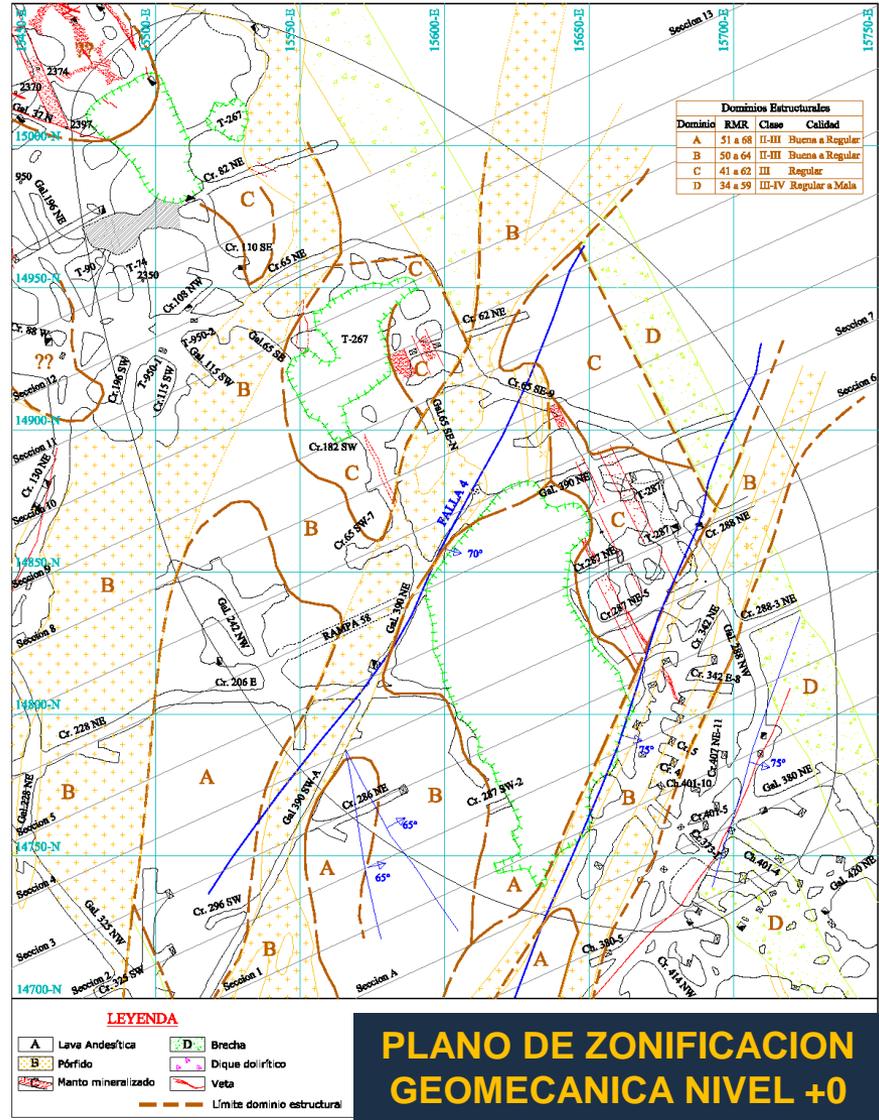
El objetivo es tomar en cuenta los principales rasgos geomecánicos que serán considerados en el comportamiento del modelo. Por ejemplo:

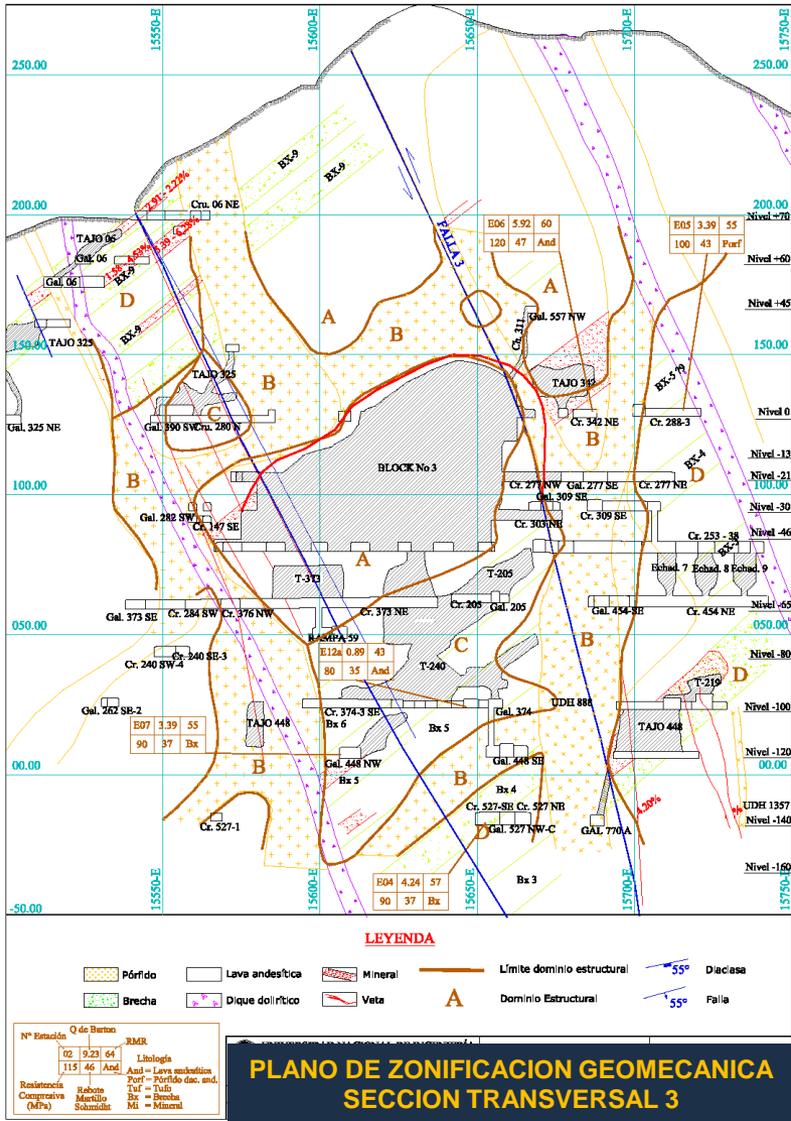
- **A las unidades litológicas se les asignará propiedades de resistencia y deformación promedias “representativas”.**
- **A los rasgos estructurales mayores se les asignará una geometría regular y propiedades de resistencia al corte promedias.**
- **Se dará una especificación representativa del estado de esfuerzos del pre-minado.**



PLANO GEOLOGICO ESTRUCTURAL NIVEL +0





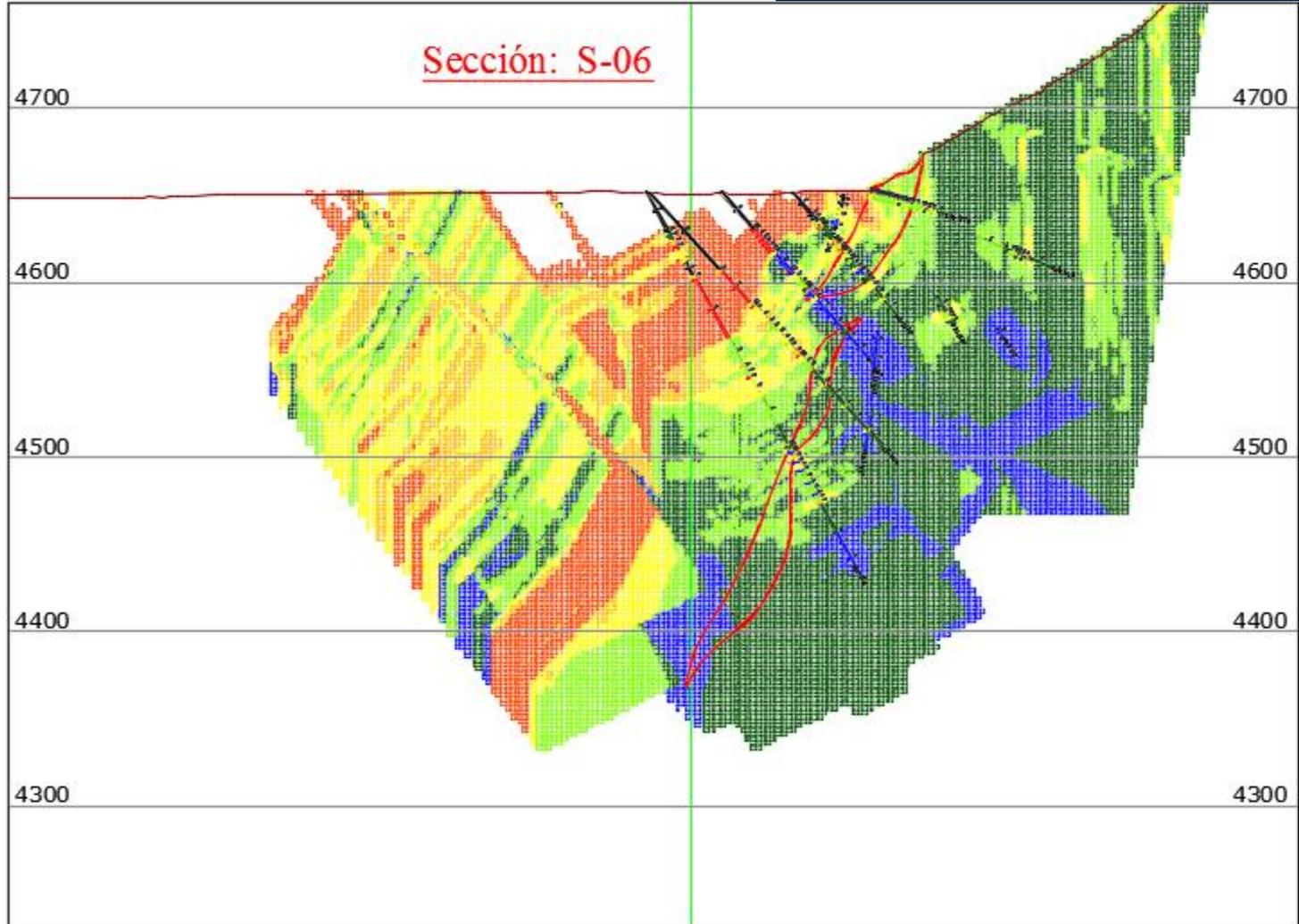


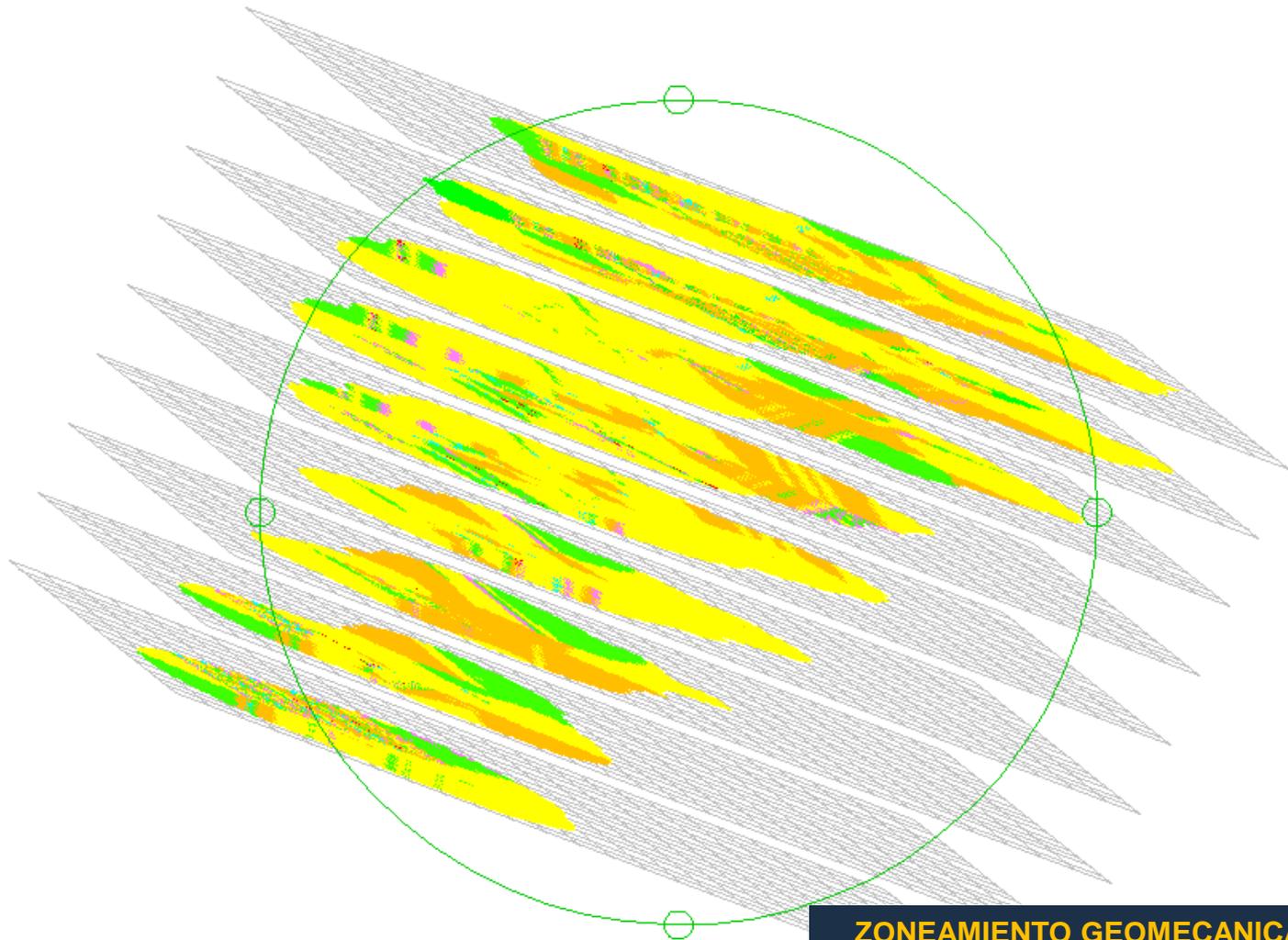
PLANO DE ZONIFICACIÓN GEOMECÁNICA SECCIÓN TRANSVERSAL 3

En la definición de los dominios estructurales se combinan aspectos:

- Litológicos
- Estructurales
- Alteraciones
- Calidad de la masa rocosa

ZONEAMIENTO DE CALIDADES DE MASA ROCOSA EN SECCIONES





**ZONEAMIENTO GEOMECANICA
ZONA HORIZONTES
VISTA 3D**

CALIDAD DE ROCA

(RMR)

	Roca Buena	II	(>71)
	Roca Buena	II	(61 - 70)
	Roca Regular A	III-A	(51 - 60)
	Roca Regular B	III-B	(41 - 50)
	Roca Mala A	IV-A	(31 - 40)
	Roca Mala B	IV-B	(21 - 30)
	Roca Muy Mala	V	(<21)

N-8711500

N-8711450

N-8711400

N-8711350

N-8711300

N-8711275

N-8711250

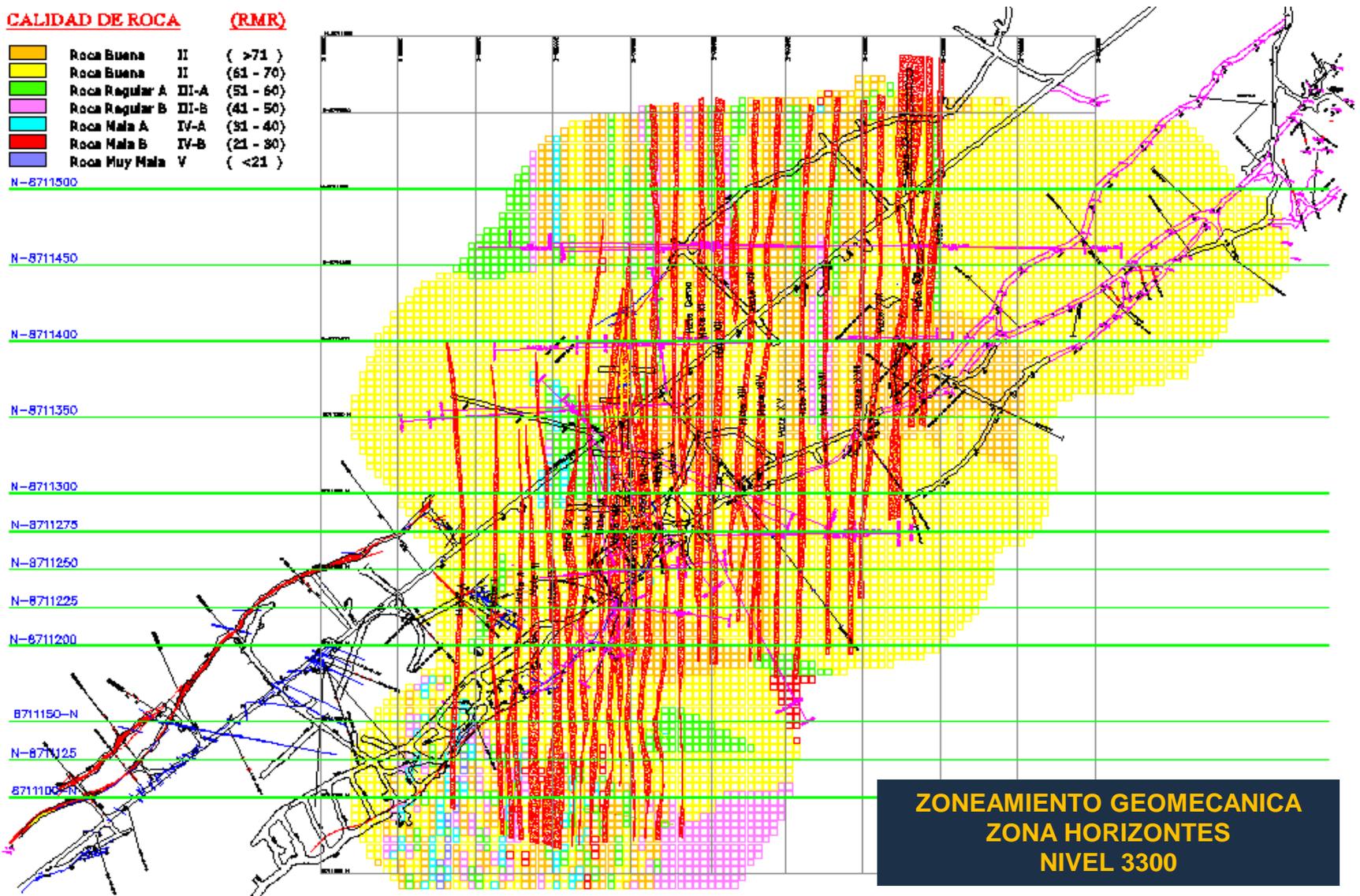
N-8711225

N-8711200

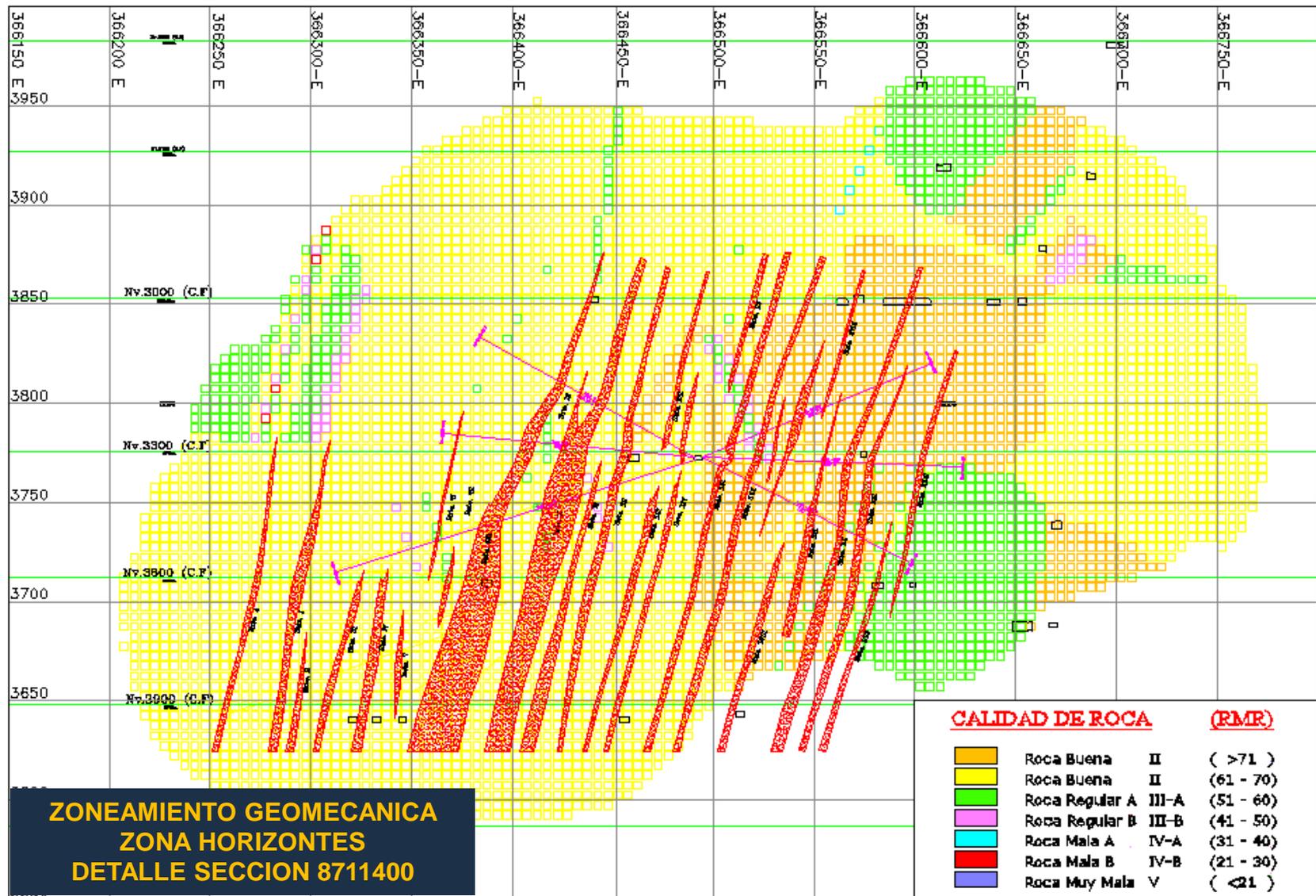
8711150-N

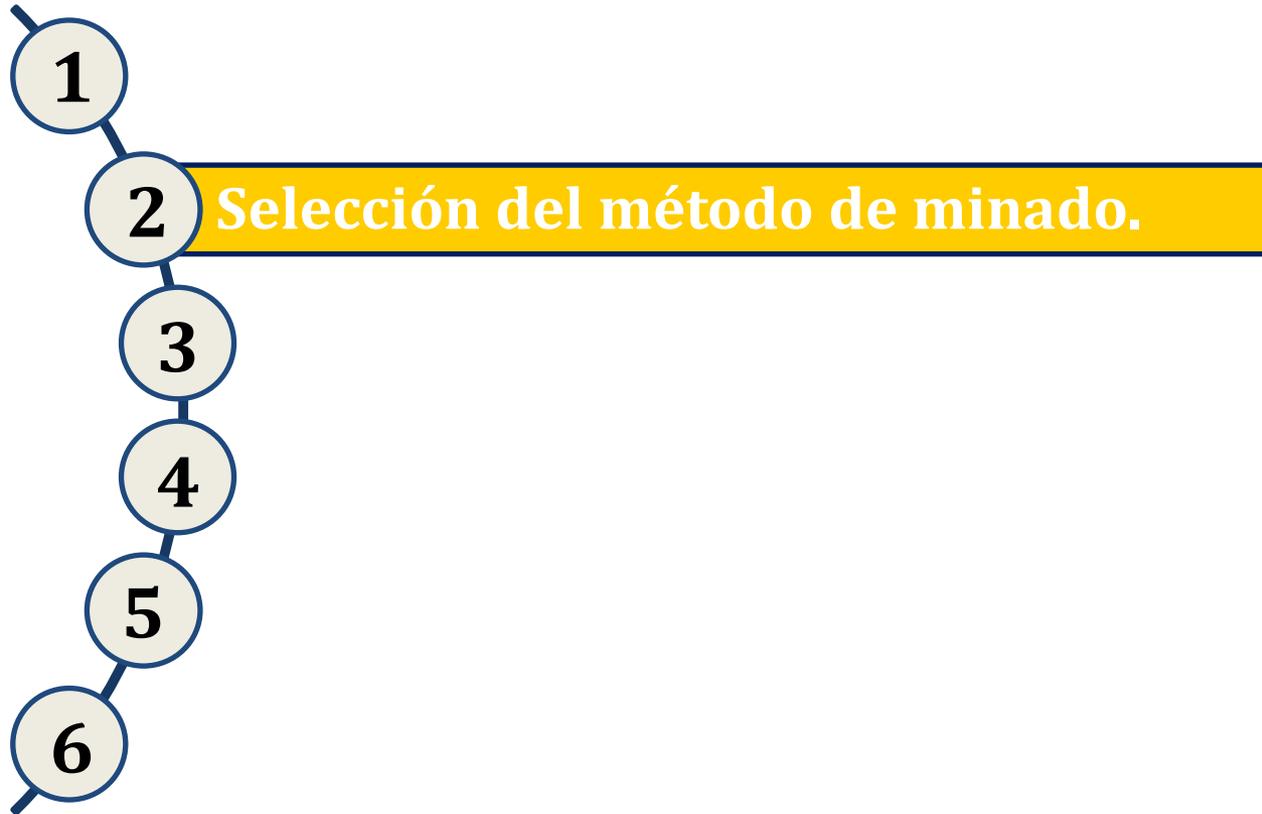
N-8711125

8711100-N

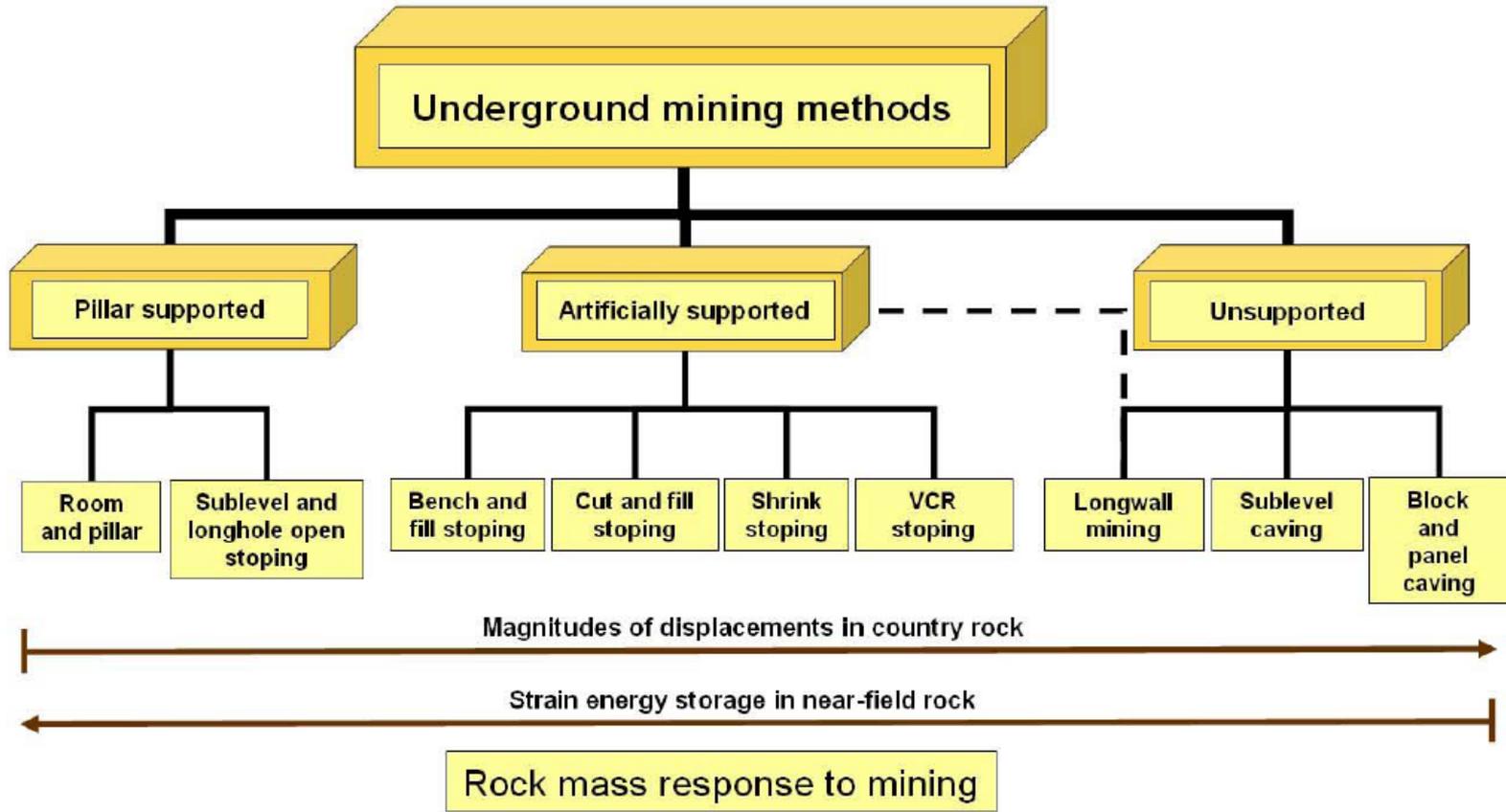


**ZONEAMIENTO GEOMECAICA
ZONA HORIZONTES
NIVEL 3300**





METODOS DE MINADO SUBTERRANEO



SELECCION DEL METODO DE MINADO

Factores que influyen en la selección del método de explotación

```
graph TD; A[Factores que influyen en la selección del método de explotación] --- B[Condiciones Naturales del Yacimiento]; A --- C[Parámetros Económicos]; A --- D[Seguridad e Higiene y Medio Ambiente]; A --- E[Factores Tecnológicos];
```

Condiciones Naturales del Yacimiento

Parámetros Económicos

Seguridad e Higiene y Medio Ambiente

Factores Tecnológicos

SELECCION DEL METODO DE MINADO

Condiciones naturales del yacimiento

- Geología**
- Morfología de la mineralización**
- Reservas y distribución de leyes**
- Condiciones geomecánicas de la masa rocosa**
- Condiciones hidrogeológicas**

El método (o métodos) de minado debe(n) estar aparejado(s) a todas estas condiciones naturales del yacimiento, de tal manera que el minado sea técnicamente factible. La factibilidad técnica debe ser complementada con una evaluación económica del método (o métodos) de minado, para asegurar una factibilidad técnica - económica óptima. También se debe complementar con una evaluación de los aspectos de Seguridad e Higiene y Medio Ambiente, y Factores Tecnológicos.

Parámetros económicos

- Tasas de producción (t/h)**
- Vida de la mina**
- Productividad (t/hombre-hora)**
- Costos de explotación de otros métodos posibles**
- Costos de capital de otros métodos posibles**

Seguridad y Medio Ambiente

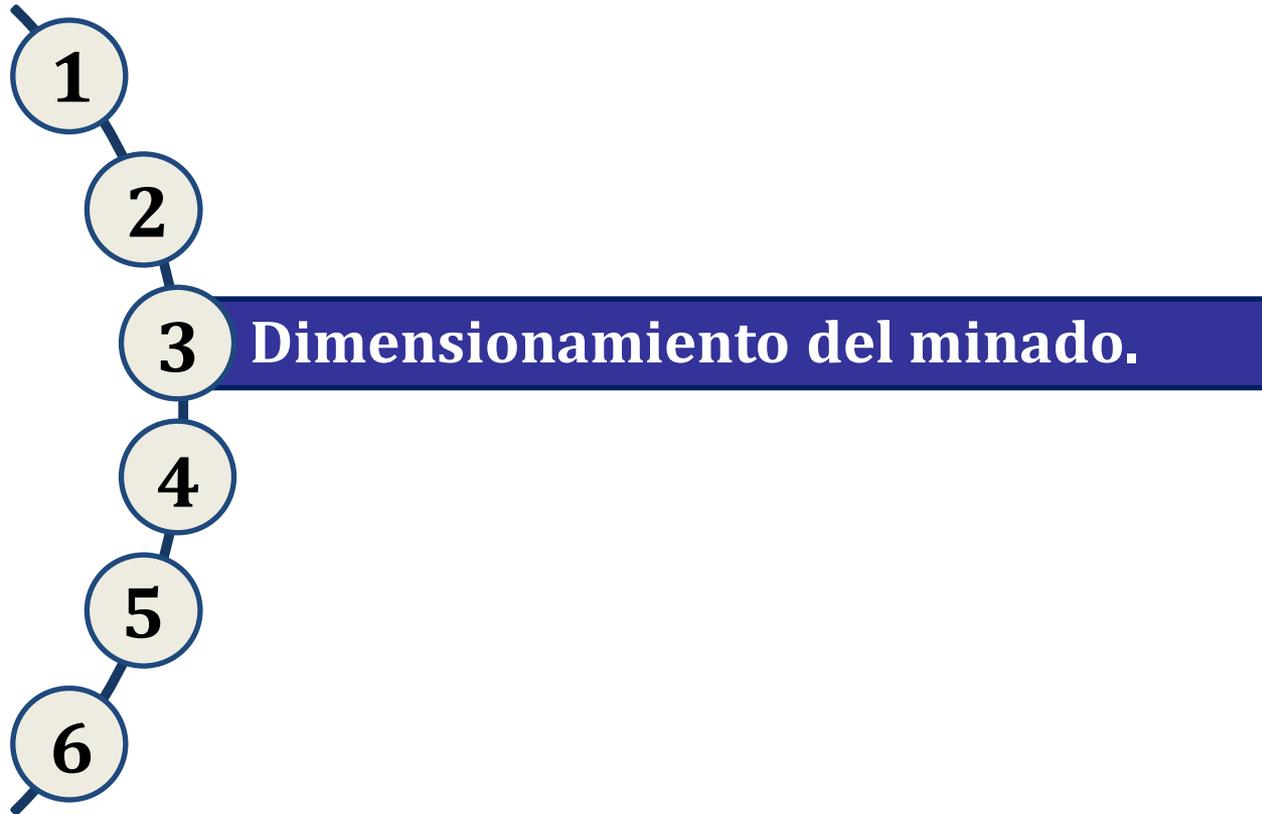
- Facilidad para disponer de áreas de disposición de materiales**
- Condiciones de seguridad de otros métodos posibles**
- Subsistencia, o efectos que afectan a la superficie**

Factores tecnológicos

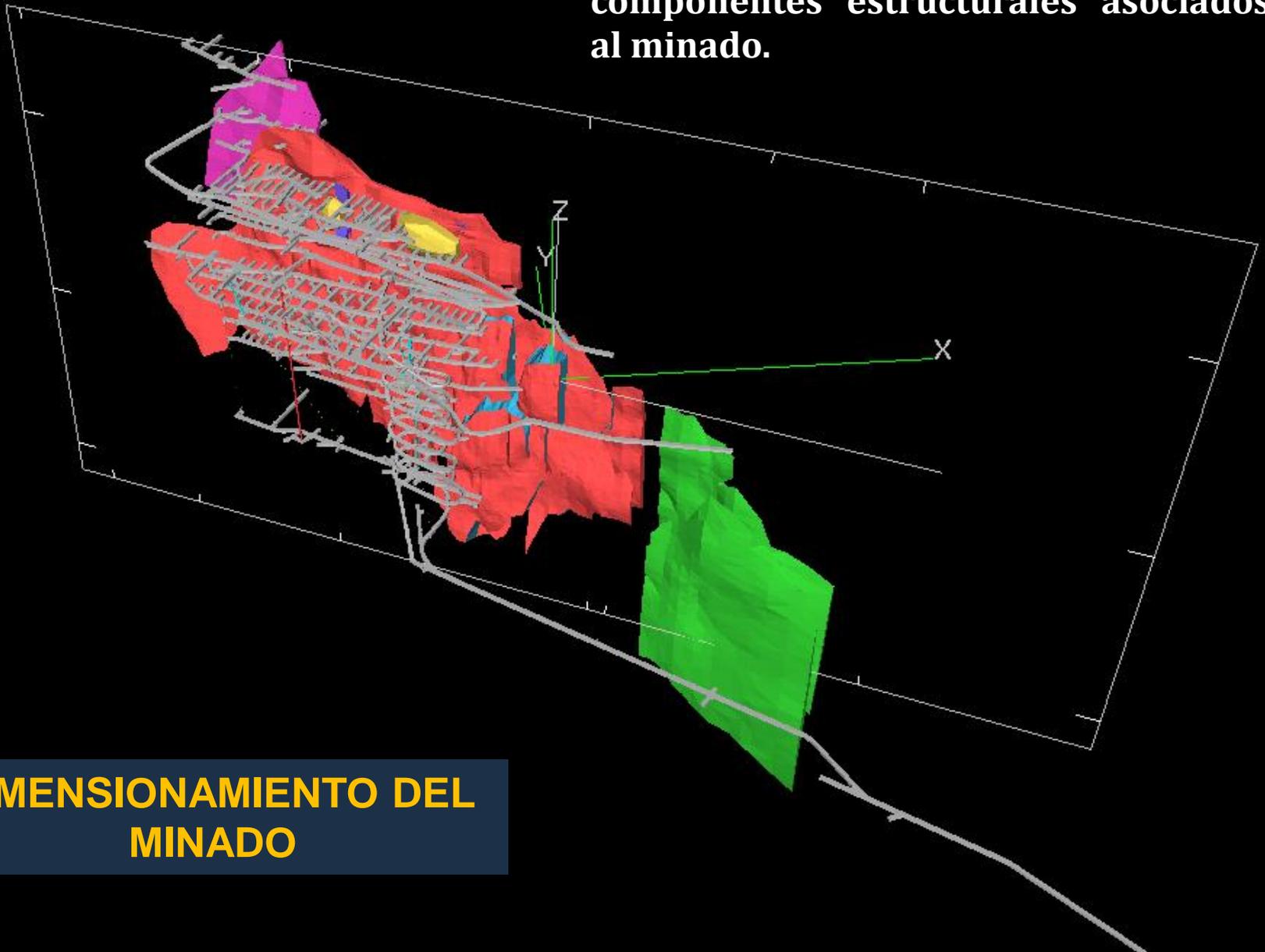
- Recuperación**
- Rendimientos mineros y mineralúrgicos**
- Dilución**
- Flexibilidad del método a condiciones cambiantes**
- Selectividad del método**
- Concentración o dispersión de los trabajos**
- Facilidad para mecanizar y automatizar**
- Intensidad de capital y mano de obra**

METODOS DE MINADO EN ORDEN DE COSTOS

Orden	Método de minado	Abreviación
1	Block ó Panel Caving	BC
2	Room and Pillar	R&P
3	Sub Level Stoping	SLS
4	Sub Level Caving	SLC
5	Cut and Fill Stoping	C&F
6	Vertical Crater Retreat	VCR
7	Top Slicing	TS
8	Shrinkage Stoping	SHS
9	Square Set Stoping	SQS



- Establecer dimensiones y esquemas adecuadas de los tajeos y de todos los componentes estructurales asociados al minado.

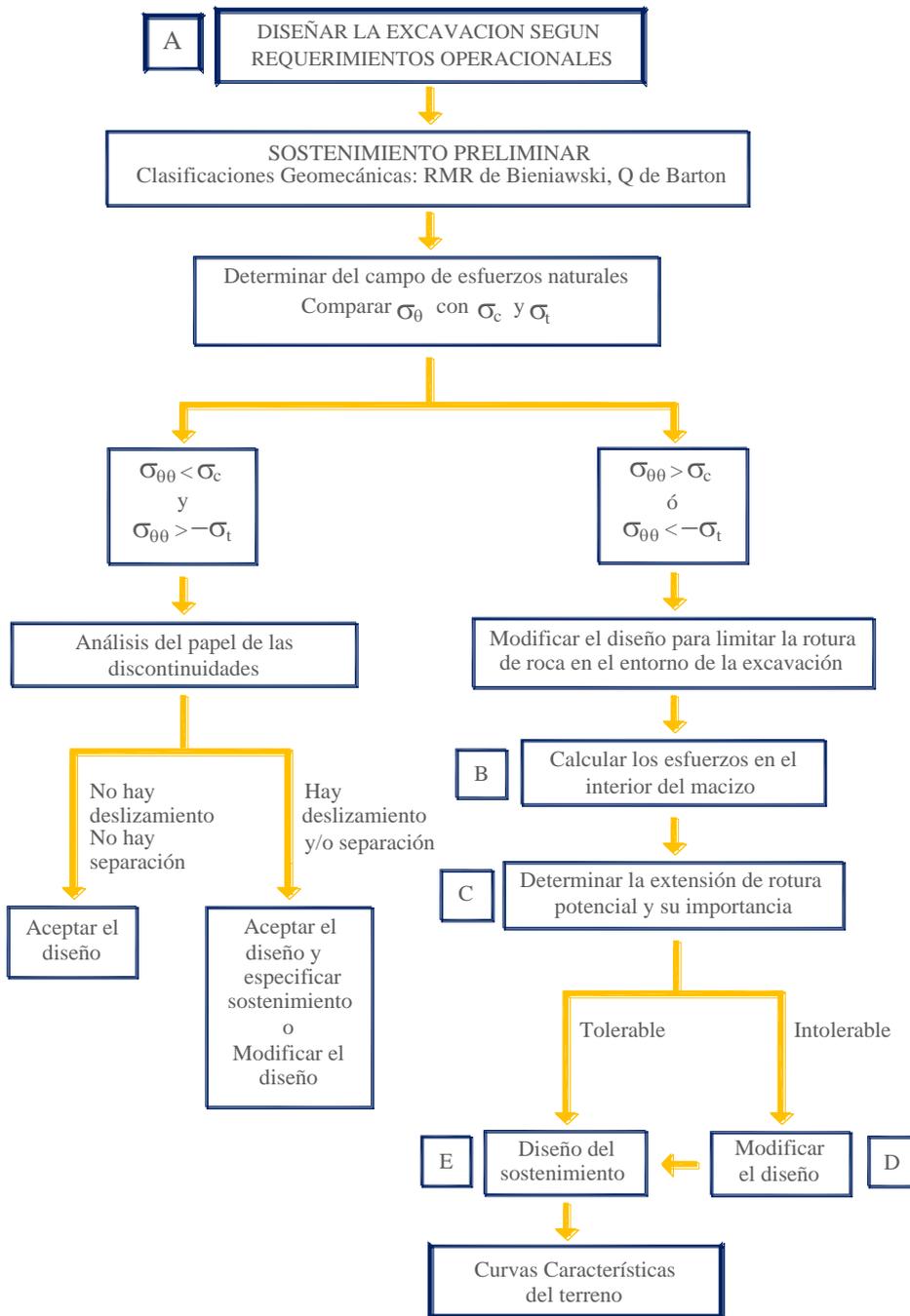


**DIMENSIONAMIENTO DEL
MINADO**

ANALISIS DE DISEÑO

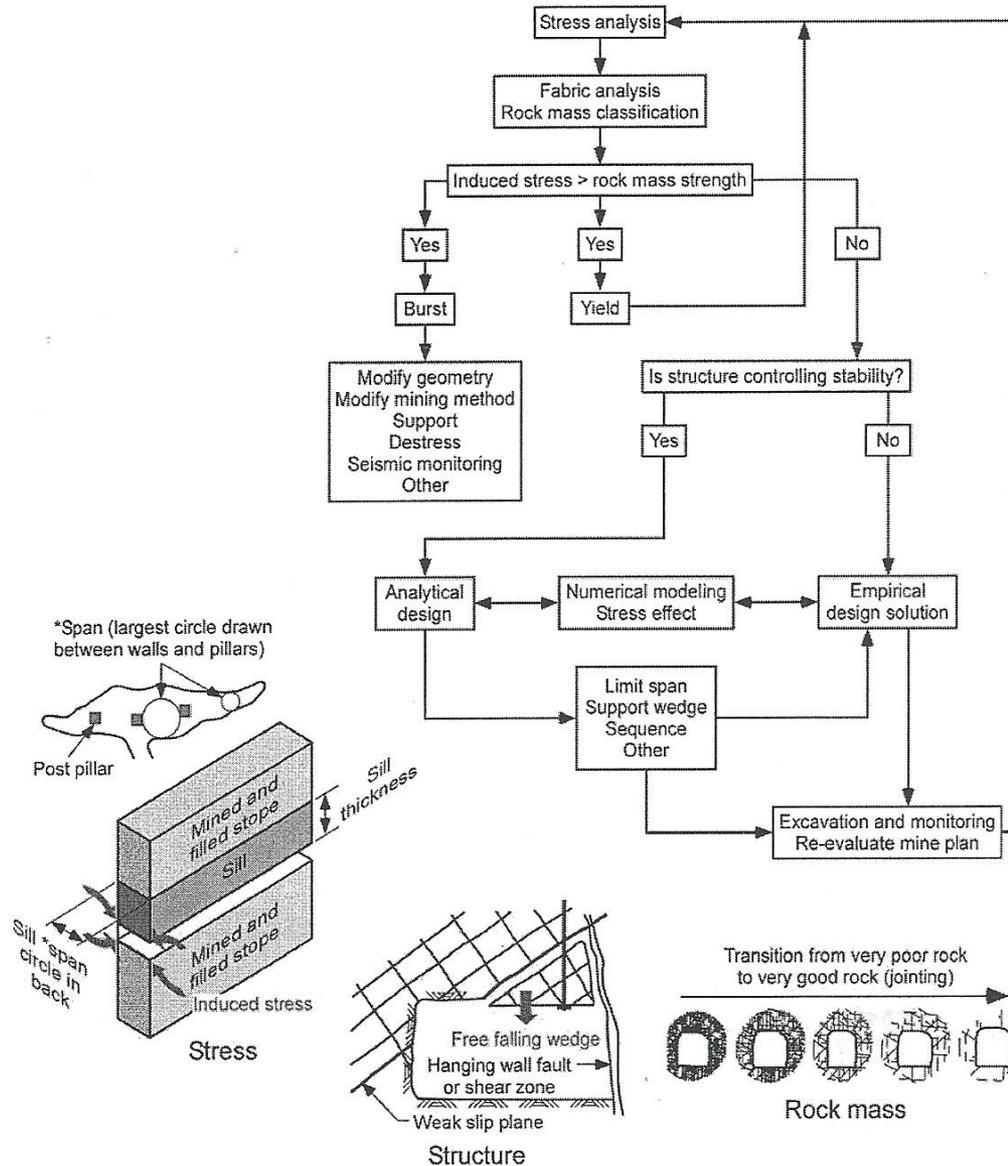
- Representa el corazón de la práctica de la geomecánica.
- Aquí se puede predecir usando técnicas matemáticas o numéricas apropiadas, el rendimiento mecánico de las configuraciones de minado seleccionadas y de las geometrías de las excavaciones, para las condiciones predominantes de la masa rocosa.
- Las herramientas analíticas pueden variar desde las más simples, como por ejemplo la teoría del área tributaria para el diseño de pilares, hasta las más avanzadas, como por ejemplo, los esquemas computacionales que consideran modelos constitutivos bastante complejos del comportamiento tanto de la masa rocosa como de sus elementos de fábrica.
- Producto de recientes desarrollos en la capacidad de los esquemas computacionales hoy en día disponibles, ha habido avances significativos, y mejoramiento de la confiabilidad, en la calidad del diseño estructural en roca.

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE EXCAVACIONES SUBTERRÁNEAS (Brady & Brown, 1993)



METODOLOGÍA DE DISEÑO

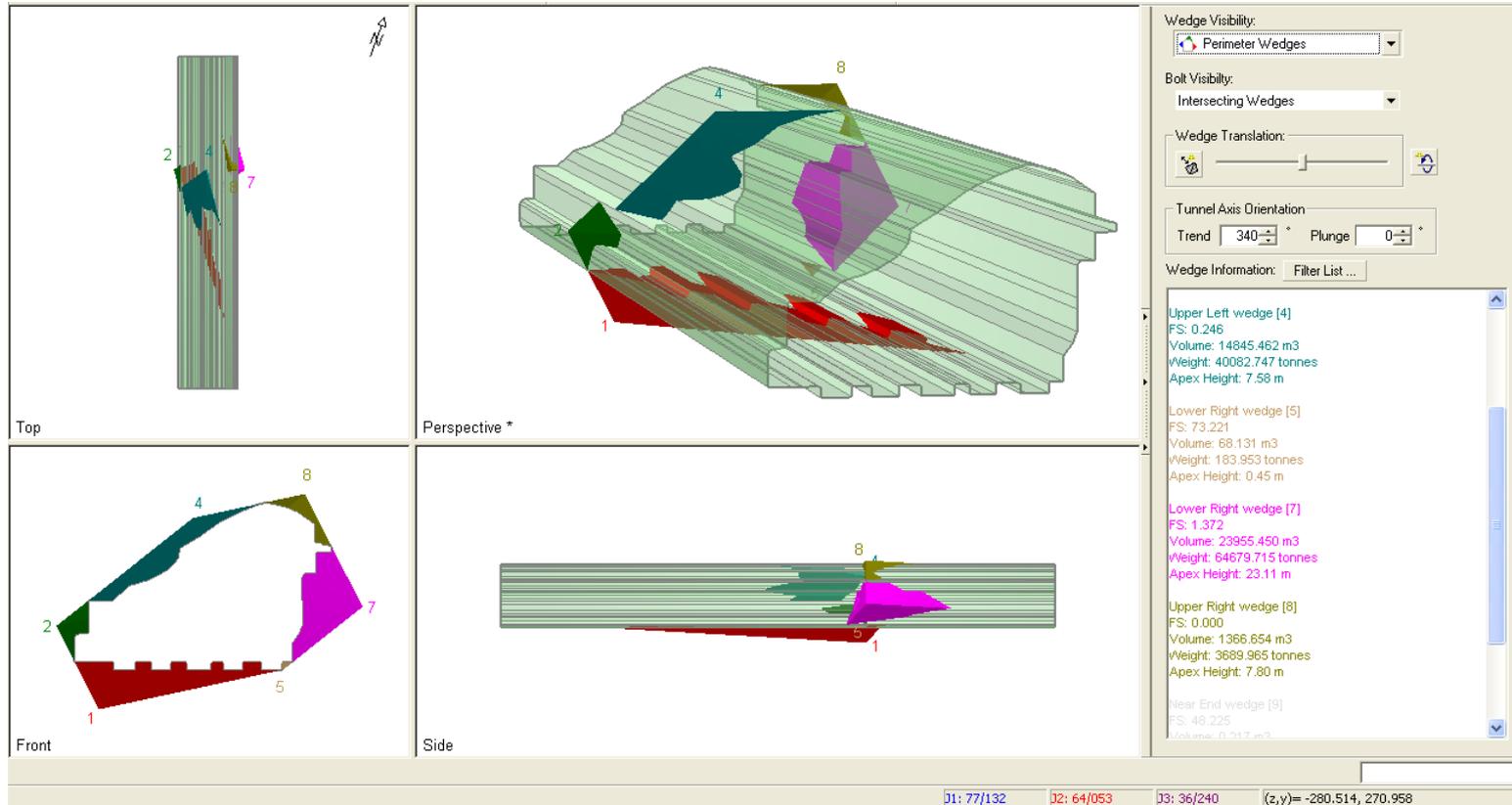
Ref: R. Pakalnis



ESTABILIDAD CONTROLADA POR ESTRUCTURAS

Análisis de cuñas – Programa UNWEDGE (Rocscience Inc. 2004)

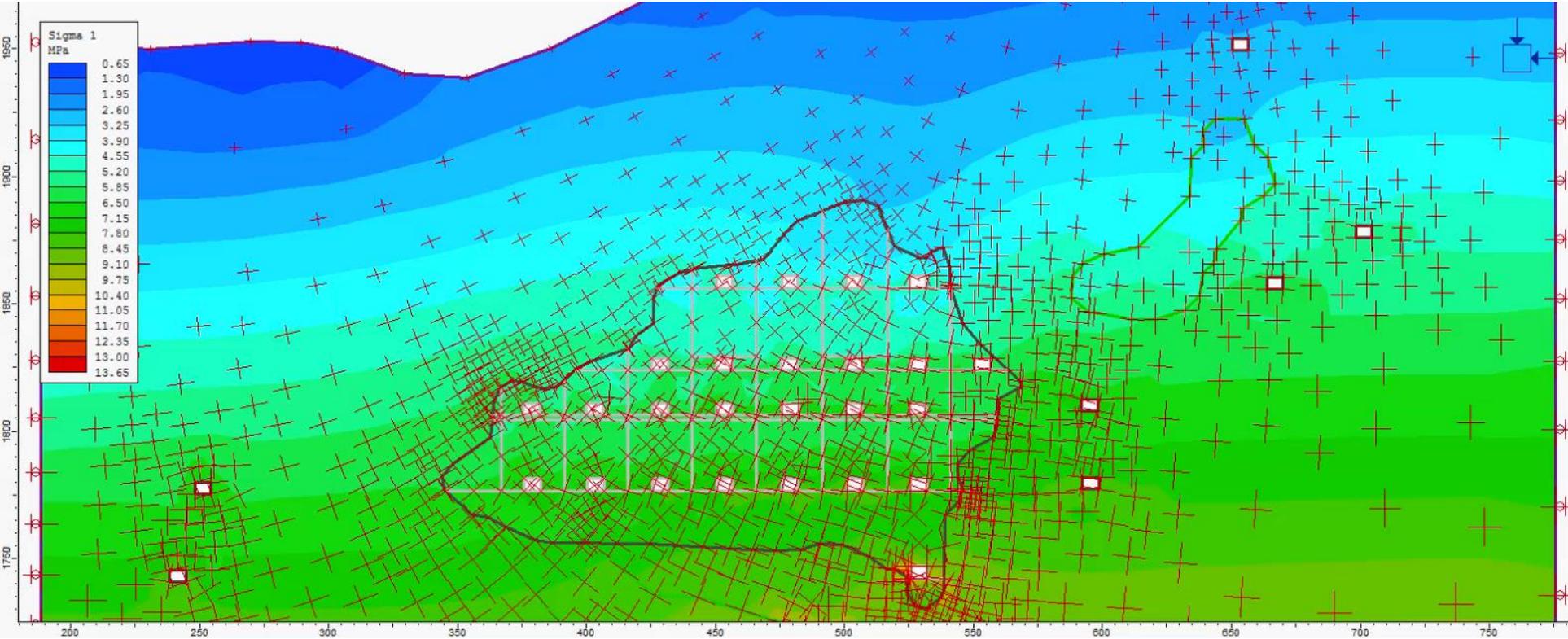
Tajeo Intermedio Central (Tajeo 287). Sección de la excavación 85 m x 65 m.



ESTABILIDAD CONTROLADA POR ESTRUCTURAS

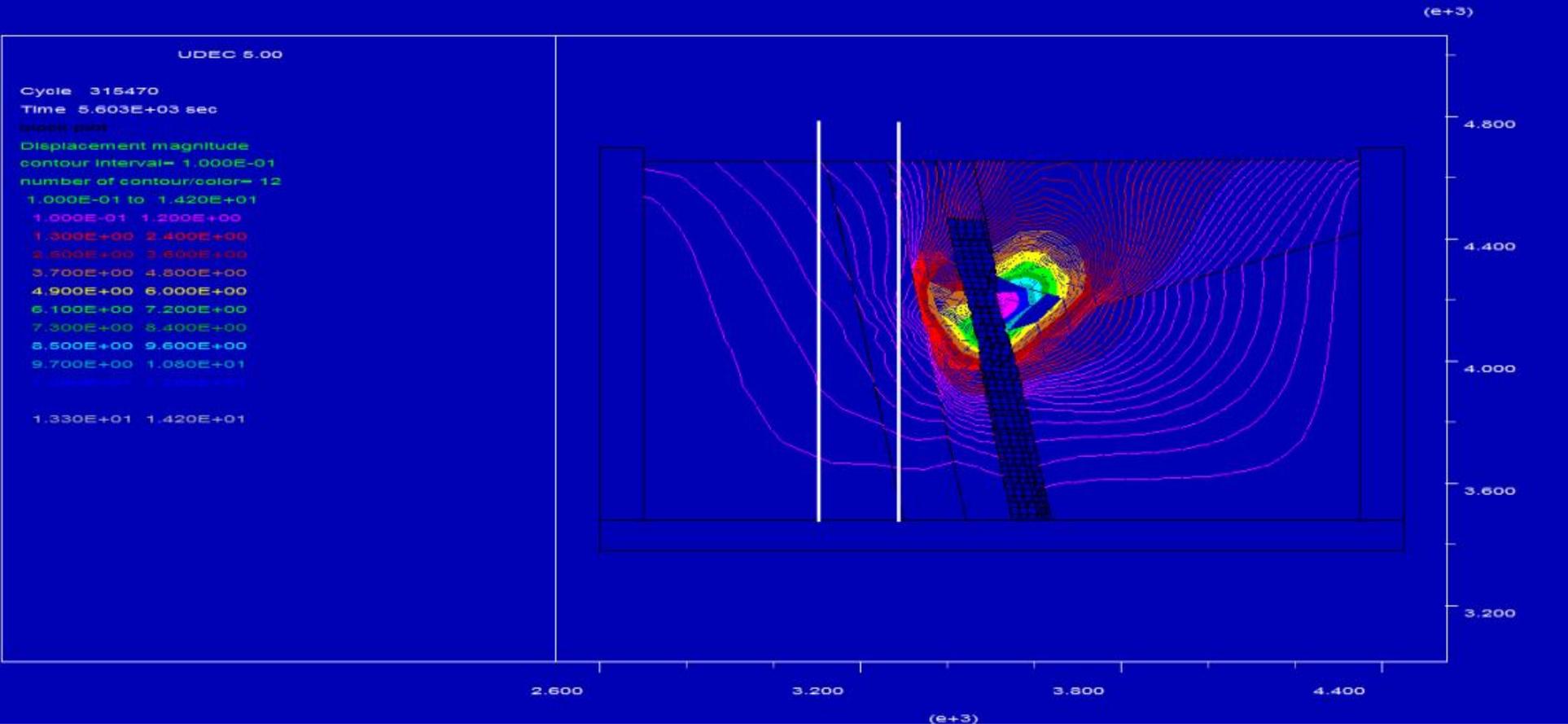
Tajo	Planta	Excavación	Discontinuidad crítica		Tipo de Inestabilidad Potencial				
			Junta	Falla Regional	Lajamiento	Pandeo	Biplanar	Cuñas	
								Colgada	Desliza por:
Tajeo Intermedio Central Secc. 3,4,5y6 Nvs. 0,-30,-46		Techo	Sist 3	-	-	-	Sist 2, Sist 3	Sist 1,2,3	-
		Pared NW	Sist 1	F4: 70/120	Sist 1	-	-	-	Sist 1, Sist 3
		Pared NE	Sist 2	-	Sist 2	-	-	-	Rota por Sist 1
		Pared SE	Sist 1	F3: 75/115	Sist 1	Sist 1	-	-	Sist 2
		Pared SW	Sist 2	-	Sist 3	Sist 3	-	-	Sist 3
Tajeo Intermedio Norte Secc. 10y11 Nvs. 0,-30		Techo	Sist 3	-	-	Sist 3	Sist 2, Sist 3	Sist 1,2,3	-
		Pared SW	Sist 2	-	-	-	-	-	Rota por Sist 1
		Pared NW	Sist 1	-	Sist 1	-	-	-	Sist 1, Sist 3
		Pared NE	Sist 2	-	Sist 2	-	-	-	Sist 3, Sist 2
		Pared SE	Sist 1	-	Sist 1	-	-	-	Sist 2
Tajeo 240 Secc. 5y6 Nvs. -46,-65		Techo	Sist 3	-	-	Sist 3	Sist 2, Sist 3	Sist 1,2,3	-
		Pared W	Sist 1	-	-	-	-	-	Sist 1
		Pared NW	Sist 1	-	Sist 1	-	-	-	Sist 1, Sist 3
		Pared NE	Sist 2	-	Sist 2	-	-	-	Sist 1, Sist 3
		Pared SE	Sist 1	-	Sist 1	-	-	-	Rota por Sist 3
		Pared SW	Sist 3	-	Sist 3	-	-	-	Sist 2

ESFUERZOS INDUCIDOS EN EL MINADO DEL YACIMIENTO



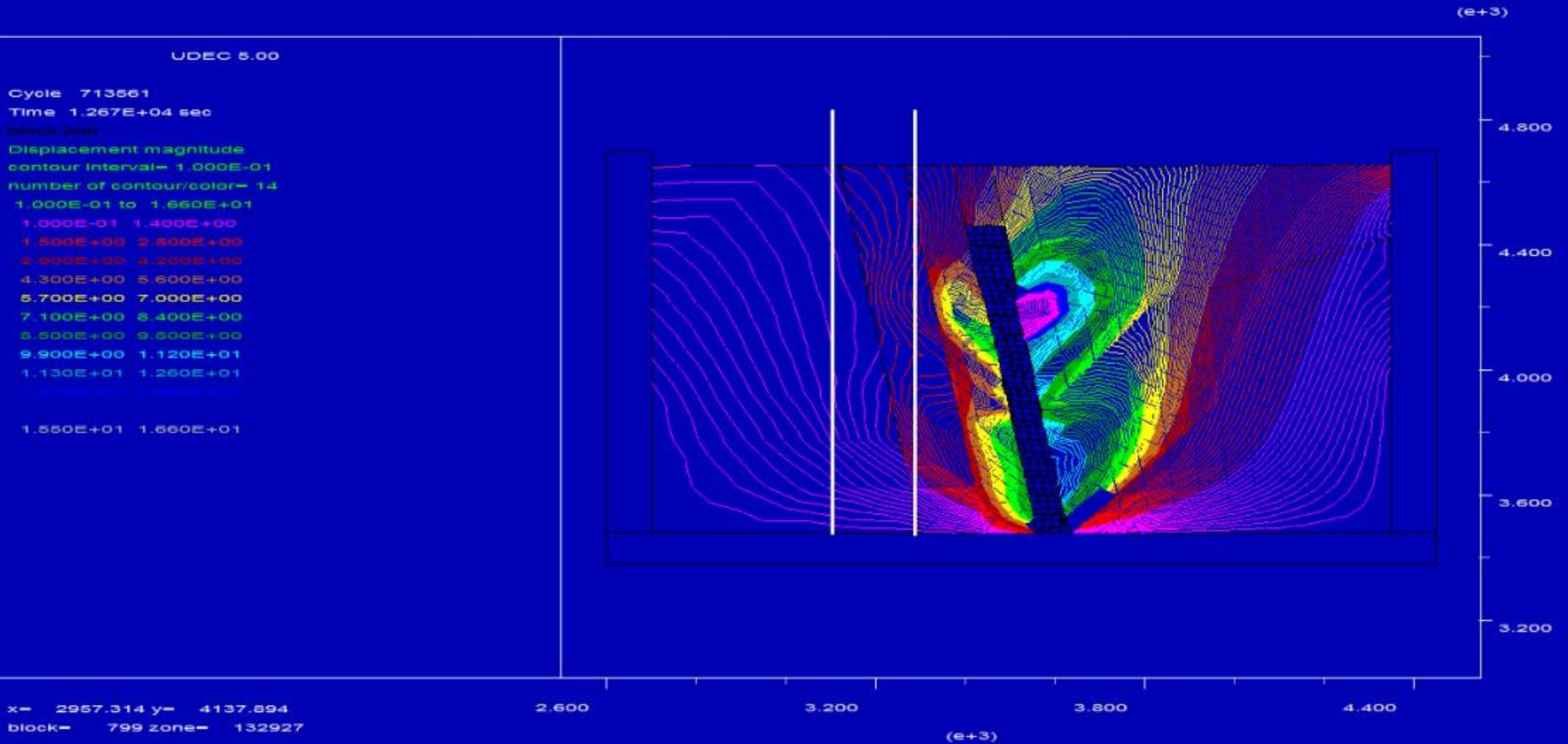
Contornos de desplazamiento total Fase 1

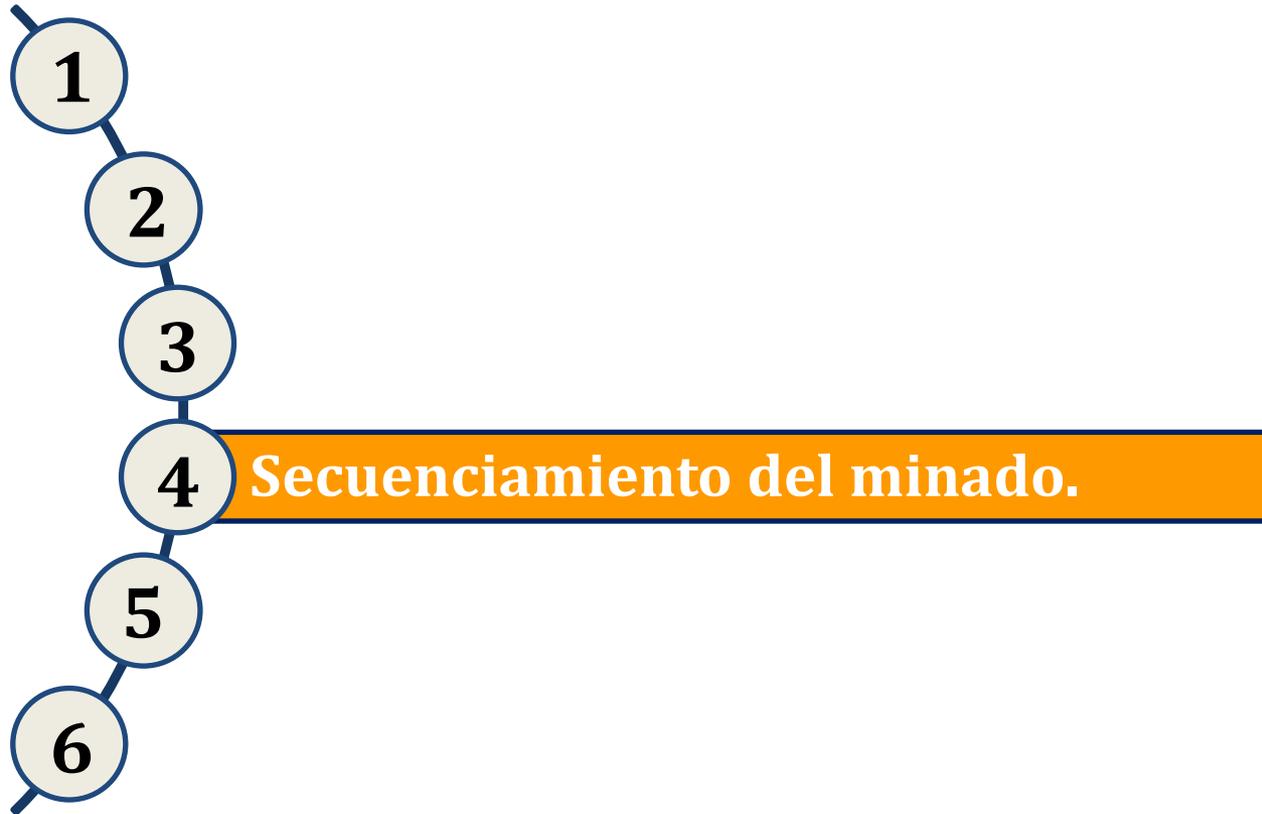
Job Title : "prueba de hundimiento mina Yauricocha"



Contornos de desplazamiento total Fase 3

Job Title : "prueba de hundimiento mina Yauricocha"



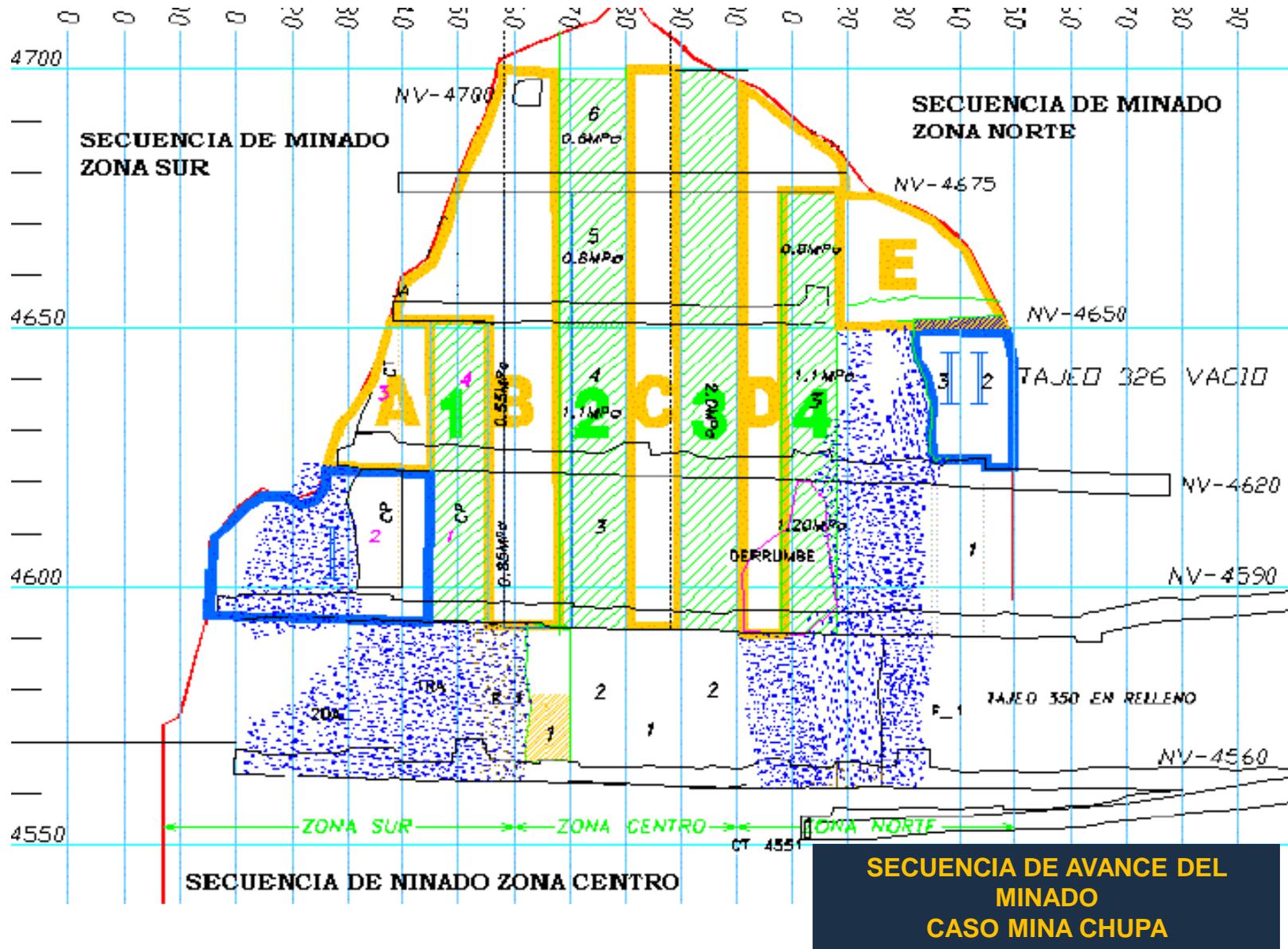


SECUENCIAMIENTO DEL MINADO

- Establecer la dirección general del avance del minado a través del cuerpo mineralizado.
- Establecer la secuencia de extracción de los blocks de mineral y de los pilares remanentes, preservando la estabilidad estructural de la mina a nivel global y local.

OBJETIVOS

- Maximizar la recuperación del mineral.
- Extracción temprana de bloques que tienen soporte natural.
- Lograr tasas de extracción uniformes espacialmente.
- Ordenar la retirada del minado hacia áreas sólidas y estables.
- Evitar dejar pilares remanentes dispersos.
- Minimizar áreas de altos esfuerzos inducidos.
- Controlar la estabilidad global de la mina y la sismicidad.
- Proteger las principales instalaciones de la mina.
- Limitar la cantidad de trabajo realizado en áreas altamente esforzadas o potencialmente inestables.



**SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO
CASO MINA CHUPA**

OBJETIVO:

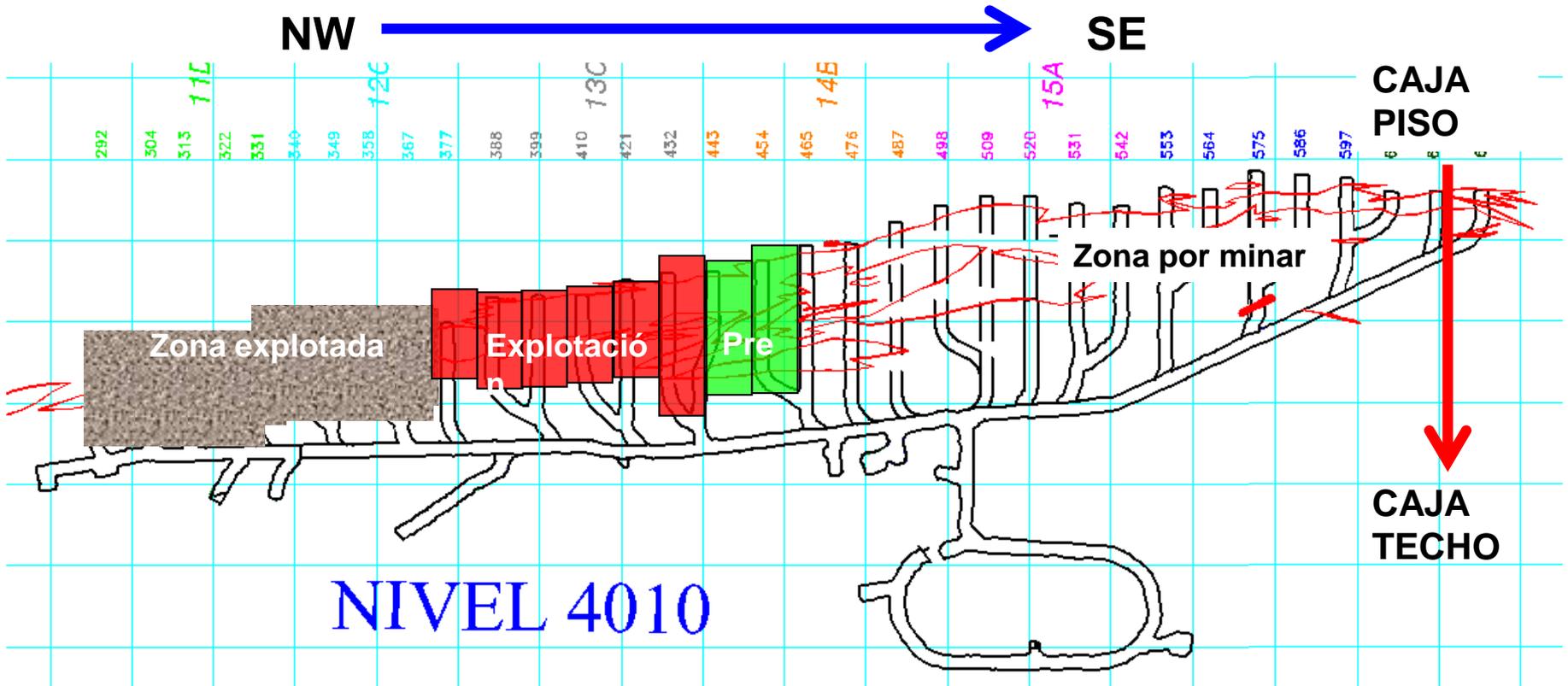
- Minimizar los riesgos a los recursos empleados.
- Mantener mineral preparado.
- Mantener una distribución de leyes promedio.

**SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO
CASO MINA ROSAURA**

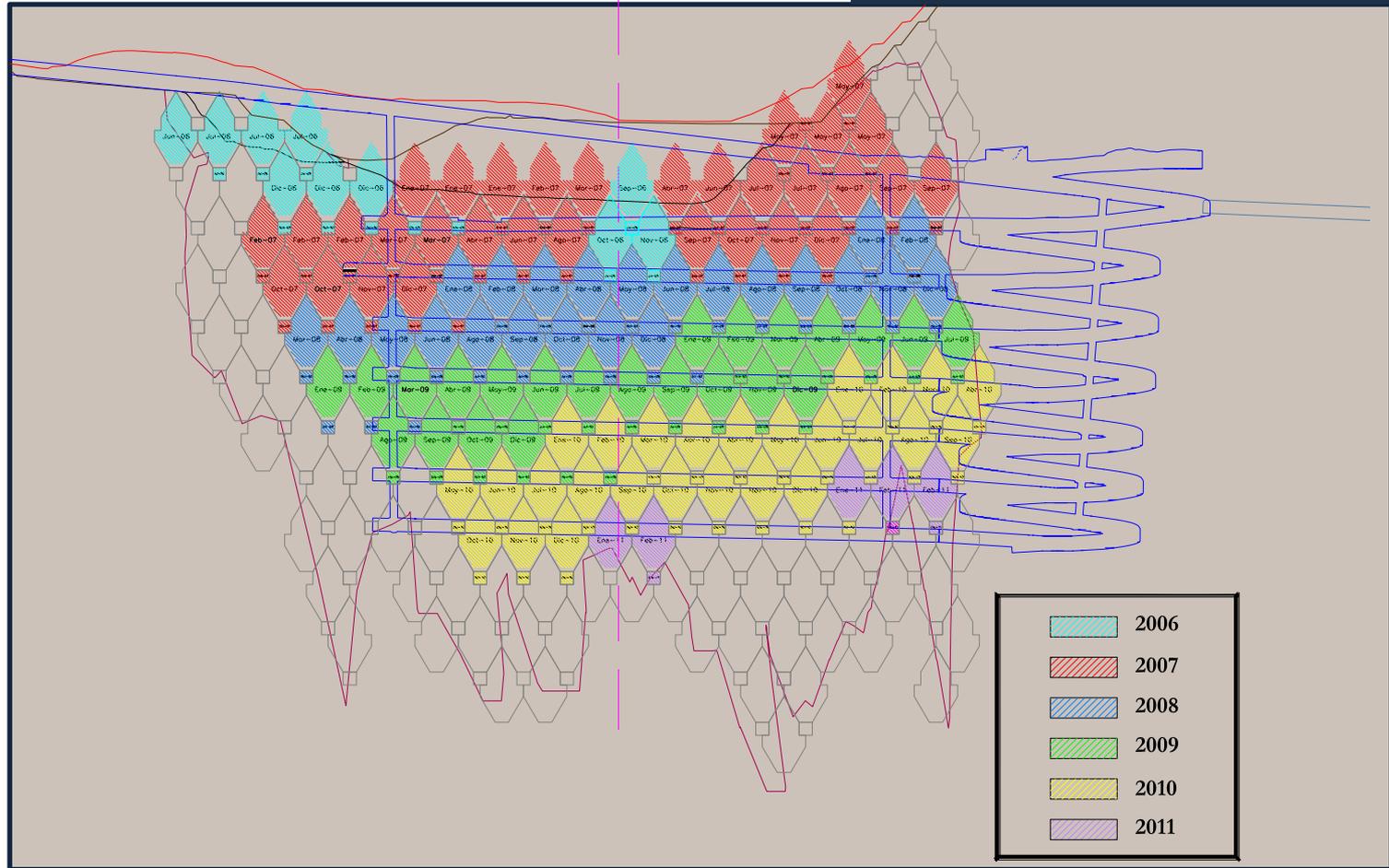


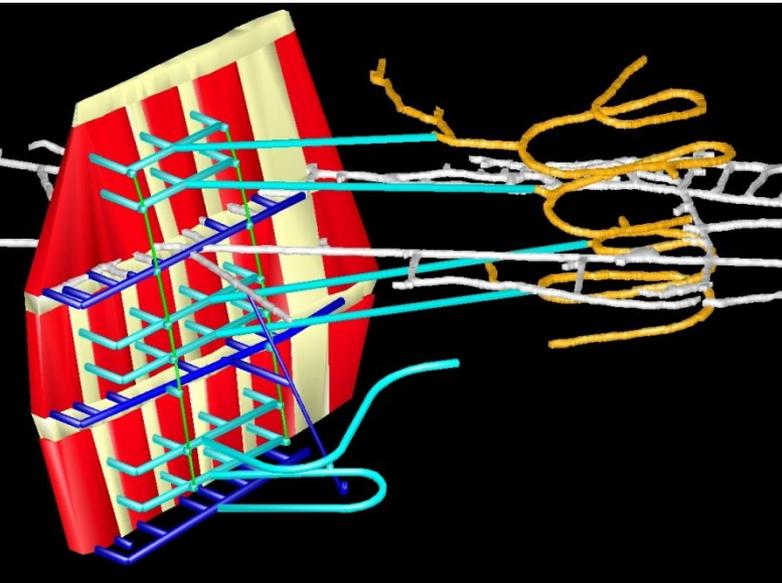
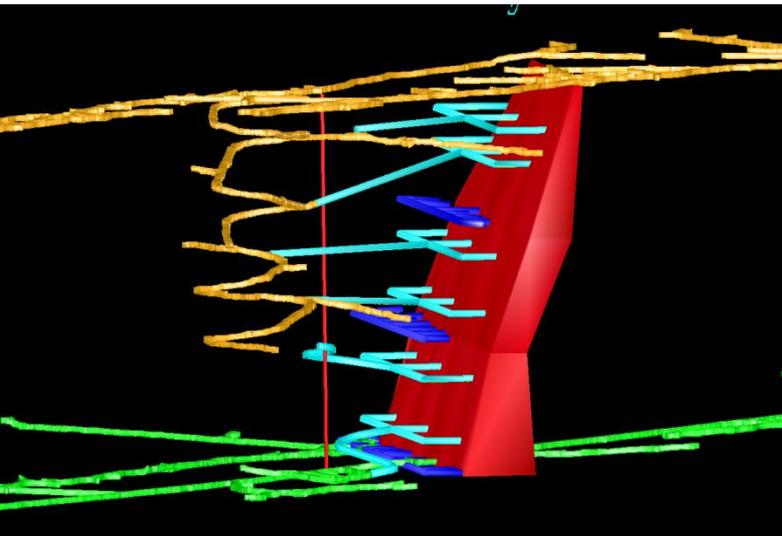
En retirada.
De NW a SE.
De caja piso a caja techo.

**SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO
CASO MINA ROSAURA**

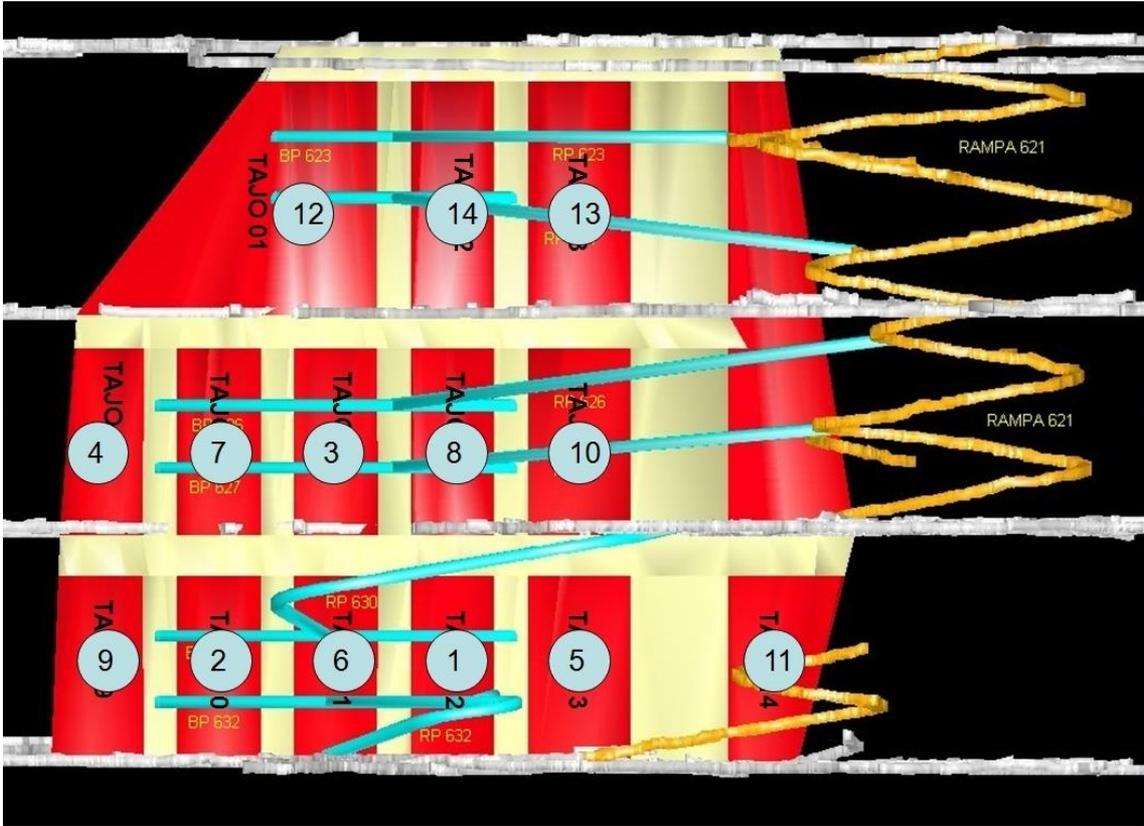


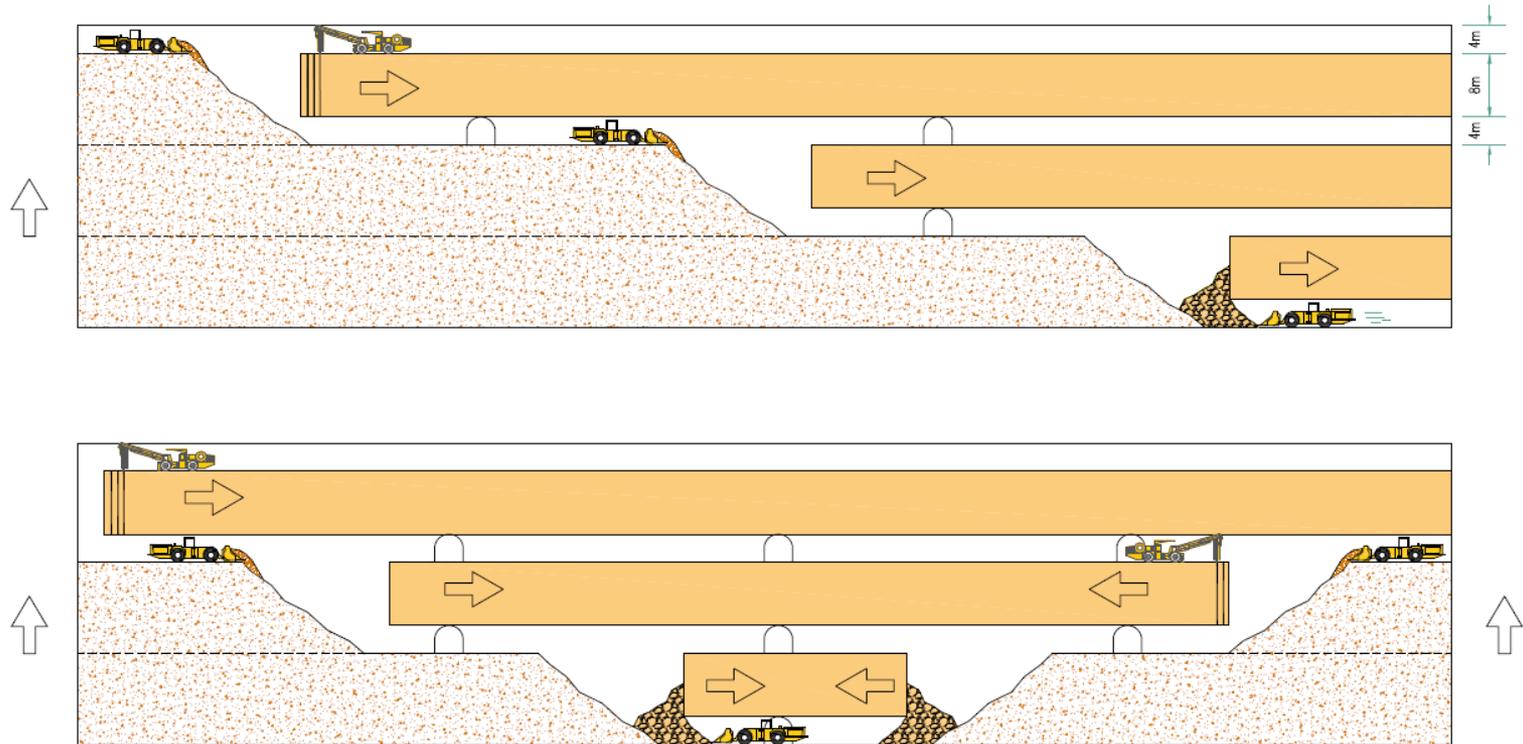
SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO CASO MINA TINYAG





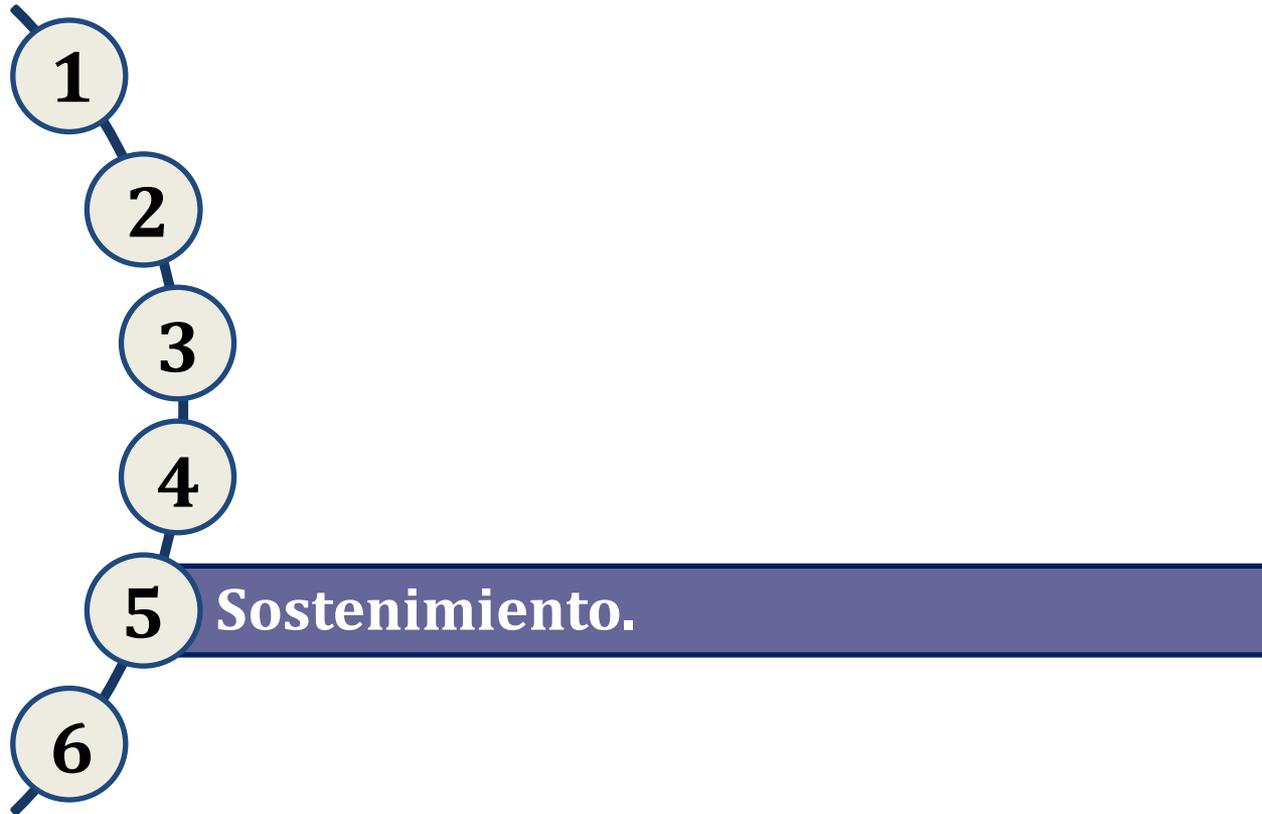
**SECUENCIA DE AVANCE DEL MINADO
CASO MINA YAULIYACU**





Esquema de secuencia del método Bench and Fill (B&F) para tener mayores frentes de producción

**SECUENCIA DE AVANCE DEL
MINADO
METODO SARC**



SOSTENIMIENTO CON ESTRUCTURAS NATURALES Y ARTIFICIALES

- **Estructuras naturales: efecto arco, pilares y escudos.**
- **Estructuras artificiales para sostenimiento activo y pasivo: pernos de roca, cablebolt, malla, cintas, shotcrete, cimbras, gatas, madera, relleno y otras.**
- **Importante: Controles de calidad antes, durante y después de la instalación del sostenimiento: materiales, equipos, procedimientos de instalación y rendimiento del sostenimiento.**

METODOS DE DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO

- Utilización de los criterios de clasificación geomecánica de la masa rocosa: RMR, Q, y otros.
- Análisis de equilibrio límite o de estabilidad estructuralmente controlada.
- Aproximación “Convergencia – Confinamiento” o RSI (Interacción Roca – Sostenimiento).
- MATM (Nuevo Método Austriaco de Tunelería).
- Métodos numéricos: MEF, MEB, MED.
- Modelos físicos a escala reducida (maquetas).

CRITERIOS DE CLASIFICACION GEOMECANICA

COMPARACION DE LOS REQUERIMIENTOS DE SOTENIMIENTO Y EXCAVACION ESTIMADOS

Basada en el Sistema de Clasificación de la Masa Rocosa

Excavación, máxima luz sin sostenimiento y predicciones de tiempo de autosostenimiento

Tipo de roca	Requerimientos de Excavación	Máxima Luz sin Sostenimiento (m)		Tiempo Estimado de Auto-sostenimiento (hr)	
		RMR (1)	Q (2)	RMR (3)	NATM (4)
I	Frente completo, sin límite para la longitud de avance. Posible separación a lo largo de discontinuidades existentes. Sostenimiento según se requiera por seguridad	18	18	100,000	En la bóveda, semanas En las paredes ilimitado
II	Frente completo, 3 m por avance de turno. Esfuerzos de tracción en la bóveda y las juntas tienden a dar lugar a inestabilidades. Sostenimiento como se requiera por seguridad luego de cada avance. Soporte completo dentro de los 15m del frente.	8	8	500	En la bóveda, días En las paredes semanas
III	Frente completo. Avance de 2.5 a 3.0 m. Altos esfuerzos de tracción en la bóveda que pueden dar lugar a desprendimientos en el techo. Fallas en cuña en las paredes. Comienza el shotcrete inicial y la colocación de pernos en la bóveda luego de cada avance. Sostenimiento completo a 10 m del frente.	4	5	24	En la bóveda y las paredes varias horas
IV	Frente completo. Avance de 2.0 m. La resistencia de la roca se reduce causando sobreexcavación y posiblemente perturbando las condiciones del terreno. Shotcrete inicial completo y pernos en la bóveda luego de cada avance. Todo el sostenimiento terminado incluyendo las cerchas, a 6.0m del frente.	2	2	1	Bóveda y paredes pocas horas en las
V	Frente completo. Avance < 1.5 m. (en función del espaciamientos de las cerchas). Los esfuerzos in-situ afectan las condiciones del terreno que están influenciadas por las discontinuidades desfavorablemente orientadas. La colocación del sostenimiento simultaneo con la excavación Shotcrete y pernos tan pronto como sea posible luego de la voladura. Sostenimiento completo a 1.5 m del frente.	1	1	>0.5	Muy limitado

(1) Máxima luz sin sostenimiento para el sistema RMR, en base a la fig. 7.6, Bieniawski, 1989.

(2) Máxima luz sin sostenimiento = $2 \cdot \text{ESR} \cdot (Q^{0.4})$. Ver ecuación 132 de Hoek & Brown, 1980.

(3) Basado en la Figura 4.2 (Bieniawski, 1989).

(4) Basado en el sistema de clasificación NATM (informado por Bieniawski, 1989).

CRITERIOS DE CLASIFICACION GEOMECANICA

RECOMENDACIONES PELIMINARES DE SOSTENIMIENTO EN BASE A LAS CLASIFICACIONES GEOMECANICAS

Túnel de aducción: Km 0+000 al Km 1+550 - TIPO DE ROCA PIZARRA

	Tipo II	Tipo III	Tipo IV	Tipo V
a) Clasificación Geomecánica (RMR)				
Resistencia de la roca intacta	70-100 (9)	45-80 (7)	25-50 (4)	5-25 (2)
RQD	50-75 (13)	25-50 (8)	0-25 (5)	<25 (3)
Espaciamiento promedio - mm	100-200 (8)	60-200 (8)	50-100 (6)	< 60 (5)
Condición de juntas	Suave, muy cont. Estrecho fresco (19)	Suave, muy cont. aprox. <1mm Liger. Intem. (17)	Suave, muy cont. aprox. 0.1-1mm, arcilla Liger. intemp. (13)	Espejo de falla, Cont. aprox. >5mm, arcilla altamen. intemp. (4)
Agua subterránea	Seco húmedo (12)	Húmedo-mojado (6)	Húmedo-mojado (6)	Mojado-Flujo (3)
Orientación del Túnel	Muy favorable (0)	Muy favorable (0)	Muy favorable (0)	Muy favorable (0)
Valoración promedio total	61	46	34	17

b) Índice NGI de calidad del túnel (Sistema Q)

RQD	50-75	25-50	0-25	<25
# Sistema de juntas (Jn)	9	9	15	15
# Rugosidad de juntas (Jr)	1	1	1	0.5
# Alteración de juntas (Ja)	0.75	1	4	6
Factor de reducción por agua (Jw)	1	0.66	0.66	0.5
Factor de Reducción de esfuerzos	1.5	1.5	2.5	5
Relación promedio total (Q)	5.93	1.71	0.09	0.006
Q calculado en base al RMR	6.61	1.25	0.33	0.05

RECOMENDACIONES PELIMINARES DE SOSTENIMIENTO EN BASE A LAS CLASIFICACIONES GEOMECANICAS

Túnel de aducción: Km 0+000 al Km 1+550 - TIPO DE ROCA PIZARRA

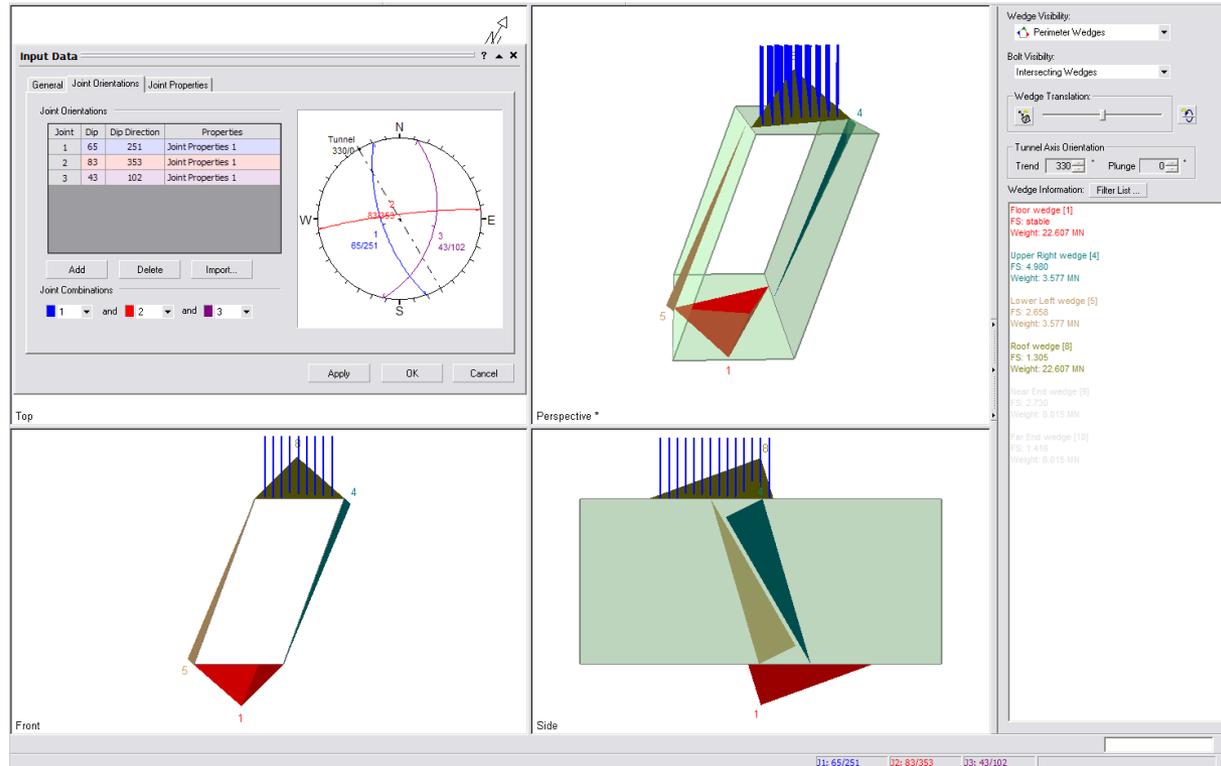
c) Comparación del sostenimiento estimado (Sistema RMR y Q)

Tipo de Roca	Condición de roca		Sistema de valoración de la masa rocosa RMR			Índice NGI de calidad tunelera (Sistema Q)		
	RMR	Q	Pernos	Shotcrete	Cerchas	Pernos	Shotcrete	Cerchas
I	61	5.93	Pernos tensados de 1.5m sólo en la bóveda	50mm de shotcrete sin refuerzo en la bóveda	nada	No tensados de 1.5 m en disposición rectangular de 1.0m x 1.5m	No reforzado, de 20 a 30 mm en la bóveda (ver nota 7)	nada
II	46	1.71	De 1.5 a 2.0m de longitud dispuesta en 1.5m x 2.0m incluyendo las paredes	100mm de shotcrete reforzado en la bóveda 30mm no reforzado en las paredes	nada	No tensados, de 1.5 a 2.0m, en disposición cuadrada de 1.0m x 1.0m, cuando el espaciamiento de juntas sea > 100 mm +/-	No reforzado, de 20 a 30 mm (ver nota 7)	nada
III	34	0.09	Pernos de 2.0 m disposición cuadrada, de 1.0m x 1.0m, en la bóveda y paredes	Reforzado de 150mm, en la bóveda y de 100mm en las paredes	Cerchas de ligeras a medias, @ 1.0 m a 1.5m, según se requiera	No tensados, de 2.0m, en disposición cuadrada de 1.0m x 1.0m, cuando el espaciamiento de juntas sea > 100 mm +/-	(ver nota 1)	nada
IV	17	0.006	Pernos tensados de 2m disposición cuadrada, de 1.0m x 1.5m en la bóveda, paredes y piso	de 100 a 200mm, con refuerzo en la bóveda, de 100mm, con refuerzo en las paredes, y de 50mm sin refuerzo en el frente.	Cerchas medias a pesadas, @ 0.75m, con encostillado de acero, Marchavante según se requiera. Cierre del piso.	Tensados, de 2m, en disposición rectangular de 0.5m x 1.0 m	Reforzado, de 200 a 600 mm (ver nota 1, 2).	nada

(1) En la bóveda y paredes del túnel en pizarra se requiere una capa de 25 a 50 mm de espesor de shotcrete para la protección contra la erosión

(2) Hoek & Brown, 1980 sugieren que la combinación de 50 a 100 mm de espesor de shotcrete con cerchas de acero, encostillado y relleno de concreto sería más compatible con la práctica norteamericana.

ESTABILIDAD ESTRUCTURALMENTE CONTROLADA



Alternativa de estabilización con cablebolts de grandes cuñas potencialmente inestables formadas en el techo de tajeos - Método de minado subniveles con taladros largos.

METODO GRAFICO DE ESTABILIDAD

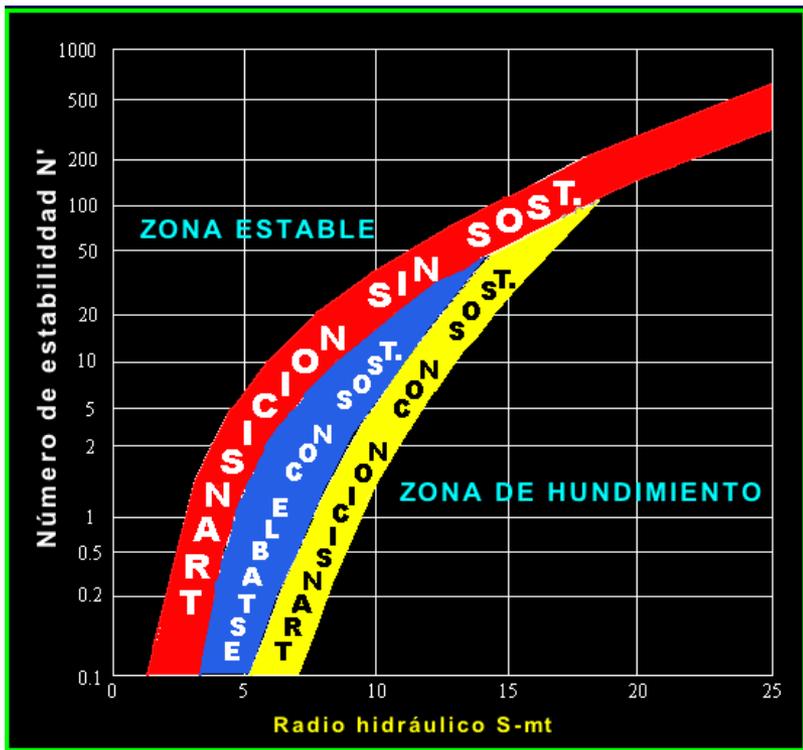


GRAFICO DE ESTABILIDAD

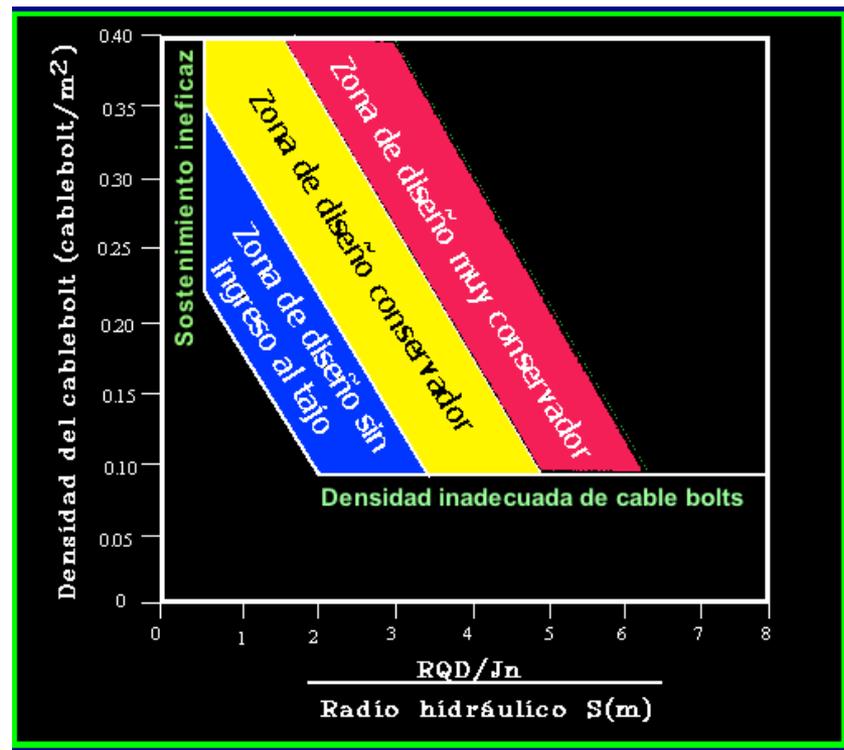
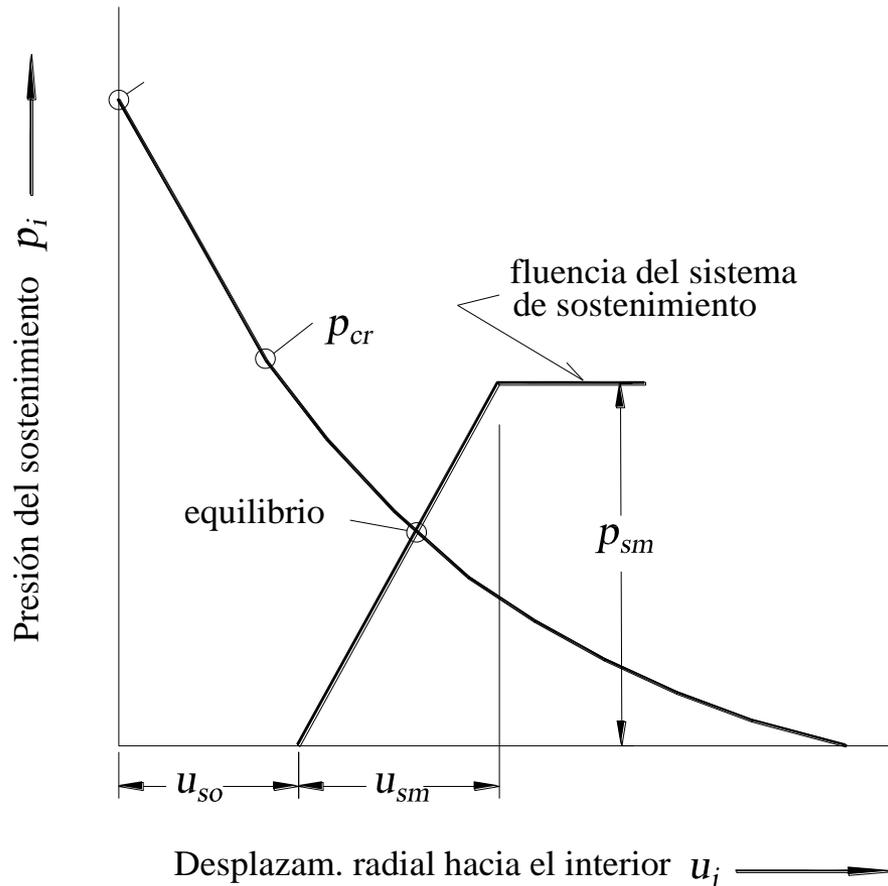


GRAFICO DE ESTIMACION DEL SOSTENIMIENTO CON CABLEBOLT

CONVERGENCIA - CONFINAMIENTO O RSI



Respuesta del sistema de sostenimiento al desplazamiento de la pared del túnel, resultante en el establecimiento del equilibrio.

CONVERGENCIA – CONFINAMIENTO O RSI

ANALISIS DE INTERACCION ROCA SOSTENIMIENTO (RSI) - METODO DE HOEK/BROWN

Criterio de Falla de Hoek and Brown

Ing° D. Córdoba R. Marzo, 2008

Estructura Tipo Roca

1. DESCRIPCION DE LAS PROPIEDADES DE LA ROCA (Mina Atacocha)

Ubicación	Marcapunta Oeste	340	340	340	340	340
		Clase IIIA	Clase IIIB	Clase IVA	Clase IVB	Clase V
Rock Mass Rating (RMR)		55	45	35	25	15
Broken Rock Rating (RMR)		40	36	25	19	10
Intact Rock Strength		75	55	32	19	10
Intact Rock constant (mi)		12	12	12	12	12
Intact Rock constant (si)		1	1	1	1	1
Elastic Modulus (MPa)		18,372	7,500	4,200	2,400	1,300
Poissons ratio		0.25	0.26	0.27	0.28	0.30
Rock mass constant (m)		0.48	0.24	0.12	0.06	0.03
Rock mass constant (s)		5.53E-04	1.04E-04	1.97E-05	3.7E-06	7.04E-07
Broken Rock Constant (mr)		0.165	0.124	0.057	0.037	0.019
Broken Rock Constant (sr)		0	0	0	0	0
Poisson's Ratio (Broken rock)		0.25	0.31	0.32	0.33	0.35
Density Broken Rock(MN/m³)		0.024	0.024	0.024	0.024	0.024
Unit Weight Intact (MN/m³)		0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
In situ Stress (MPa)		9.2	9.2	9.2	9.2	9.2
Tunnel radius (m)		2.8	2.8	2.8	2.8	2.8

1A. ESTIMACION PROPIEDADES DE LA ROCA DE LA ZONA PLASTICA

	Clase IIIA	Clase IIIB	Clase IVA	Clase IVB	Clase V
Strength Rating	4	4	4	2	2
RQD Rating	8	8	3	3	3
Spacing Rating	8	8	5	5	5
Joint Condition	13	9	9	5	0
Groundwater	7	7	4	4	0
Plastic Zone RMR	40	36	25	19	10

CONVERGENCIA - CONFINAMIENTO O RSI

AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR			
7	3. SUPPORT DATA																			
8	SHOTCRETE PROPERTIES																			
9	Módulo	Ec	20000 (MPa)															Lattice Girder Properties		
10	Radio de Poisson	vc	0.25															Span	Diámetro	Area del
11	Resistencia Compresiva	Gc	25 (MPa)															Maxim.	Barra	Acero
12	PROPIEDADES DEL PERNO DE ROCA																			
13	Módulo	Eb	207000 (MPa)															Tamaño de varilla		
14	Rigidez del Perno	Q	0.018 m/MN 25															recomendada		
15		Q	0.018 m/MN																	
16	Resistencia Ultima	Tbf	Grado del Acero		75	150	A615 R1H	A615 R1G												
17			Resisten. de Diseño (60%UIT)		310	620	350	425												
18	PROPIEDADES DE LOS ARCOS																			
19	Ancho	w	Light 6I12		Medium	Heavy	V Light 4W13													
20	Profundidad	X	0.0762		0.1059	0.3048	0.1529													
21	Area de la Sección	As	0.1524		0.2023	0.3048	0.1575													
22	Momento de Inercia	Is	0.0023		0.004	0.0123	0.0038													
23	Módulo del Acero	Es	8.7E-06		2.67E-05	0.0002	1.7E-05													
24	Resistencia a la fluencia	Gys	207000 (MPa)																	
25	Modulo del Bloqueo	Eb	248 (MPa)																	
26		Eb	10000 (MPa)		Bloque rígido															
27		Eb	500 (MPa)		Bloque no rígido															
28	4. METODO DE ANALISIS HOEK & BROWN PARA EL (LOS) SISTEMA(S) DE SOSTENIMIENTO SELECCIONADO(S)																			
29	0 Rampa de Acceso - Marcapunta Oeste Valor. RMR 55 Altura Encampane (m): 340																			
30	TIPO DE SOSTENIMIENTO																			
31	PERNOS DE ROCA																			
32	Longitud	Diam.	Espaciamiento		Tbf	Q	Psb	Kb	Umax	Sistema Combinado			ESPESOR DE LA ZONA PLASTICA (re-r)							
33	(m)	(mm)	Sc	SI	(MN)				(mm)	Uc(max)	Presión de	FOS	Presión Interna del	Presión de la Zona						
34	3	22	2	2	0.117841	0.018	0.029	12.2	6.6	3.1	0.312	1.7	0.312	3.0						
35	SHOTCRETE																			
36	Espesor	Grado del Acero del Perno:		75	*	Psc	Kc	Umax	Presión Adicional Max.			0.015	0.092	3.9						
37	(mm)	* Resistencia del Perno = 60% R. UI.															del Sostenimiento	0.184	3.5	
38	30																con Pernos (MPa)**	0.367	2.9	
39	ARCOS DE ACERO																			
40	O VIGAS																			
41	RETICULADAS																			
42	Tipo de Sección	Espacia	Detalle de los Tacos		Pss	Ks	Umax	Deformación Pronostica			12	3.492	0.0							
43	***	Arcos	Tipo	Angulo (*)	Espesor	(m)				Longitud Teórica del Perno fuera de la Zona Plástica			-0.3 m							
44	V Light	20	hard	11.25	0.15	0.028	12.6	6.1	**** Pernos que terminan dentro Zona Plástica, requiere shotcrete			1.5								
45	* Se asume que los pernos son instalados antes de completar el espesor del shotcrete, de tal manera de lograr una completa presión del sostenimiento (máxima deformación)																			
46	**** Multiplicador de la Presión de Sost. Mínimo																			
47	Propiedades del Conjunto de Arcos de Acero																			
48	W	X	As	Is	Eb	Angulo (radianes)	b/2	Alfa (ass.)	Fst	Psg	Kg (Acero M16)									
49	0.152908	0.15748	0.0038	1.7E-05	10000	0.19635				0.000										
50	4. METODO DE ANALISIS HOEK & BROWN PARA EL (LOS) SISTEMA(S) DE SOSTENIMIENTO SELECCIONADO(S)																			
51	0 Rampa de Acceso - Marcapunta Oeste Valor. RMR 45 Altura Encampane (m): 340																			
52	TIPO DE SOSTENIMIENTO																			
53	PERNOS DE ROCA																			
54	Longitud	Diam.	Espaciamiento		Tbf	Q	Psb	Kb	Umax	Sistema Combinado			ESPESOR DE LA ZONA PLASTICA (re-r)							
55	(m)	(mm)	Sc	SI	(MN)				(mm)	Uc(max)	Presión de	FOS	Presión Interna del	Presión de la Zona						
56	3	22	1.5	1.5	0.117841	0.018	0.052	21.8	6.6	3.0	0.721	1.6	0.721	5.3						
57	SHOTCRETE																			
58	Espesor	Grado del Acero del Perno:		75	*	Psc	Kc	Umax	Presión Adicional Max.			0.028	0.367	7.0						
59	(mm)	* Resistencia del Perno = 60% R. UI.															del Sostenimiento	0.918	4.7	
60	75																con Pernos (MPa)**	1.836	2.7	
61	ARCOS DE ACERO																			
62	O VIGAS																			
63	RETICULADAS																			
64	Tipo de Sección	Espacia	Detalle de los Tacos		Pss	Ks	Umax	Deformación Pronostica			53	5.101	0.0							
65	***	Arcos	Tipo	Angulo (*)	Espesor	(m)				Longitud Teórica del Perno fuera de la Zona Plástica			-2.6 m ****							
66	V Light	20	hard	11.25	0.15	0.028	12.6	6.1	**** Pernos que terminan dentro Zona Plástica, requiere shotcrete			1.5								
67	* Se asume que los pernos son instalados antes de completar el espesor del shotcrete, de tal manera de lograr una completa presión del sostenimiento (máxima deformación)																			
68	**** Multiplicador de la Presión de Sost. Mínimo																			
69	Propiedades del Conjunto de Arcos de Acero																			
70	W	X	As	Is	Eb	Angulo (radianes)	b/2	Alfa (ass.)	Fst	Psg	Kg (Acero M16)									
71	0.152908	0.15748	0.0038	1.7E-05	10000	0.19635				0.000										

NATM - NUEVO METODO AUSTRIACO DE TUNELERIA

METODOS DE DISEÑO

- **El más común: Uso de la teoría de falla por corte (Rabcewicz and Golser, 1973). Entrada: profundidad de la excavación, parámetros de resistencia de la masa rocosa, dimensiones de la excavación. Salida: resistencia requerida incluyendo el arco rocoso.**
- **Análisis del anillo de carga portante como un cilindro de pared gruesa (Egger, 1973).**
- **Método de elementos finitos, usando variables de profundidad, diferentes relaciones de esfuerzos, parámetros de resistencia de la masa rocosa y de las discontinuidades, zonas de plastificación, desplazamientos, cargas sobre el revestimiento, momentos de pandeo y fuerzas axiales en el revestimiento y deformación en el revestimiento (Egger, 1973 y Kovári, 1969).**
- **Algunas personas usan solo el sistema de clasificación geomecánica de la masa rocosa. Pero esto no es generalmente recomendado y no reemplaza a los cálculos de diseño detallado apropiado.**

NATM - NUEVO METODO AUSTRIACO DE TUNELERIA

2 CURVAS NATM DE REACCION DEL TERRENO

Profundidad de la Sección (m)	Esfuerzo Vertical (kN/m ²)	Propiedades de la Roca		Radio (m)	r/R	Sigma r (kPa)	Espesor de Zona Plástica (m)
		c (kN/m ²)	phi (grados)				
1100	27500	6073	20.4	2.6	1.0	17893.6	0.0
					0.9	14237.3	0.3
					0.8	10610.9	0.7
					0.7	7017.9	1.1
					0.6	3462.6	1.7
					0.5	-49.0	2.6
					0.4	-3509.0	3.9
					0.3	-6905.1	6.1
					0.2	-10217.2	10.4
					0.1	-13404.2	23.4
					0.05	-14918.3	49.4

de Pernos Reducción
Espacios @ Espaciame Longitud
Arco interior Arco Extern efectiva del
Perno
16.33628 1.96154 0.40825

3 CALCULO DE LA CAPACIDAD PORTANTE DEL ARCO EXTERNO

3.1 DATOS DEL SOSTENIMIENTO

PROPIEDADES DEL SHOTCRETE

Módulo	<i>E_c</i>	20000 (MPa)
Relación de Poisson	<i>ν_c</i>	0.25
Resistencia compresiva	<i>G_c</i>	35 (MPa)
Resistencia al corte	<i>Tau c</i>	7 (MPa)

PROPIEDADES DEL PERNO

Módulo	<i>E_b</i>	207000		Hollow Core Anchors						
		Clase	75	Clase	150	R1H	R1HG	R1G		
Propiedades de la resistencia del perno										
Diámetro de la barra (mm)	<i>d</i>	25	32	34.9	36	45	64	25	35	51
Resistencia última (kN)	<i>T_{bf}</i>	263.8	423.9	520.5	1054	1779.2	3641	222.4	613.8	1334.4
Area roscada (mm ²)	<i>A</i>	510	819	1007	1019	1716	3348	345	720	1566
Resistencia a la Fluencia (kN)	<i>Tau b</i>	310	311	310	621	622	653	387	511	511

PROPIEDADES DE LAS CERCHAS

	I-22	Med 8I23	Heavy 12W65	I-27	
Ancho del patín (mm)	<i>w</i>	0.12	0.1059	0.3048	0.12
Profundidad de la sección (mm)	<i>X</i>	0.22	0.2023	0.3048	0.27
Area de la sección (mm ²)	<i>A_s</i>	0.003562	0.00433	0.01233	0.00368
Momento de Inercia (mm ⁴)	<i>I_s</i>	2.96E-05	2.96E-05	0.000222	5.01E-05

Módulo del acero	<i>E_s</i>	207000 (MPa)
Resistencia a la fluencia	<i>G_s</i>	250 (MPa)
Módulo de los bloques	<i>E_b</i>	10000 (MPa)
	<i>E_b</i>	500 (MPa)

Bloqueadores rígidos
Bloqueadores blandos

PROPIEDADES DE LAS VIGAS RETICULADAS

Resistencia al corte de las vig	<i>Tau l</i>	100 (MPa)
---------------------------------	--------------	-----------

Radio Máximo del Túnel (m)	Diámetro de la Barra de Refuerzo (mm)	Area del Acero F(st) (m ²)
2.5	16	0.0008
5	20	0.0028
7.5	25	0.0028
10	32	0.0028

Dimensiones recomendadas

NATM - NUEVO METODO AUSTRIACO DE TUNELERIA

3.2 PRESIONES DE SOSTENIMIENTO PROPORCIONADO POR LOS ELEMENTOS DE SOSTENIMIENTO SELECCIONADOS

TIPO DE SOSTENIMIENTO	GRADO DE ACERO	TIPO DE CERCHA	DIAMETRO PERNO (mm)	ESPACIAMIENTO		ESPESOR (m)	Presión de Sostenimiento (MPa)	
				Sc (m)	Sl (m)			
SHOTCRETE	na	na	na	na	na	0.06	0.470	10% Tensado
PERNOS	75	na	25	1	1.5	na	0.010	
VIGAS RETICULADAS	na	na	na	na	na	na	na	
CERCHAS	na	na	na	na	na	na	na	
RESISTENCIA DEL REVEST	na	na	na	na	na	na	0.480	

Bolt Area
0.00033

3.3 CAPACIDAD PORTANTE DEL ARCO EXTERNO

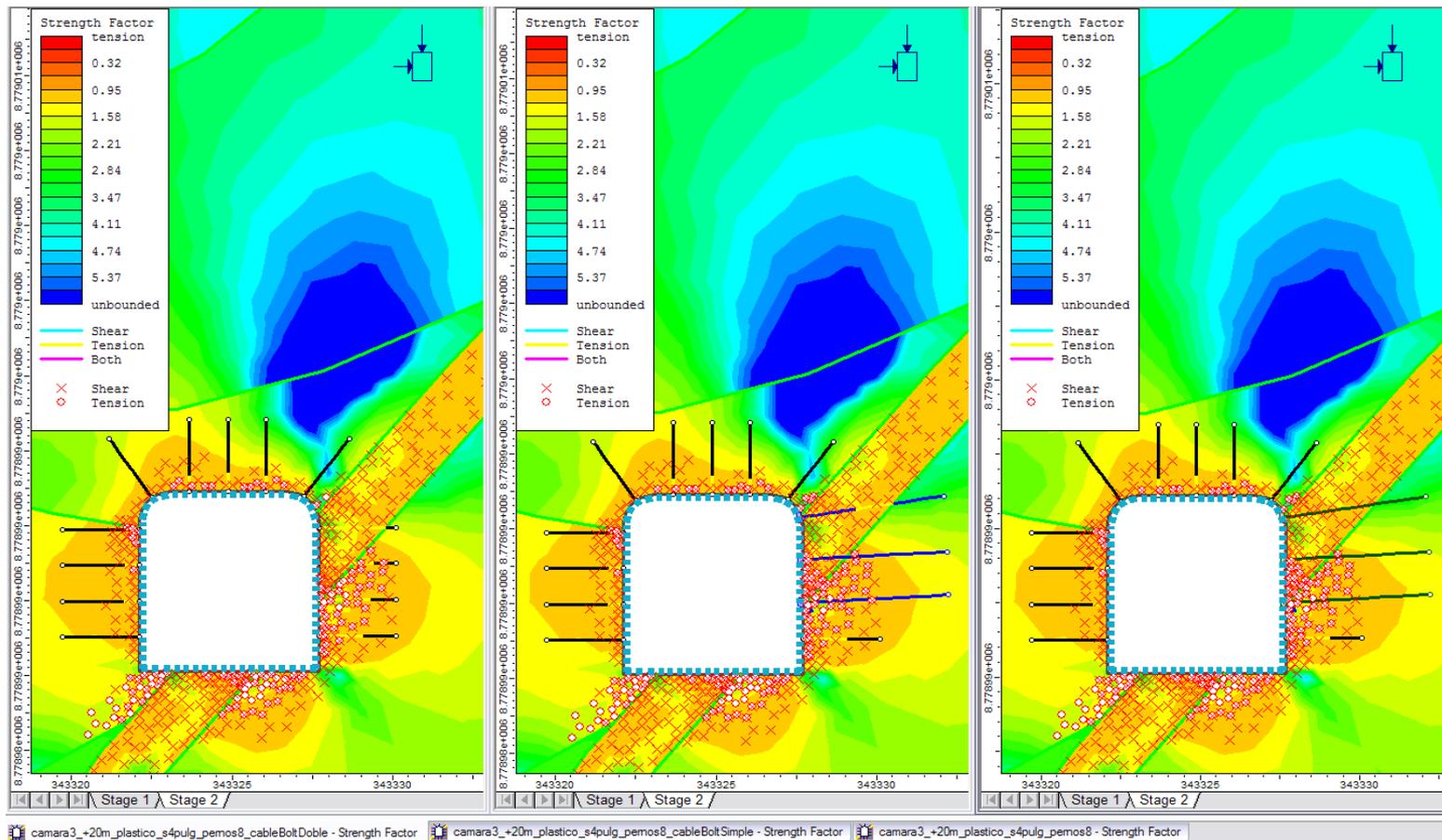
Presión del sostenimiento calculado del revestimiento + perno	$P_i(l) + P_i(a)$	0.480 MPa
Esfuerzo de corte calculado para Sigma 3 = P _{il} + P _{ib}	$Tau r$	2.123 MPa
Esfuerzo normal calculado Sigma 3 = P _{il} + P _{ib}	$Sigma n$	1.290 MPa
Resistencia al corte calculado del arco de roca	$P_i(r)$	2.814 MPa

3.4 CAPACIDAD TOTAL DEL ARCO EXTERNO

Resistencia del perno de anclaje al movimiento del cuerpo de corte	$P_i(a)$	0.083 MPa
Resistencia Total al Corte $P_i(l)+P_i(r)+P_i(a)$	$P_i(w)$	3.367 MPa

FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA LA FALLA POR CORTE	F.O.S.	1.8
---	--------	-----

METODOS NUMERICOS



Sostenimiento de cámara de echadero con pernos, cablebolts y shotcrete estimado con el programa PHASE².

SELECCIÓN DEL SOSTENIMIENTO

COMPARACION DE LOS ANALISIS DE SOSTENIMIENTO DE ROCA TUNEL DE ADUCCION

Roca PIZARRA Tipo I RMR 81

1. Estimado de sostenimiento		Unwedge	Hoek & Brown	NATM	Phases	Sostenimiento seleccionado
a) Pernos	Longitud (m)	-	1.5	1.5	-	1.5
	Espaciamiento circunferencial (m)	-	2	2.9	-	Según se requiera
	Espaciamiento longitudinal (m)	-	2.5	3	-	Según se requiera
	Diámetro (m)	-	25	25	-	25
	Grado del acero	-	75	75	-	75
	Factor de Seguridad	-	1.8	2.2	-	-

2. Análisis de deformación

a) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 1	-	0.8	1.4	0	1
b) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 2	-	-	-	0.6	1.5
c) Deformación máxima (mm)	-	0.1	na	0.5	5

Roca PIZARRA Tipo II RMR 65

1. Estimado de sostenimiento		Unwedge	Hoek & Brown	NATM	Phases	Sostenimiento seleccionado
a) Pernos	Longitud (m)	1.5	2	1.5	-	1.5
	Espaciamiento circunferencial (m)	1.5	1	1.5	-	1
	Espaciamiento longitudinal (m)	1.5	1.5	1.5	-	1.5
	Diámetro (m)	25	25	25	-	Según se requiera
	Grado del acero	75	75	75	-	75
b) Shotcrete	Espesor (mm)	-	10	-	-	-
	Resistencia compresiva (MPa)	-	35	-	-	-
	Factor de Seguridad	1.4	3.9	1.9	-	-

2. Análisis de deformación

a) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 1	-	1.8	1.6	0.75	1.5
b) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 2	-	-	-	1.5	2
c) Deformación máxima (mm)	-	3	na	2.1	5

Roca PIZARRA Tipo III RMR 46

1. Estimado de sostenimiento		Unwedge	Hoek & Brov	NATM	Phases	Sostenimiento seleccio
a) Pernos	Longitud (m)	2	2	2	-	2
	Espaciamiento circunferencial (m)	1	1	1	-	1
	Espaciamiento longitudinal (m)	1.5	1.5	1.5	-	1.5
	Diámetro (m)	25	25	25	-	25
	Grado del acero	75	75	75	-	75
a) Shotcrete	Espesor (mm)	25	50	80	-	50
	Resistencia compresiva (MPa)	35	35	35	-	35
	Factor de Seguridad	2.5	2.1	1.5	-	-

2. Análisis de deformación

a) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 1	-	4.7	1.9	1.25	2
b) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 2	-	-	-	3	3
c) Deformación máxima (mm)	-	10	na	6	10

COMPARACION DE LOS ANALISIS DE SOSTENIMIENTO DE ROCA TUNEL DE ADUCCION

Roca PIZARRA Tipo IV RMR 34

		Hoek & Brown		NATM		Phases	Sostenimiento Seleccionado
		Opción Cerchas	Opción vigas Reticuladas	Opción Cerchas	Opción vigas Reticuladas		
1. Estimado de sostenimiento							
a) Pernos	Longitud (m)	2	2	2.5	2.5	-	2
	Espaciamiento circunferencial (m)	1	1	1	1	-	1
	Espaciamiento longitudinal (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	-	1.5
	Diámetro (m)	25	25	25	25	-	25
	Grado del acero	75	75	75	75	-	75
a) Shotcrete	Espesor (mm)	50	150	215	235	-	250
	Resistencia compresiva (MPa)	35	35	35	35	-	35
c1) Cerchas	Tipo	W 4X13	-	W 4X13	-	-	W 4X13
	Espaciamiento (m)	1.5	-	1.5	-	-	1.5
c2) Vigas reticuladas	Tamaño de la barra (mm)	-	M16	-	M16	-	M16
	Espaciamiento (m)	-	3	-	3	-	3
	Factor de Seguridad	2.2	1.6	1.3	1.5	-	-

2. Análisis de deformación

a) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 1	-	4.8	2.6	2.1	1.5	2
b) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 2	-	-	-	3	3	3
c) Deformación máxima (mm)	-	34	na	na	10.5	20

Roca PIZARRA Tipo V RMR 17

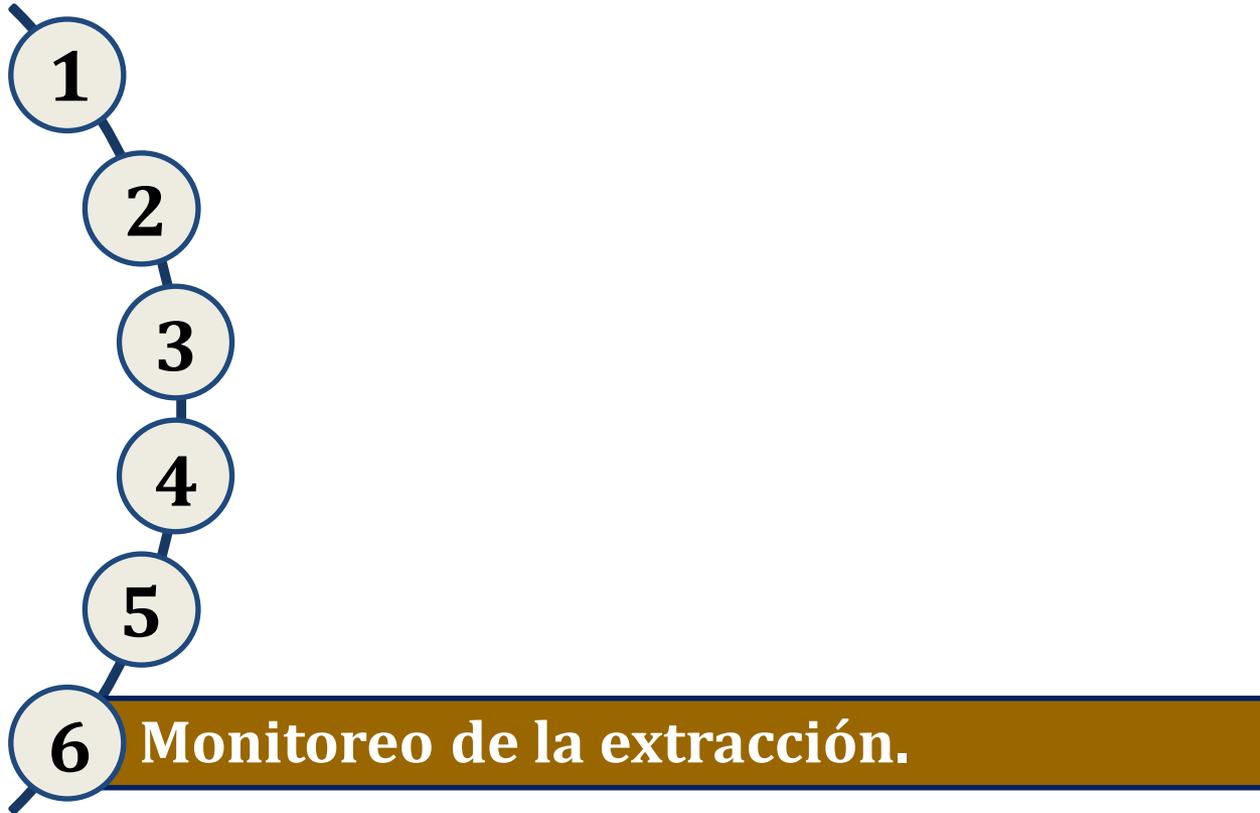
		Hoek & Brown		NATM		Phases	Sostenimiento Seleccionado
		Opción Cerchas	Opción vigas Reticuladas	Opción Cerchas	Opción vigas Reticuladas		
1. Estimado de sostenimiento							
a) Pernos	Longitud (m)	2.5	2.5	2.5	2.5	-	2.5
	Espaciamiento circunferencial (m)	1	0.5	0.5	0.5	-	0.5
	Espaciamiento longitudinal (m)	1	1	1	1	-	1
	Diámetro (m)	25	25	25	25	-	25
	Grado del acero	75	75	75	75	-	75
a) Shotcrete	Espesor (mm)	150	175	350	350	-	300
	Resistencia compresiva (MPa)	35	35	35	35	-	35
c1) Cerchas	Tipo	W 4X13	-	W 4X13	-	-	W 4X13
	Espaciamiento (m)	1	-	1	-	-	1
c2) Vigas reticuladas	Tamaño de la barra (mm)	-	M162	-	M16	-	M16
	Espaciamiento (m)	-	1	-	1	-	1
	Factor de Seguridad	2.3	2.7	1.6	1.5	-	-

2. Análisis de deformación

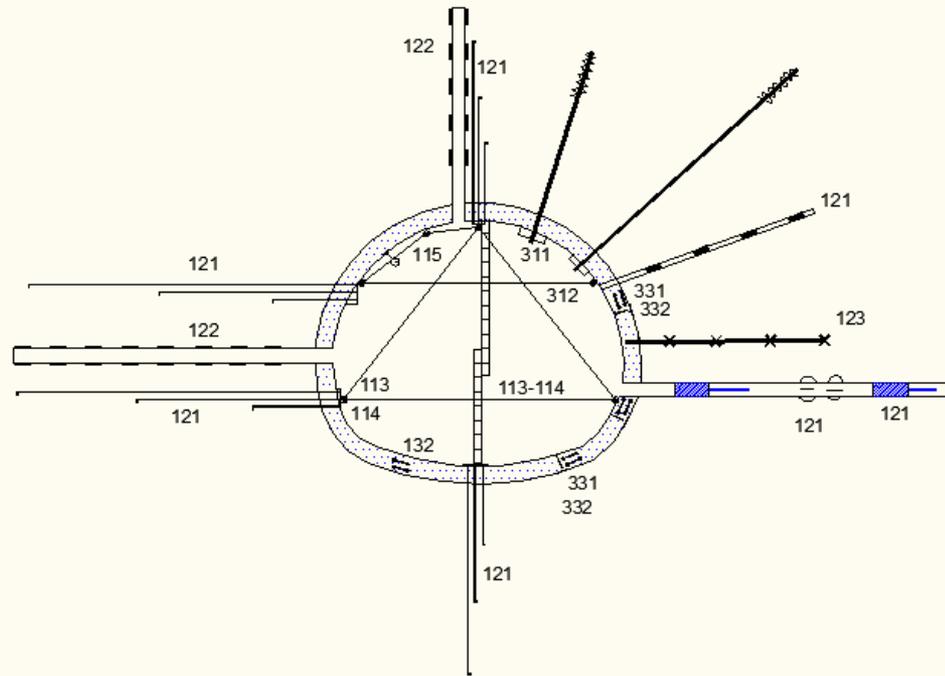
a) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 1	-	1.7	2.2	2.3	2.5	2.5
b) Espesor de la zona plástica (m) F.S. < 2	-	-	-	4	4	4
c) Deformación máxima (mm)	-	90	na	na	24.8	50



MODELOS FISICOS A ESCALA REDUCIDA



INSTRUMENTACION PARA EXCAVACIONES SUBTERRANEAS



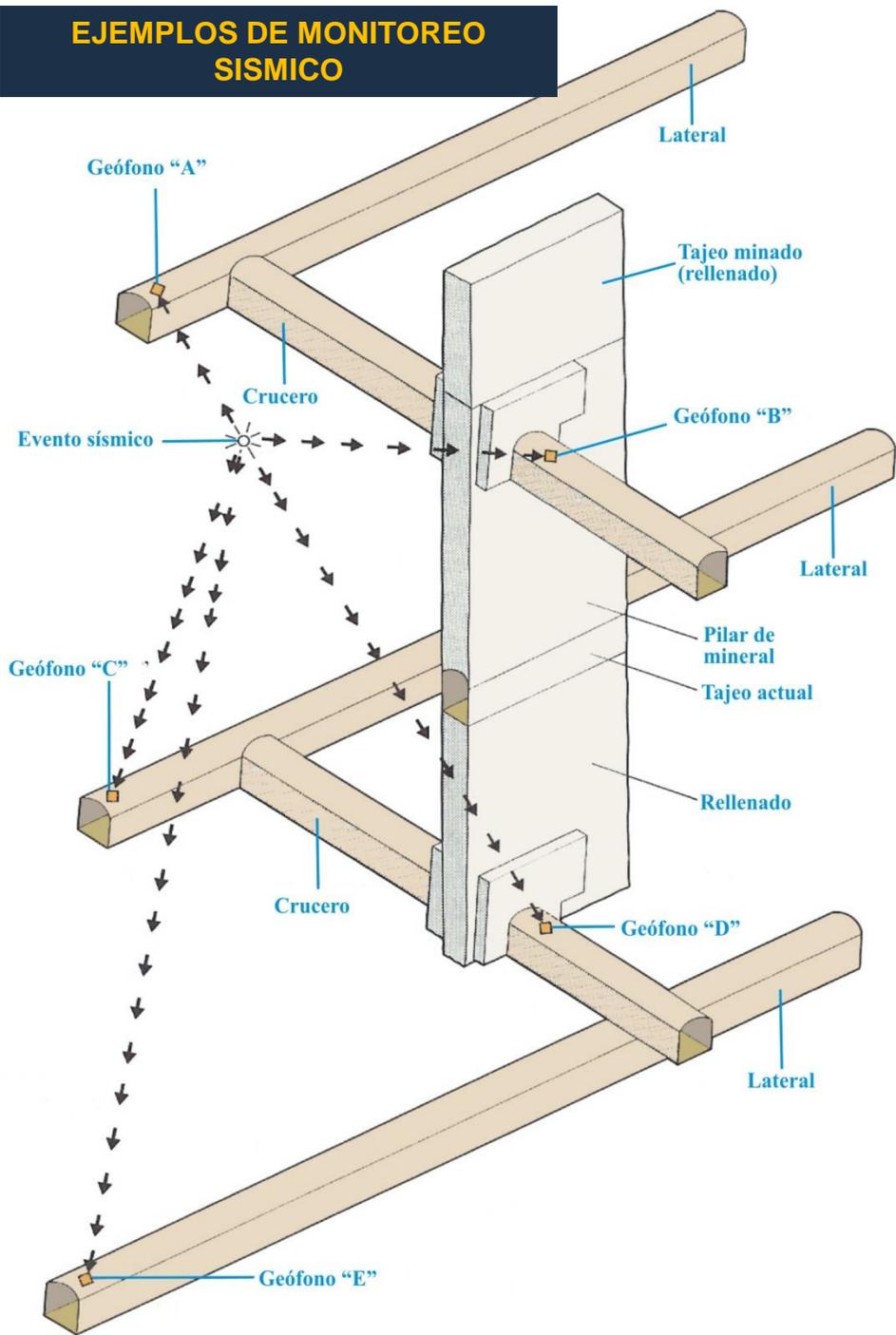
Producto

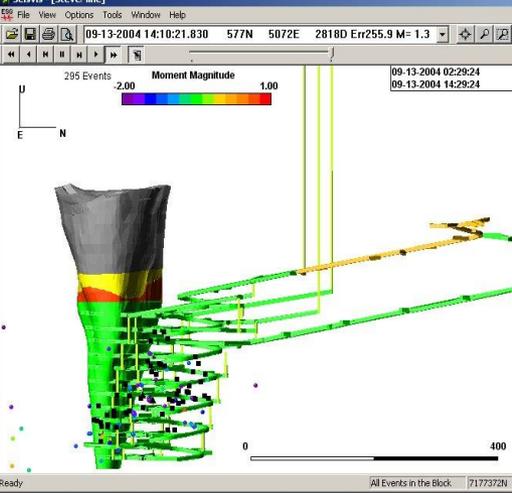
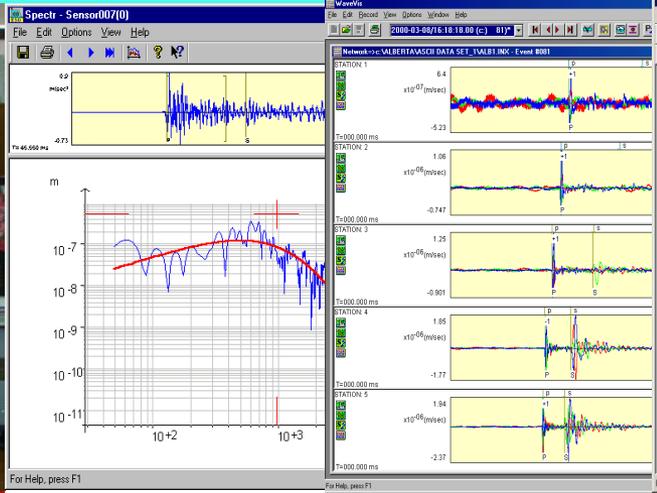
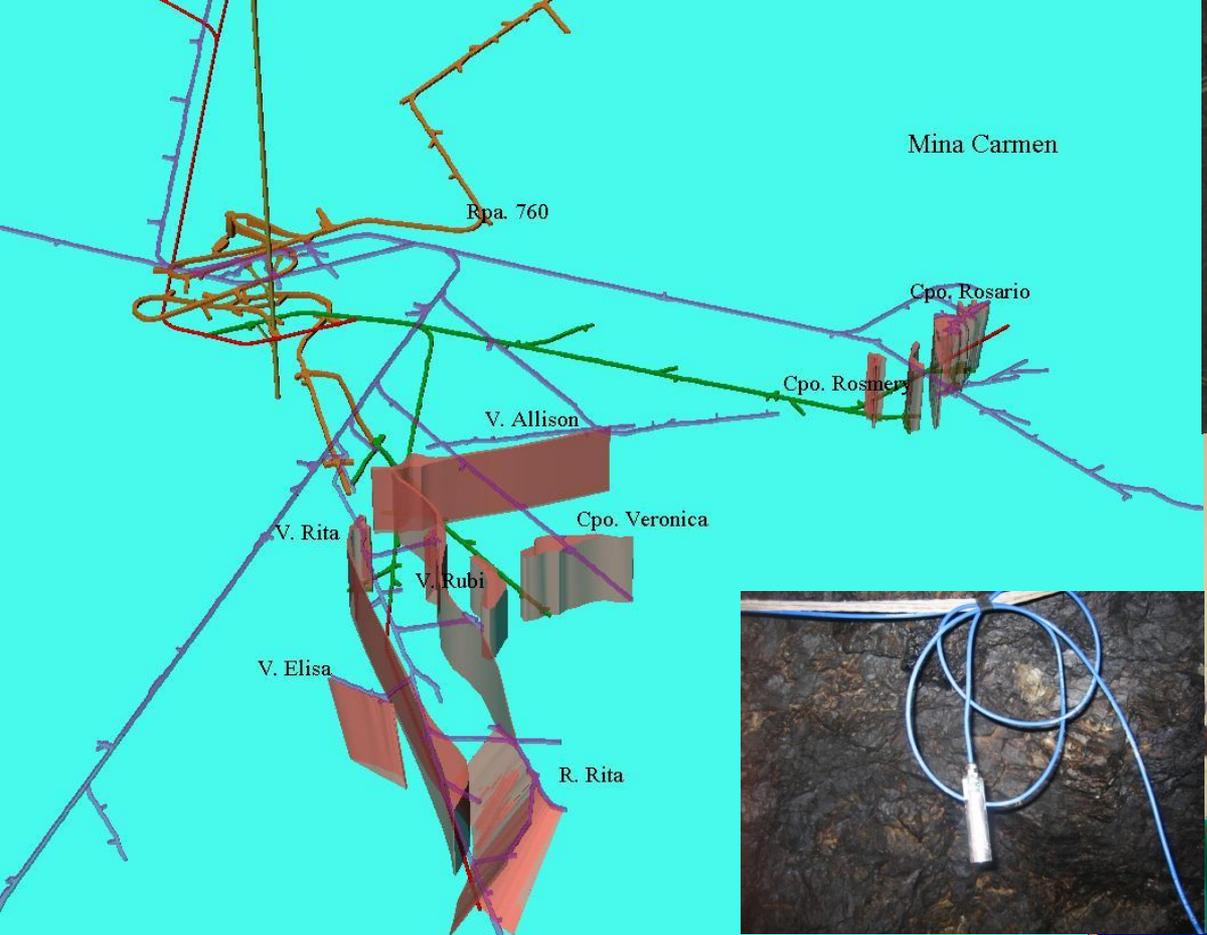
Mecanismo de medición de convergencia
 Puntos topográficos en túneles
 Medidor de deformación en segmento y radial
 Extensómetro de varillas estacionario
 Extensómetro móvil
 Puntos de anclaje de medición
 Strain gauge embebidos en concreto
 Anclaje con celdas de carga mecánicas
 Anclajes con celdas de carga, hidráulicas
 Medidores de esfuerzos en taladros
 Celdas de presión hidráulicas
 Celdas de presión, Sistema Glotzl
 Celdas de medición de esfuerzos
 Mediciones ultrasónicas

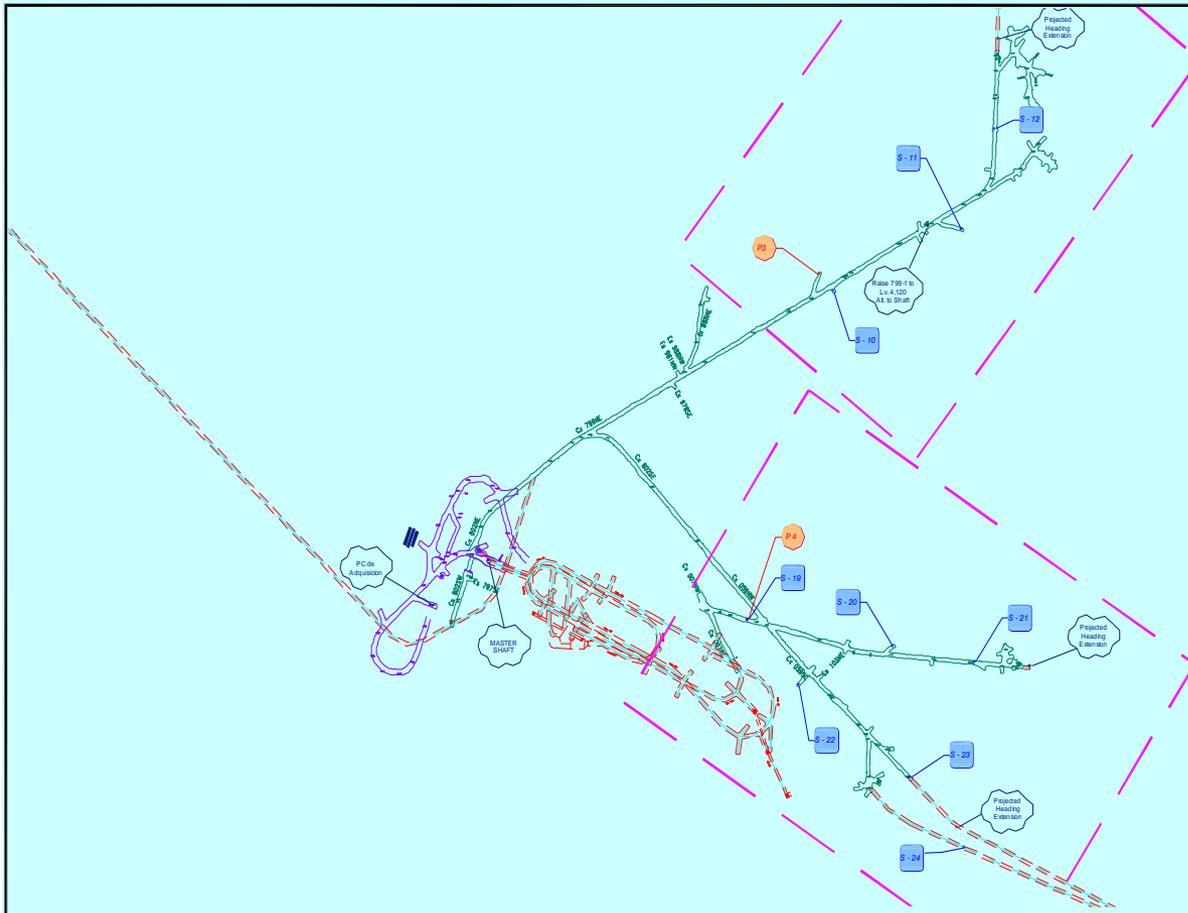
Ejemplo

Movimientos de revestimiento de túnel,
 Movimientos absolutos,
 Distribución de cargas sobre el revestimiento de túneles
 Control de aflojamiento y movimiento de terrenos
 Mas preciso que el anterior
 Controla si la longitud del perno es suficiente
 Deformación de concreto/shotcrete (por efecto de la presión)
 Control y monitoreo del anclaje de pernos
 Control y monitoreo del anclaje de pernos
 Perfil detallado de esfuerzos, extensión de la zona plástica
 Medición de los cambios de esfuerzos en taladros
 Monitoreo de los cambios de presión en y sobre el revestimiento
 Monitoreo de los cambios de presión en y sobre el revestimiento
 Extensión de las zonas aflojadas.

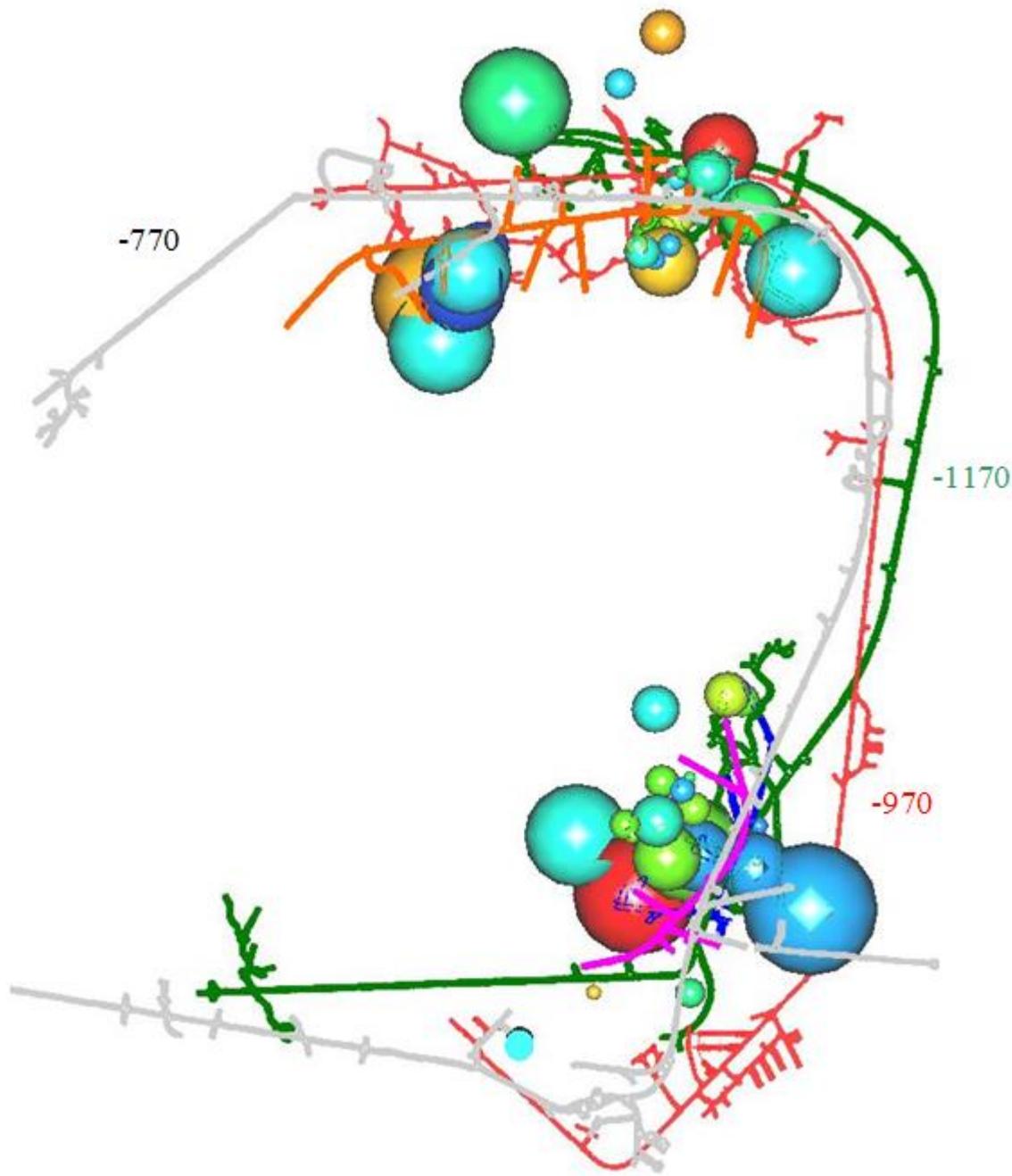
EJEMPLOS DE MONITOREO SISMICO



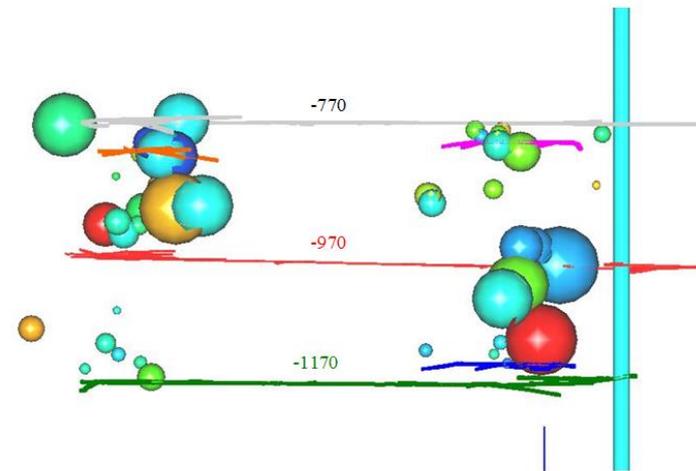




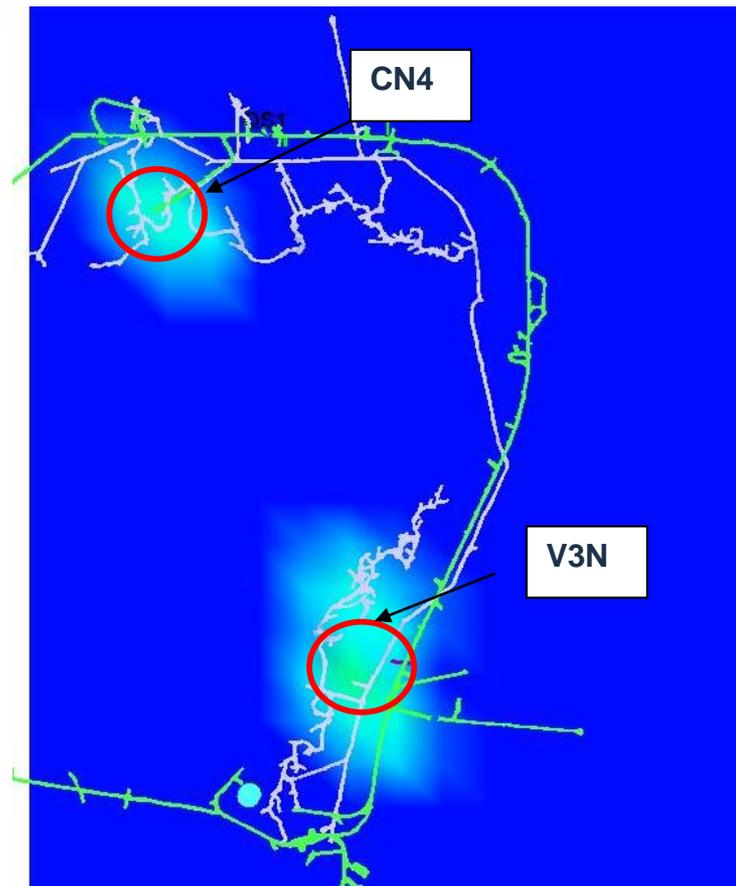
LEYENDA		 Buenaventura		Ubicaciones Preliminares Registradores y Sensores Nivel 4,060		Formato: A4	
PALADIN (REGISTRADOR)		Elaborado: Ing. David Regalado P.	09/06/2008	Departamento: Geomecánica	Sección de desarrollo: Dibujo	Código DWG:	U
SENSOR (GEOPOND)		Dibujado: Guillermo Almonacid Fernandez	12/08/2008			Revisado: Ing. David Regalado P.	Aprobado: Ing. Daniel L. Briones A.
		Nombre Layout: Hoy A-4		Ruta: C:\DOCUMENTE-1\GALMON-11\COMFIG-11\Temp\ASC1EAC3474.DWG			

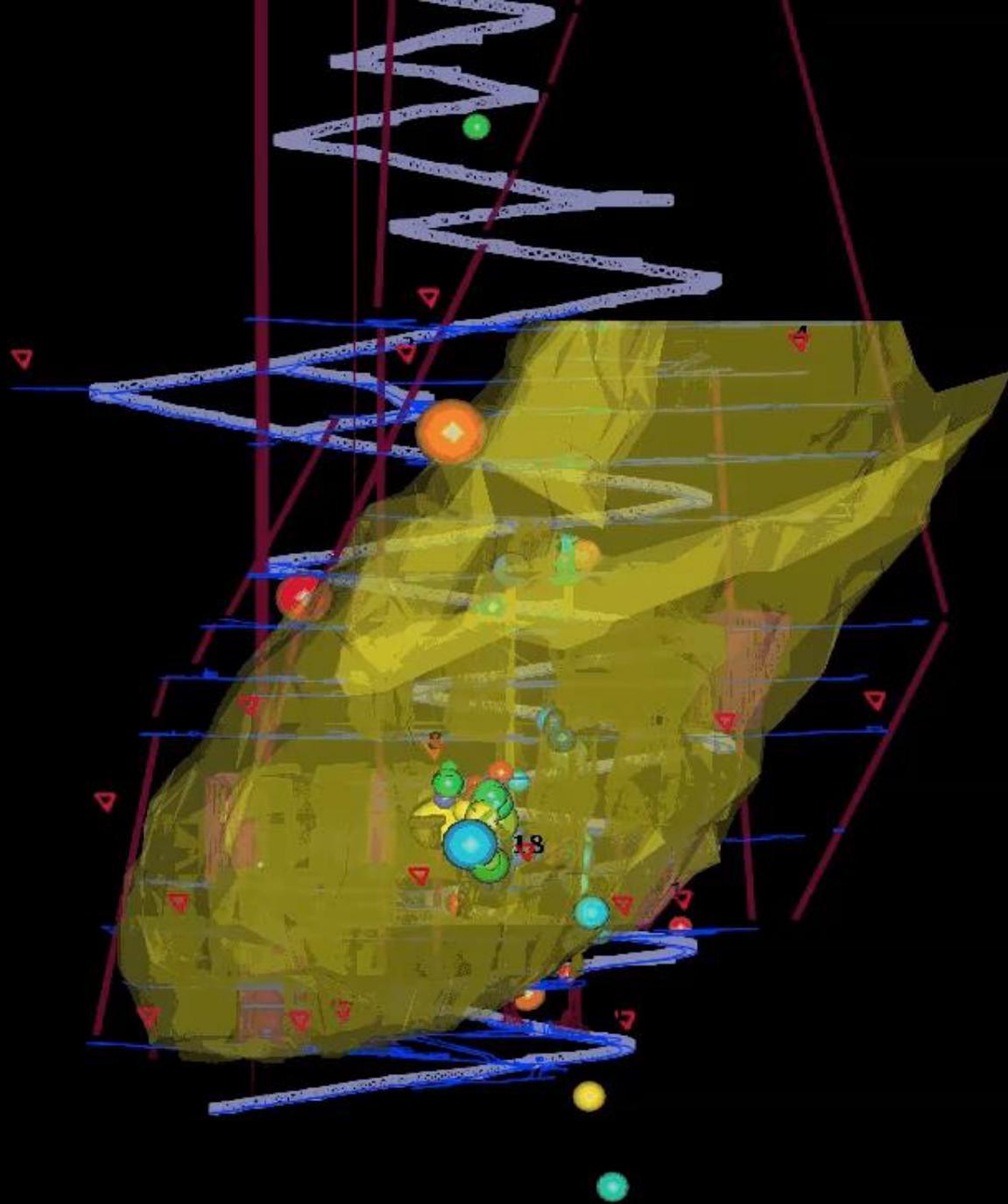


Eventos de la Semana Vista en Planta



Eventos de la Semana vista en Perfil





CONCLUSIONES

- El control de la estabilidad de las excavaciones asociada a la explotación de un yacimiento nace con el buen Planeamiento y Diseño del minado.
- La caracterización de la masa rocosa para el minado es de suma importancia por lo que en todo proyecto u operación minera se debe mantener actualizada esta información.
- Si bien es cierto que la selección del método de minado es una tarea de Planeamiento, sin embargo, en la decisión final los aspectos geomecánicos juegan un rol importante.
- El dimensionamiento del minado tiene sus propias características según cada método de explotación. Cada método tiene sus aspectos geomecánicos propios.
- Una de las herramientas más importantes para controlar la estabilidad local y global de la mina es el secuenciamiento del minado, por lo que se le debe prestar mucha atención.
- Para el sostenimiento (incluyendo el relleno) se deben establecer estándares de control de calidad antes, durante y después de su instalación para: materiales, equipos, procedimiento y rendimiento.



DCR Ingenieros S.R.Ltda.
Geomecánica en Minería y Obras Civiles



Gracias