

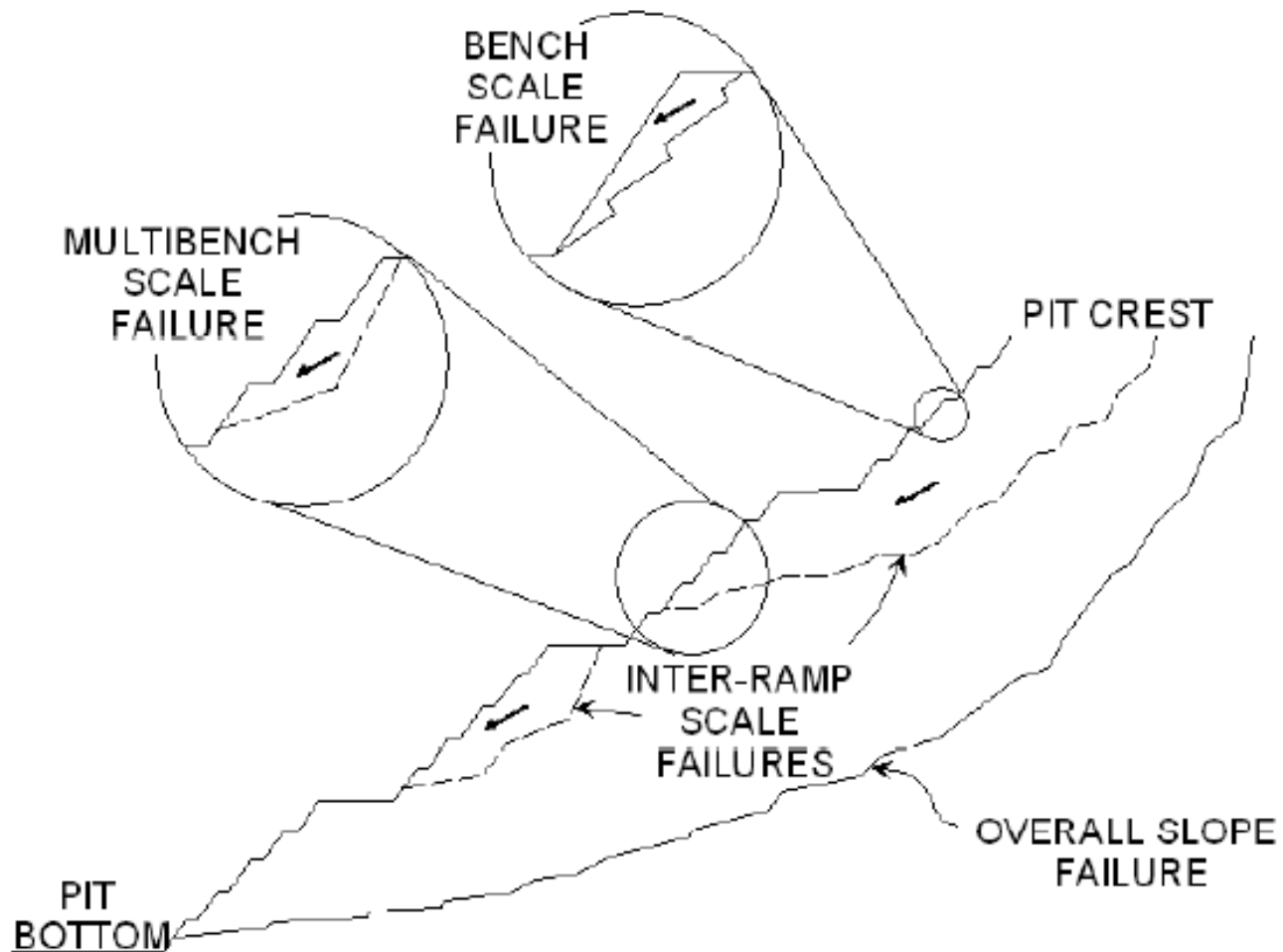
1^{er} CONGRESO BOLIVIANO DE MECANICA DE ROCAS

03 – 06 de Julio
Cochabamba, Bolivia

ESTEBAN HORMAZABAL, MSc
Gerente General & Jefe del Área de Mecánica de Rocas
SRK Consulting Chile

DISEÑO DE TALUDES EN ROCA CON UN ENFOQUE PROBABILISTICO

ESCALA BANCO BERMA



READ & STACEY (2009): "GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE DESIGN".

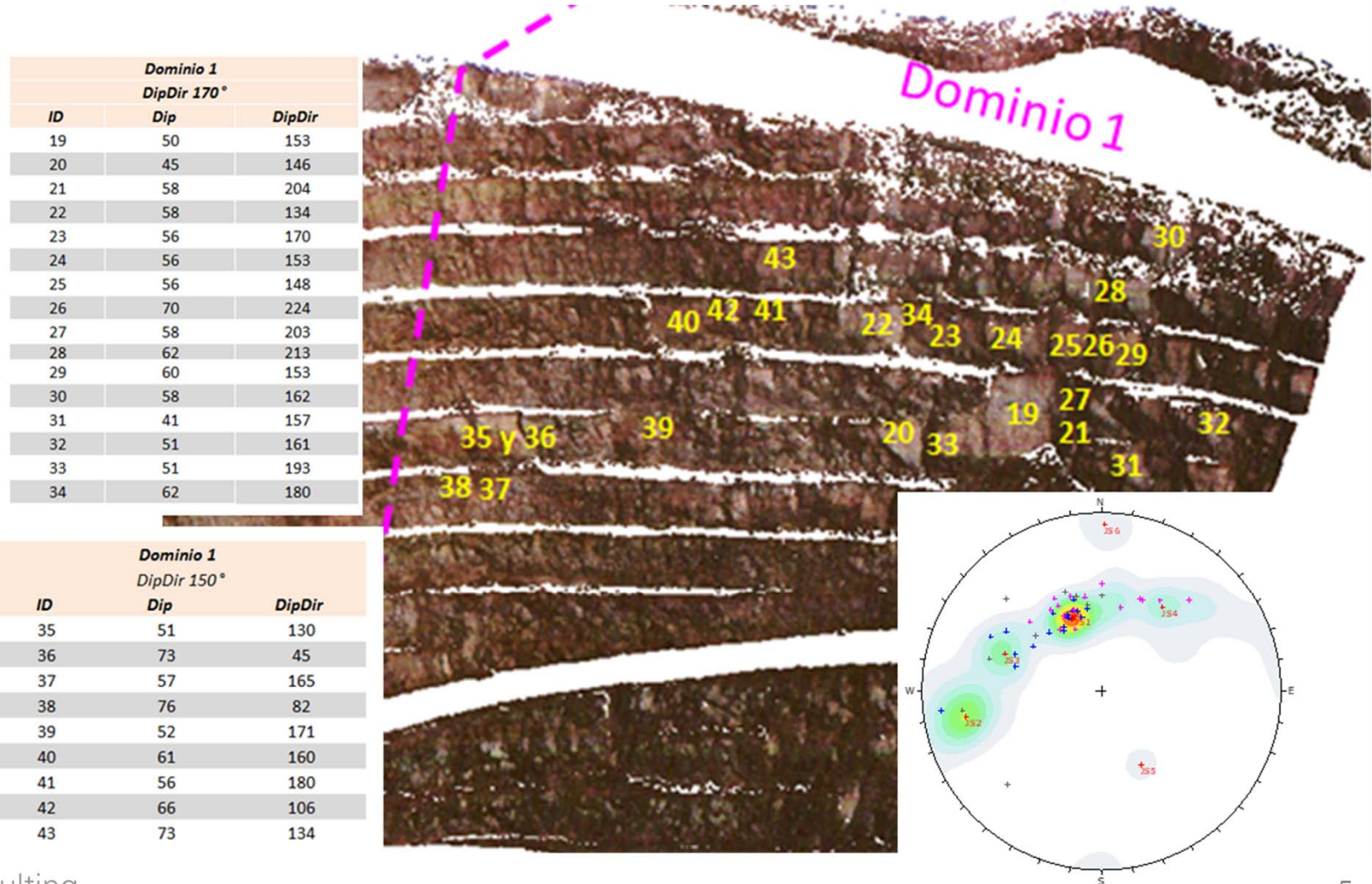
ESCALA BANCO BERMA

Debido al gran número de discontinuidades expuestas diariamente en minas operativas a rajo abierto, es necesario y práctico un enfoque probabilístico para evaluar las potenciales inestabilidades de bloques a nivel de banco.

Una metodología que utilice la orientación de estructuras, persistencia y espaciamiento de estructuras, puede ser implementada para desarrollar un enfoque probabilístico el cual permita una rápida estimación de la probabilidad de falla de los potenciales bloques inestables para diferentes geometrías de configuración de banco berma.

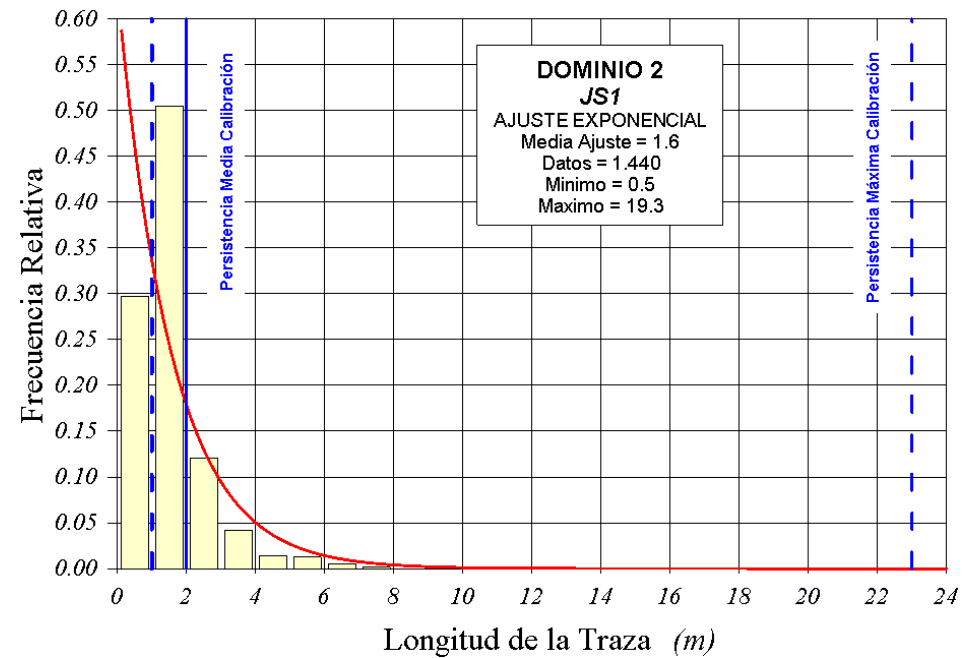
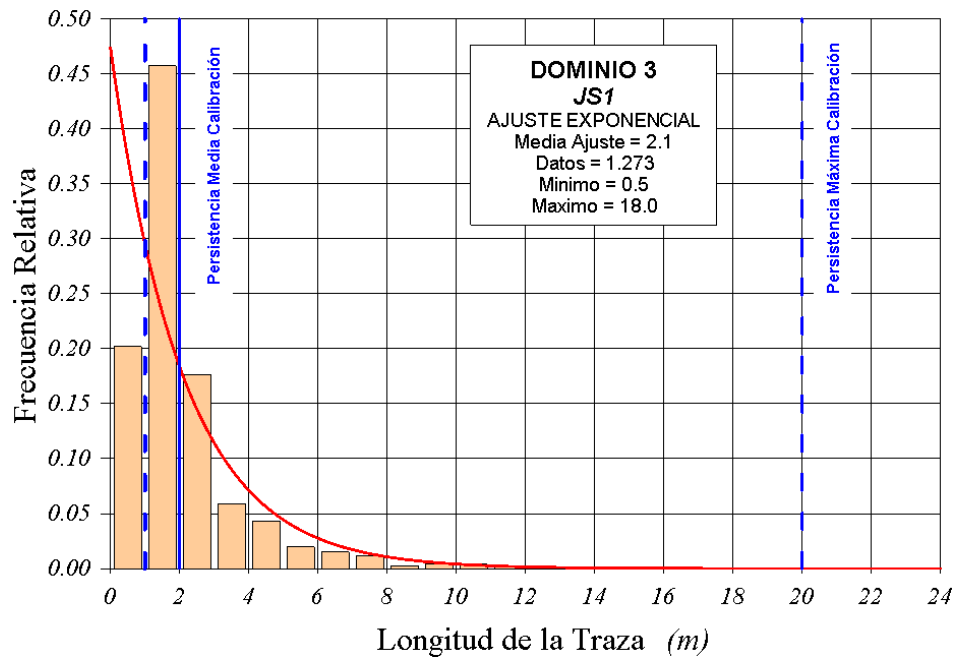
ESCALA BANCO BERMA

Variabilidad del manto y dirección del manto de las estructuras



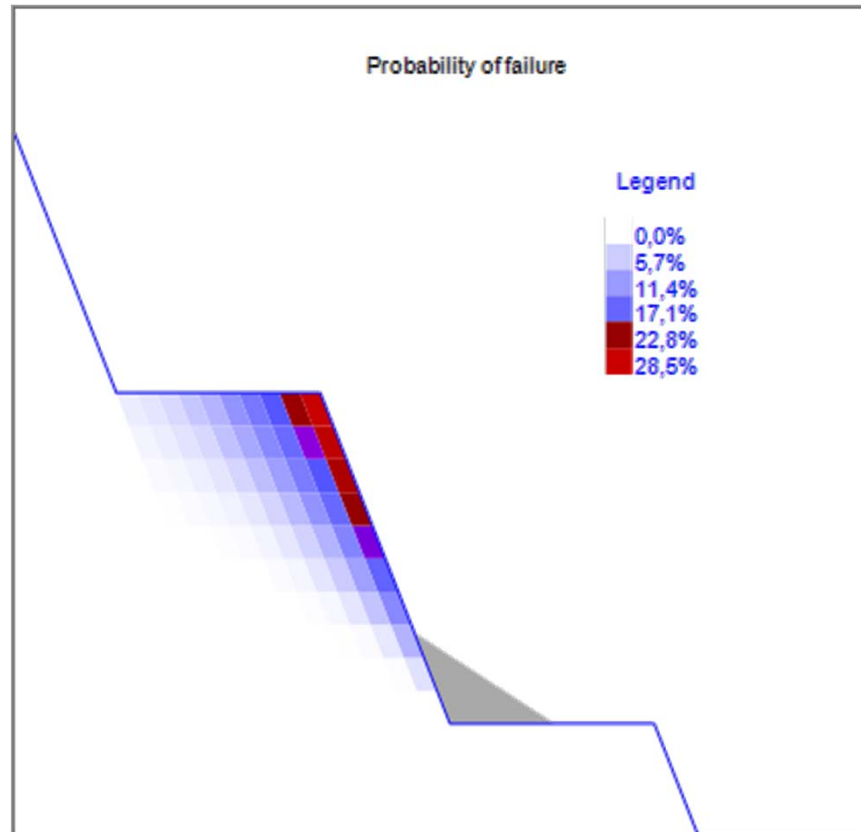
ESCALA BANCO BERMA

Variabilidad de la Persistencia de las Estructuras



ESCALA BANCO BERMA

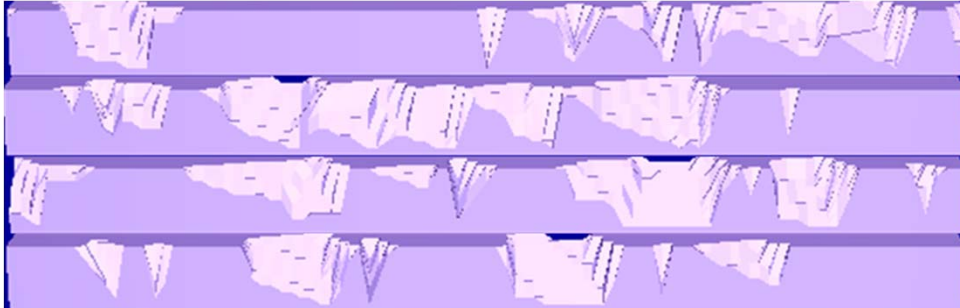
Determinación del Descreste o *Backbreak*



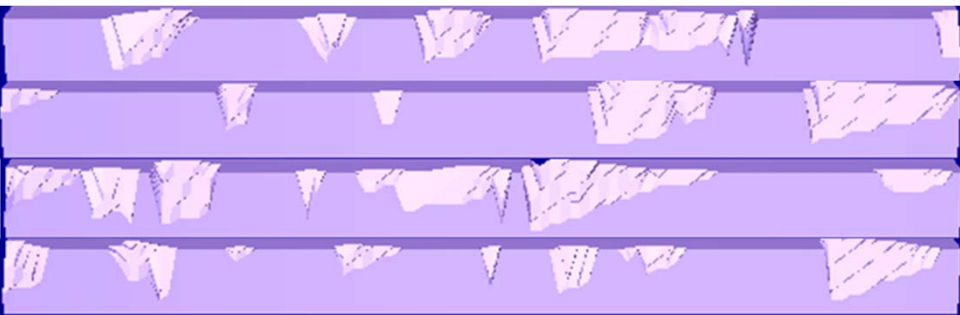
Probabilidad de Falla, Descreste y Material Derramado.

ESCALA BANCO BERMA

Calibración



PoF > 30 %

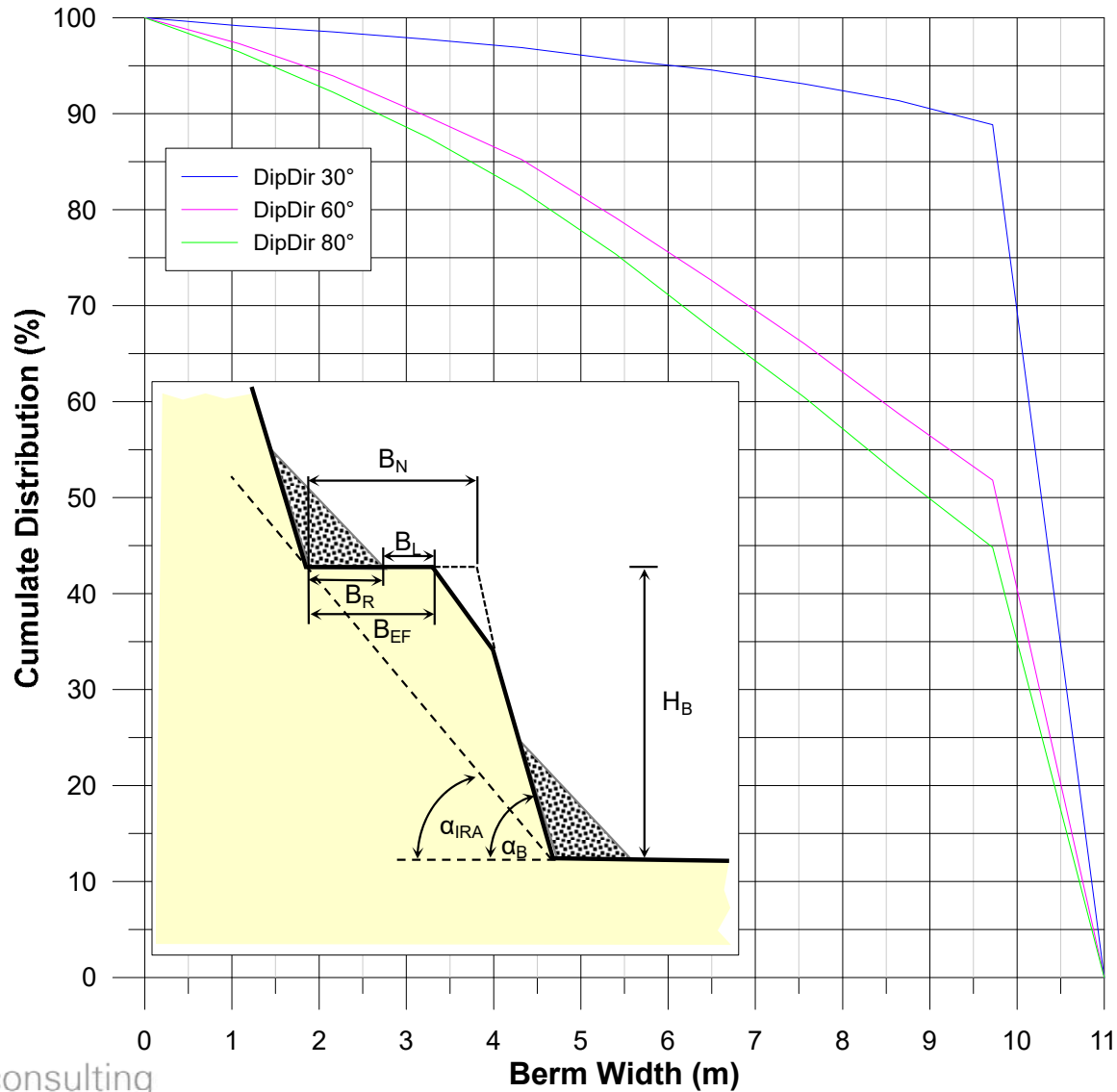


20 % < PoF < 30 %



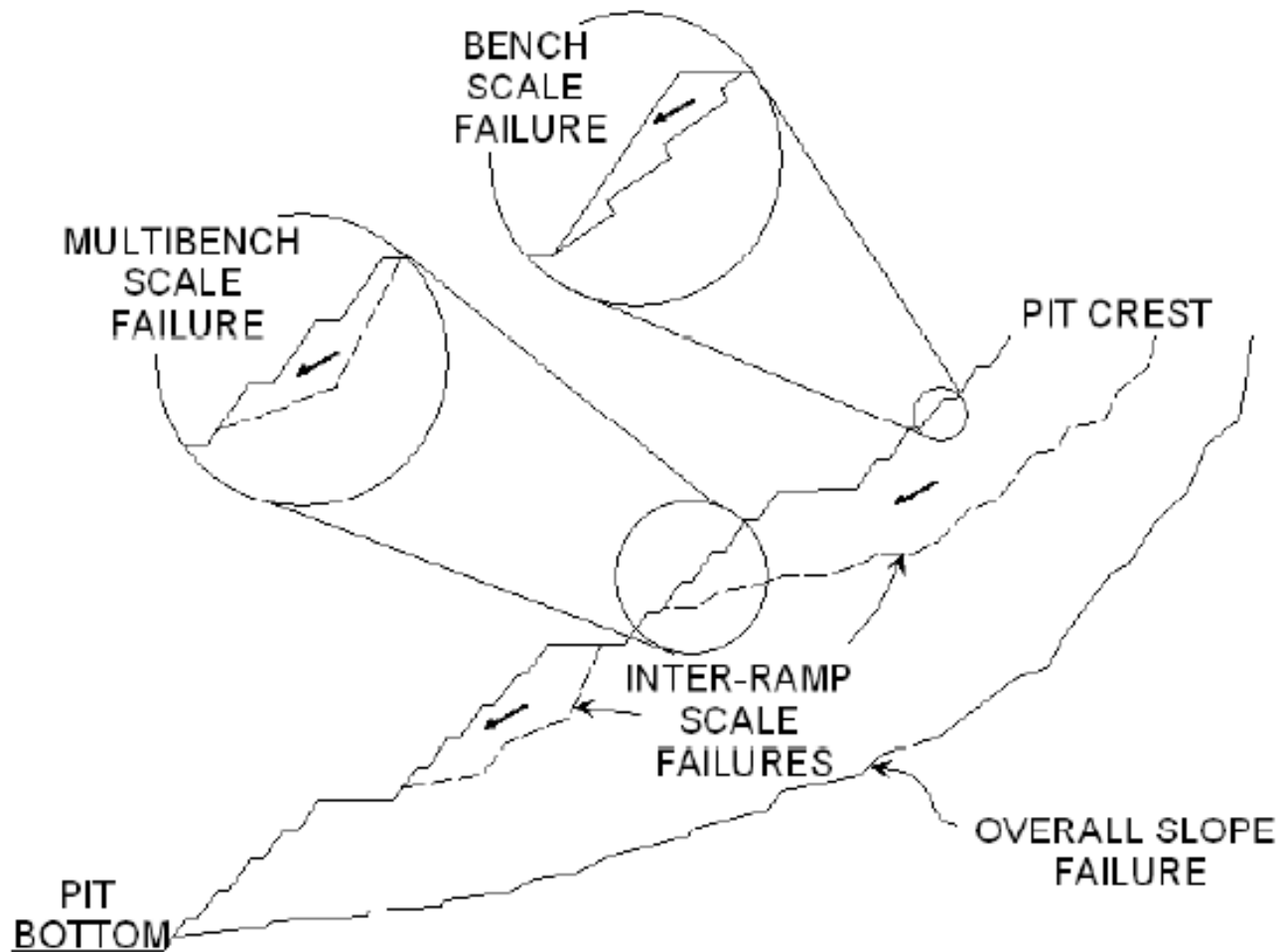
ESCALA BANCO BERMA

Distribución Acumulada o Porcentaje de Excedencia de los Anchos de Bermas



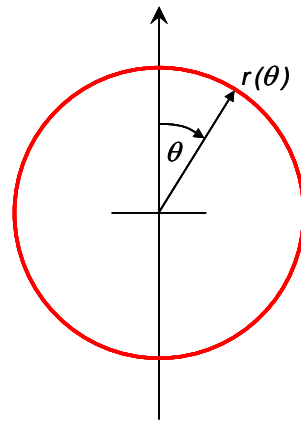
90% de los bancos tendrán bermas mayores a 9,5 m.

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

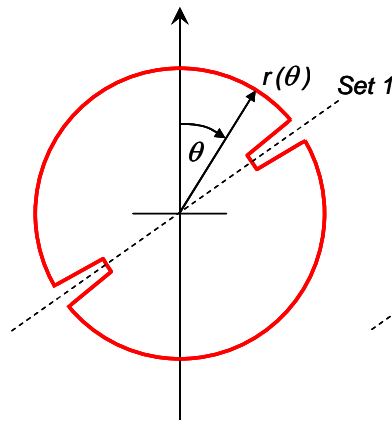


READ & STACEY (2009): "GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE DESIGN".

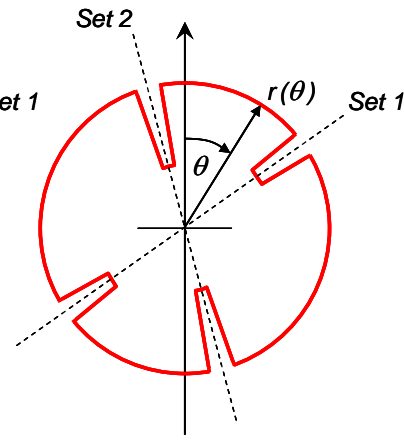
ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL



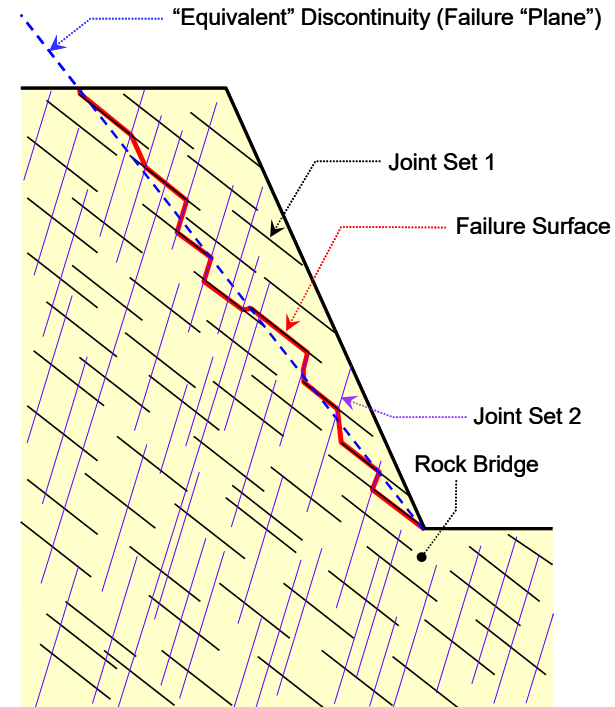
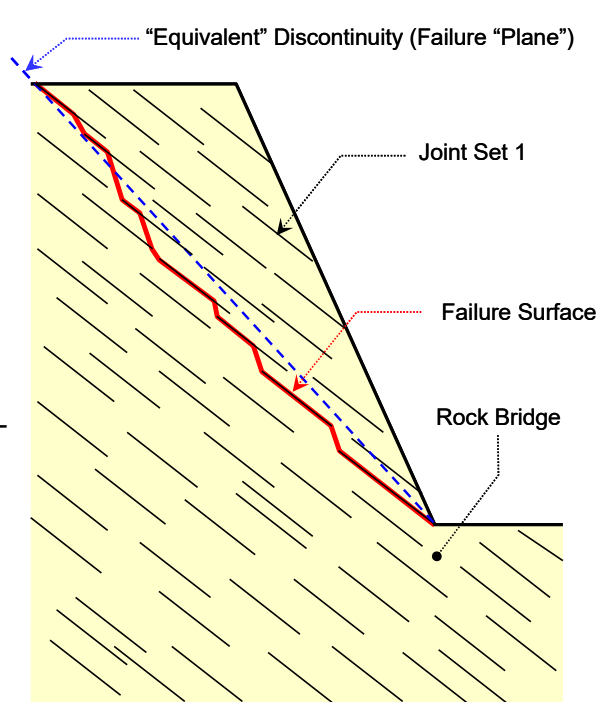
Isotropic Strength
 $r(\theta)$ is constant
 No discontinuity sets
 parallel to slope



Directional Strength
 $r(\theta)$ varies with θ
 One discontinuity set
 parallel to slope



Directional Strength
 $r(\theta)$ varies with θ
 Two discontinuity sets
 parallel to slope
 (Strength Set 1 > Strength Set 2)



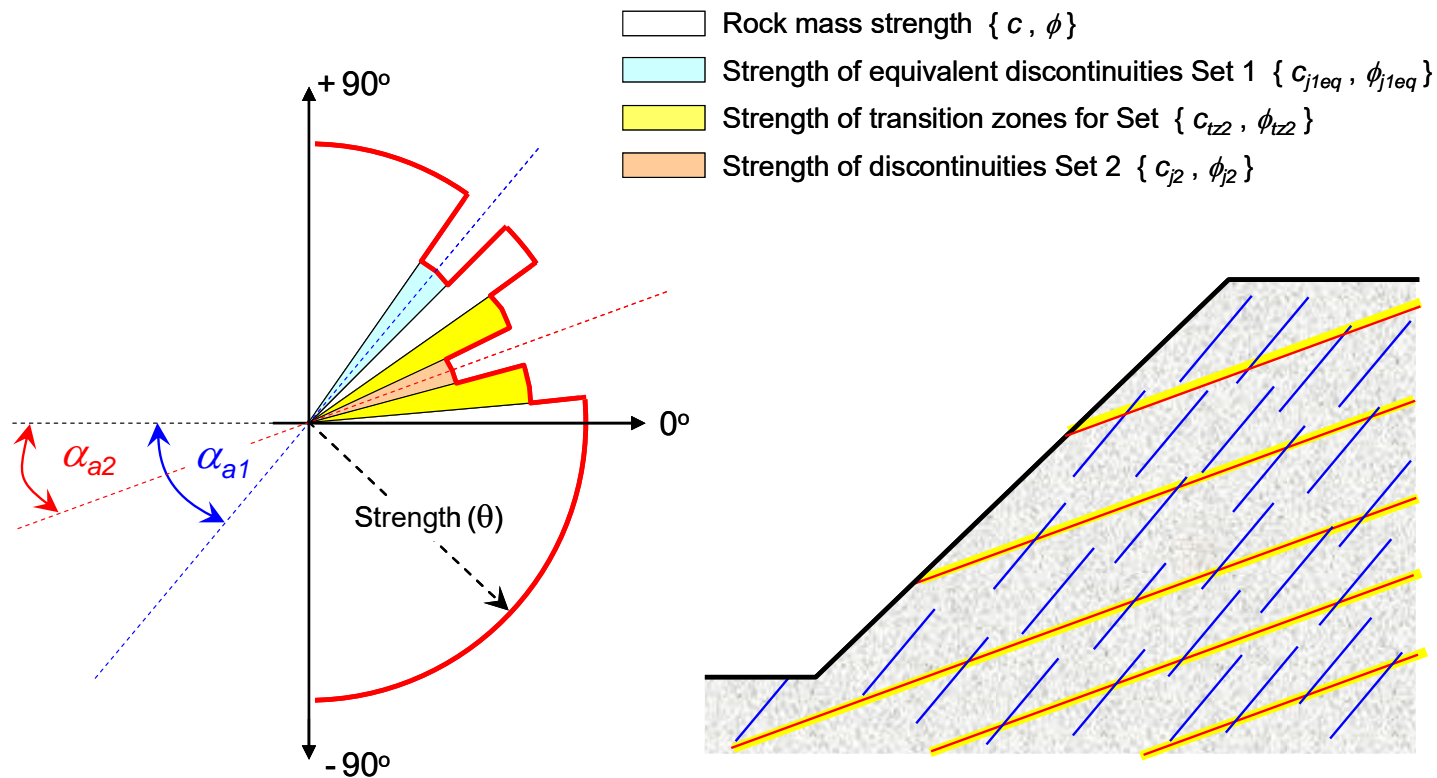
GUIDELINES FOR OPEN PIT
 SLOPE DESIGN, READ &
 STACEY (2009).

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Macizo Rocosco con propiedades conocidas (cohesión y fricción)

1 set de estructuras no persistentes (set 1)

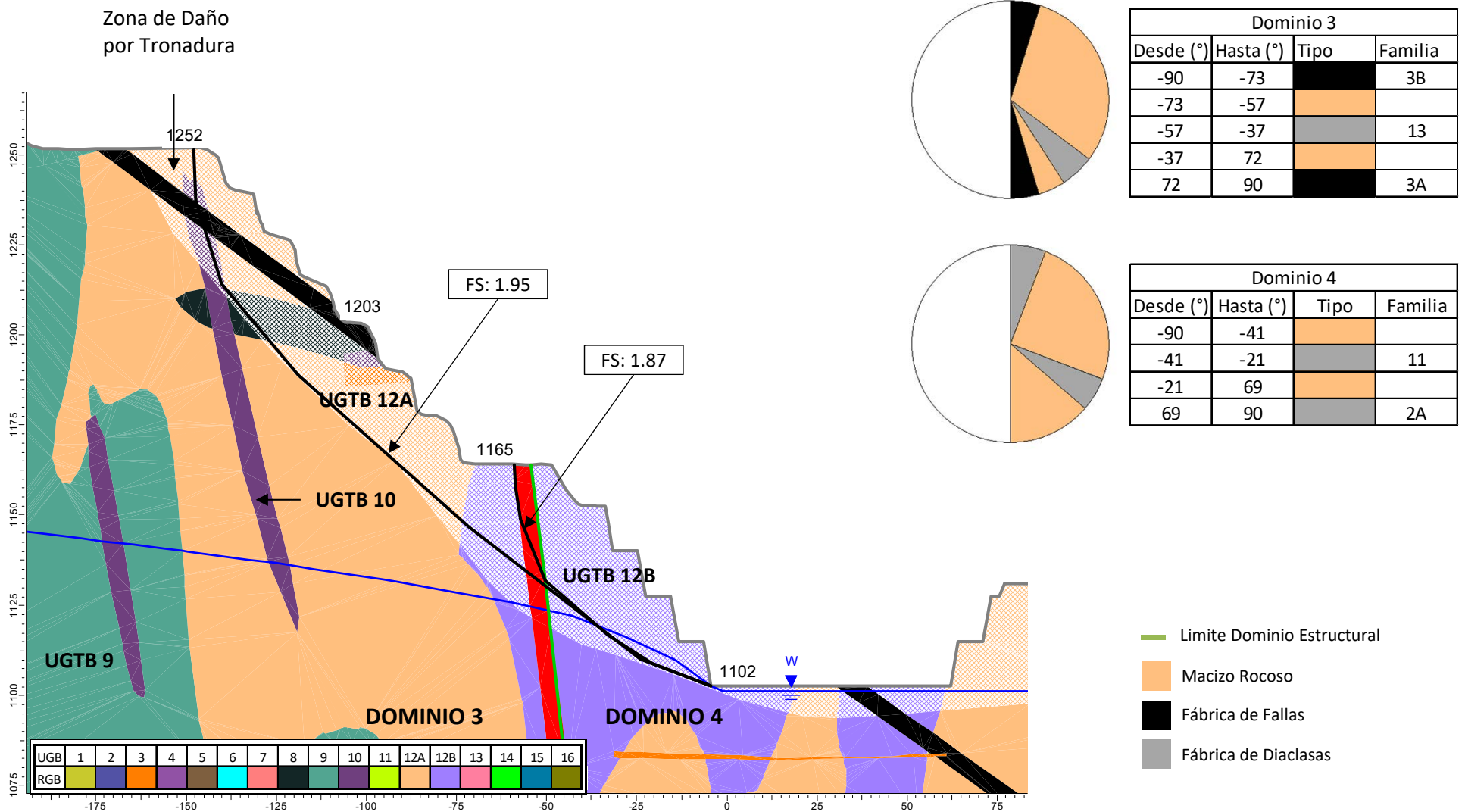
1 set de estructuras persistentes (set 2)



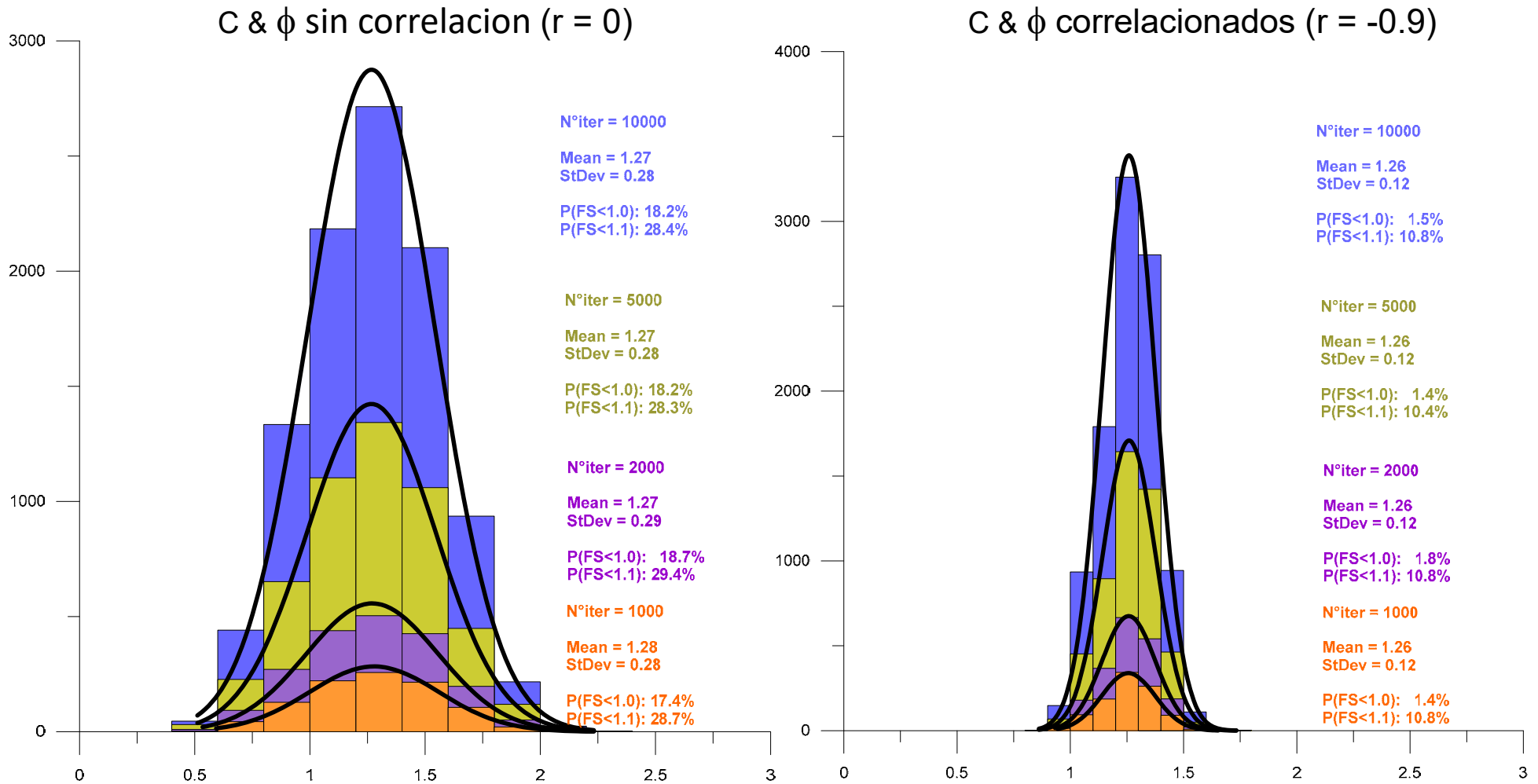
GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE
DESIGN, READ & STACEY (2009).

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Ejemplo de Análisis de Estabilidad mediante Métodos de Equilibrio Limite (GLE)

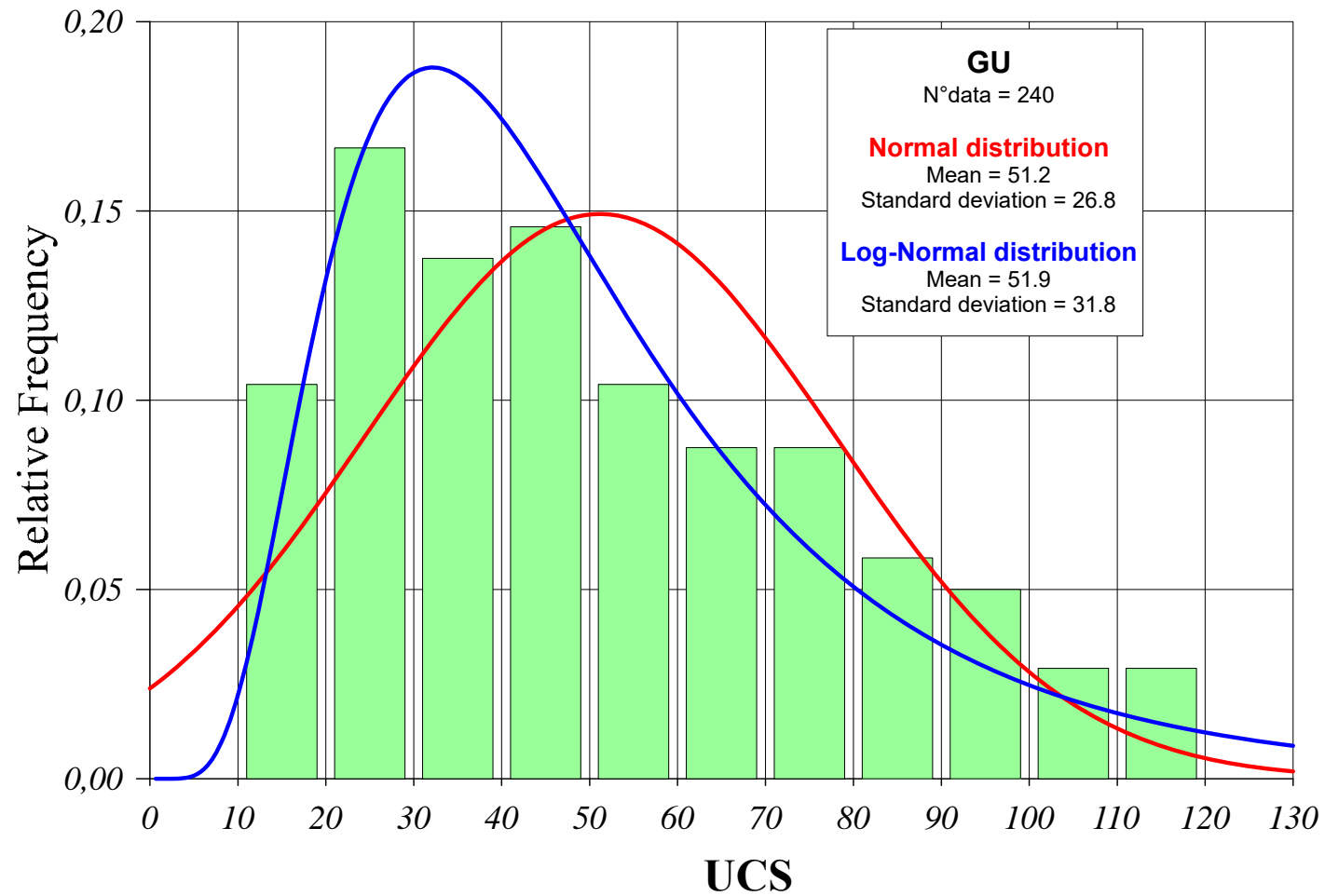


ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

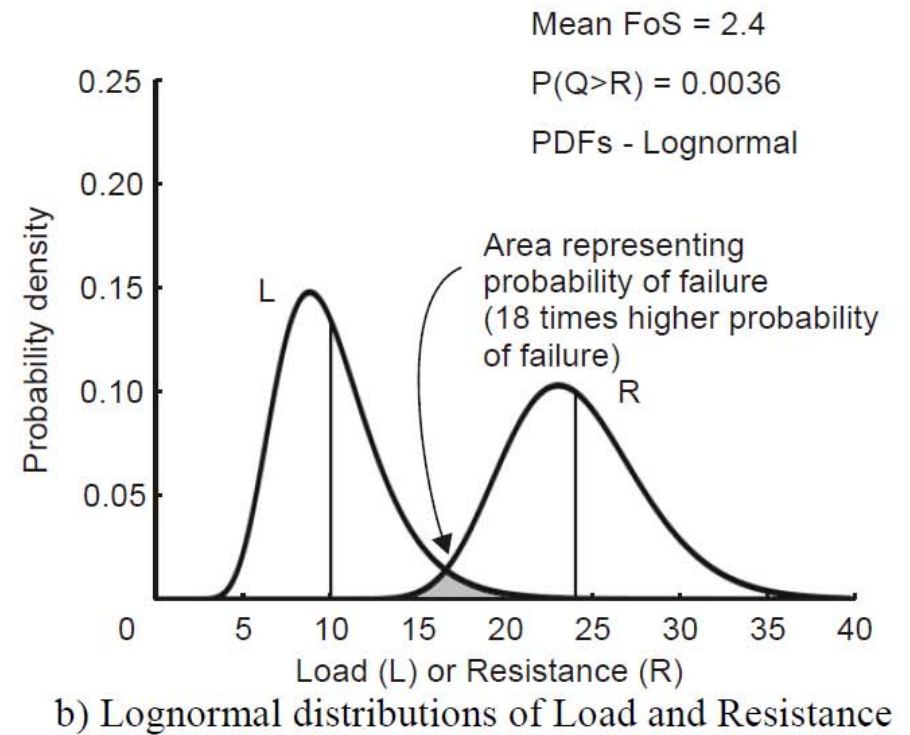
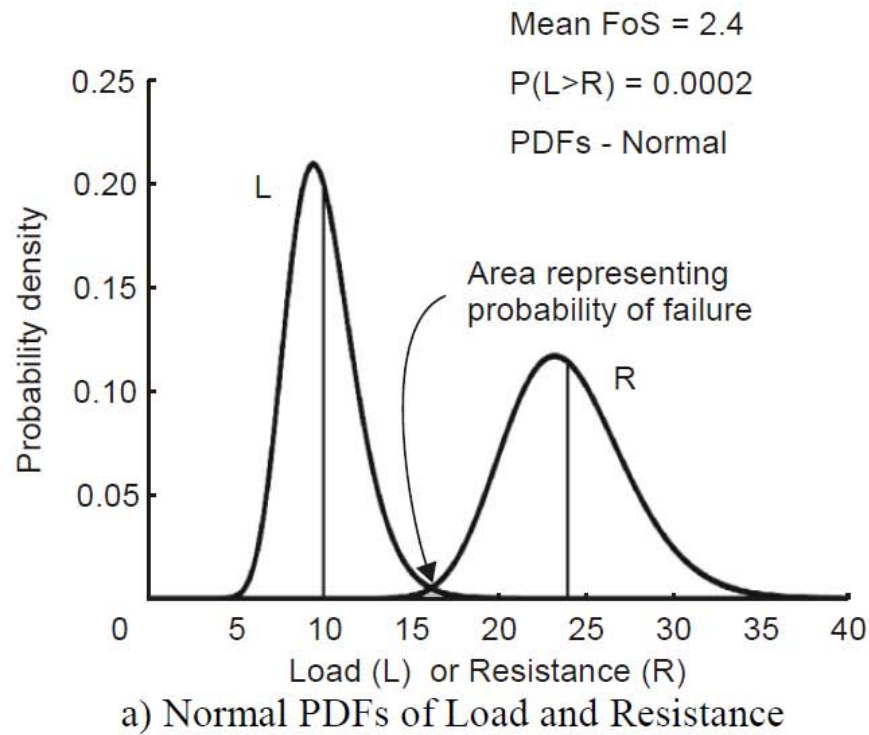


Simulación de Montecarlo para el calculo del FoS & PoF

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL



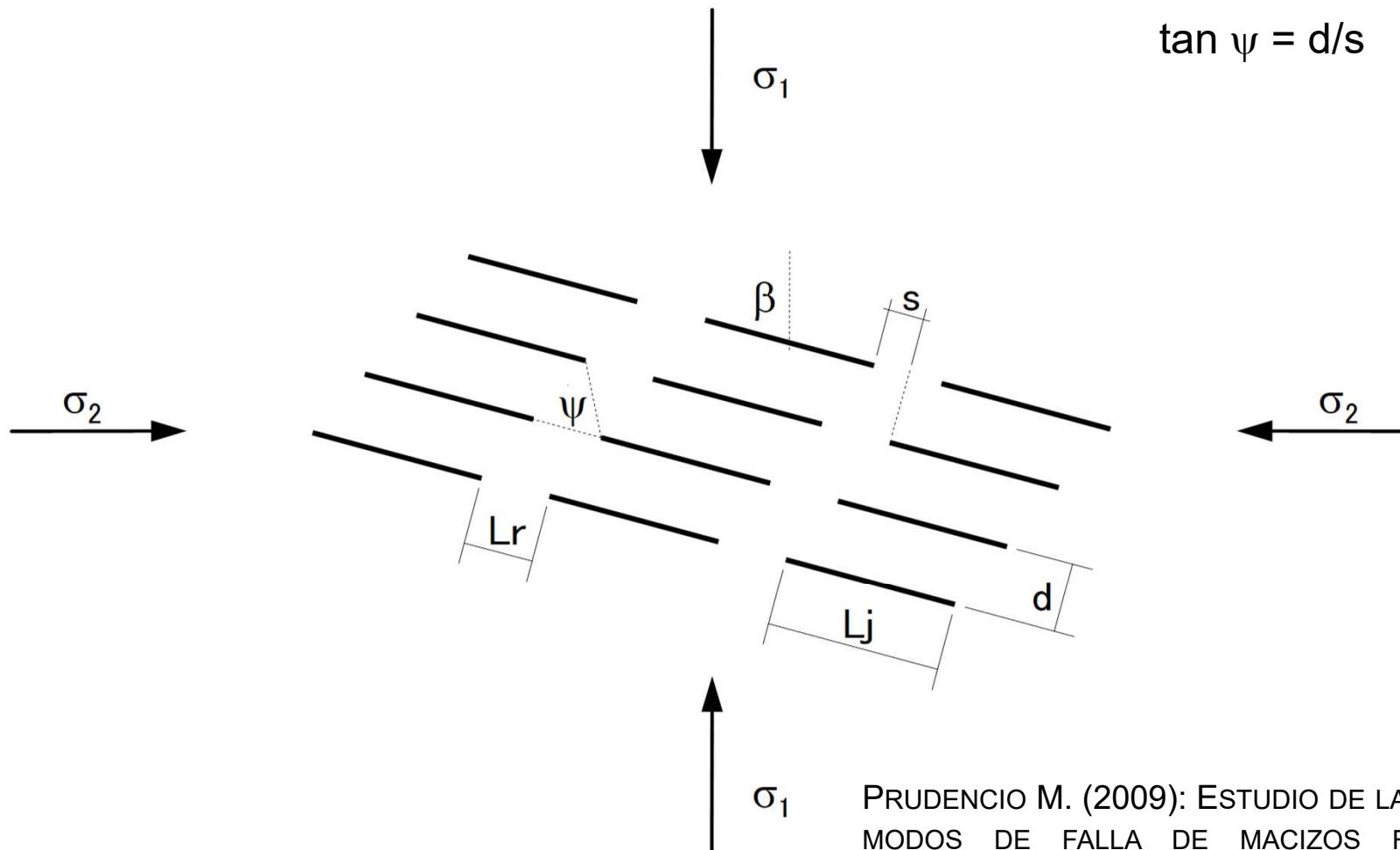
ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL



NAGHIBI, 2010

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Descripción Geométrica de sistemas de estructuras no-persistentes

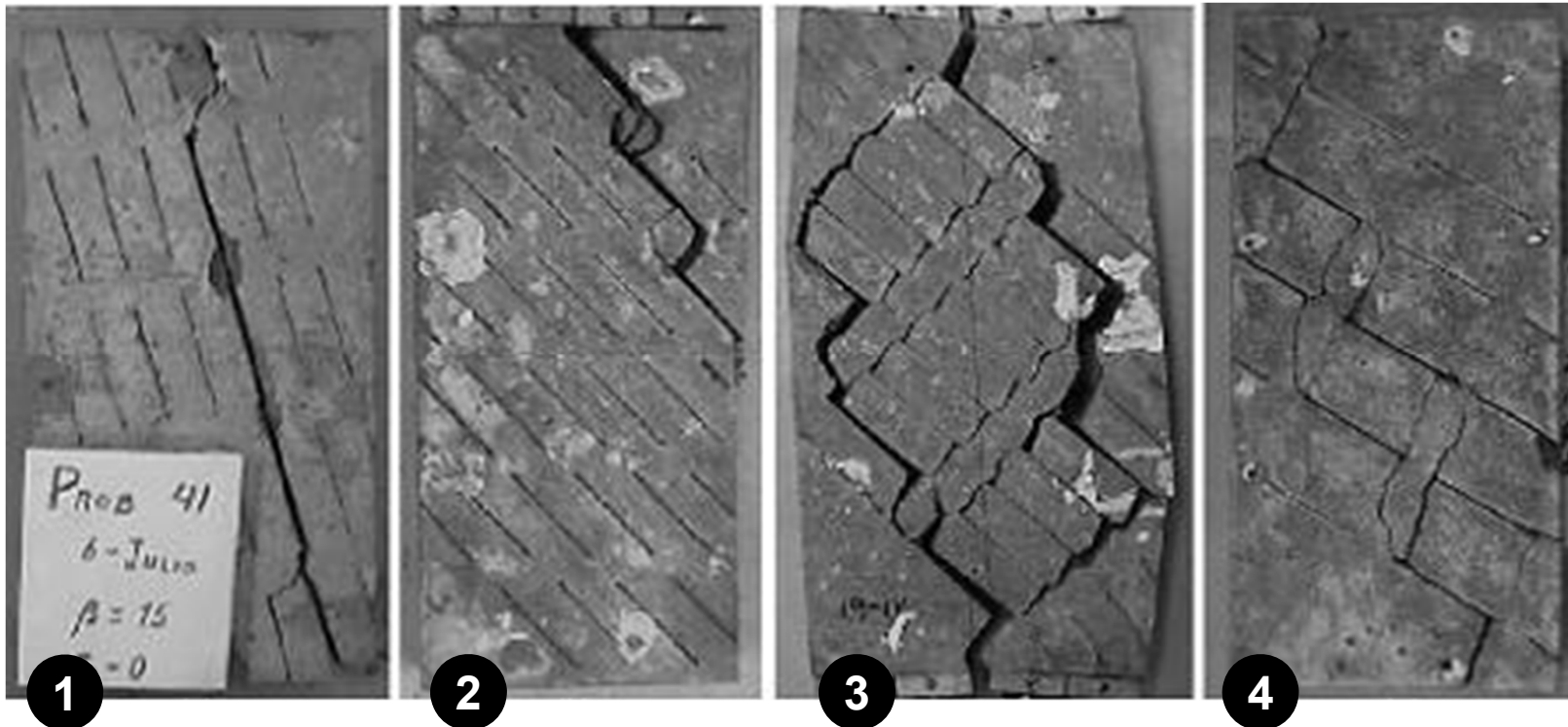


PRUDENCIO M. (2009): ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y MODOS DE FALLA DE MACIZOS ROCOSOS CON FRACTURAS NO PERSISTENTES. TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA 17

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

FAILURE MODES

1. Failure through a plane
2. Stepped failure
3. Rotation of new blocks (“Toppling”)
4. Interaction between rotation and stepped



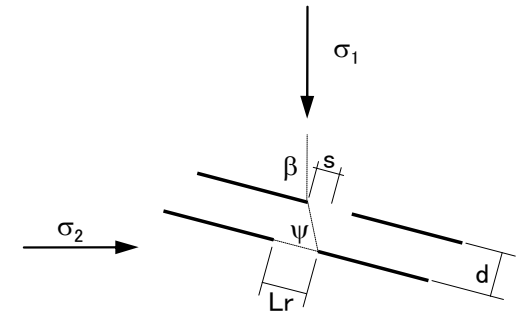
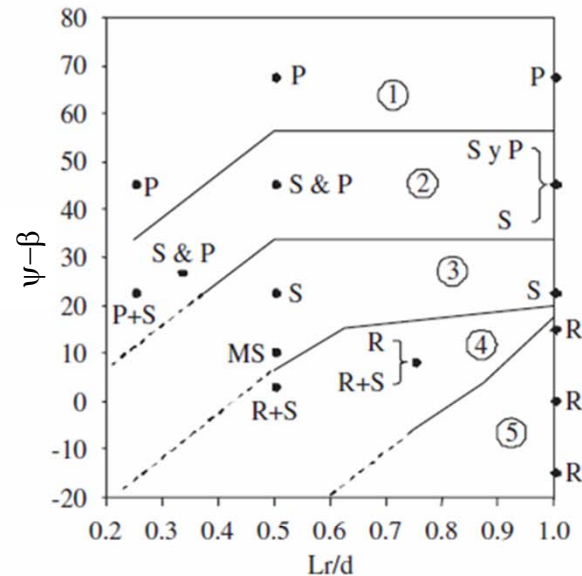
PRUDENCIO M. (2009): ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y MODOS DE FALLA DE MACIZOS ROCOSOS CON FRACTURAS NO PERSISTENTES. TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA¹⁸

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Criterio de Falla Empírico

Depends on:

- Lr/d
- β
- ψ ($\tan \psi = d/s$)
- σ_2/σ_c



Failure Mode

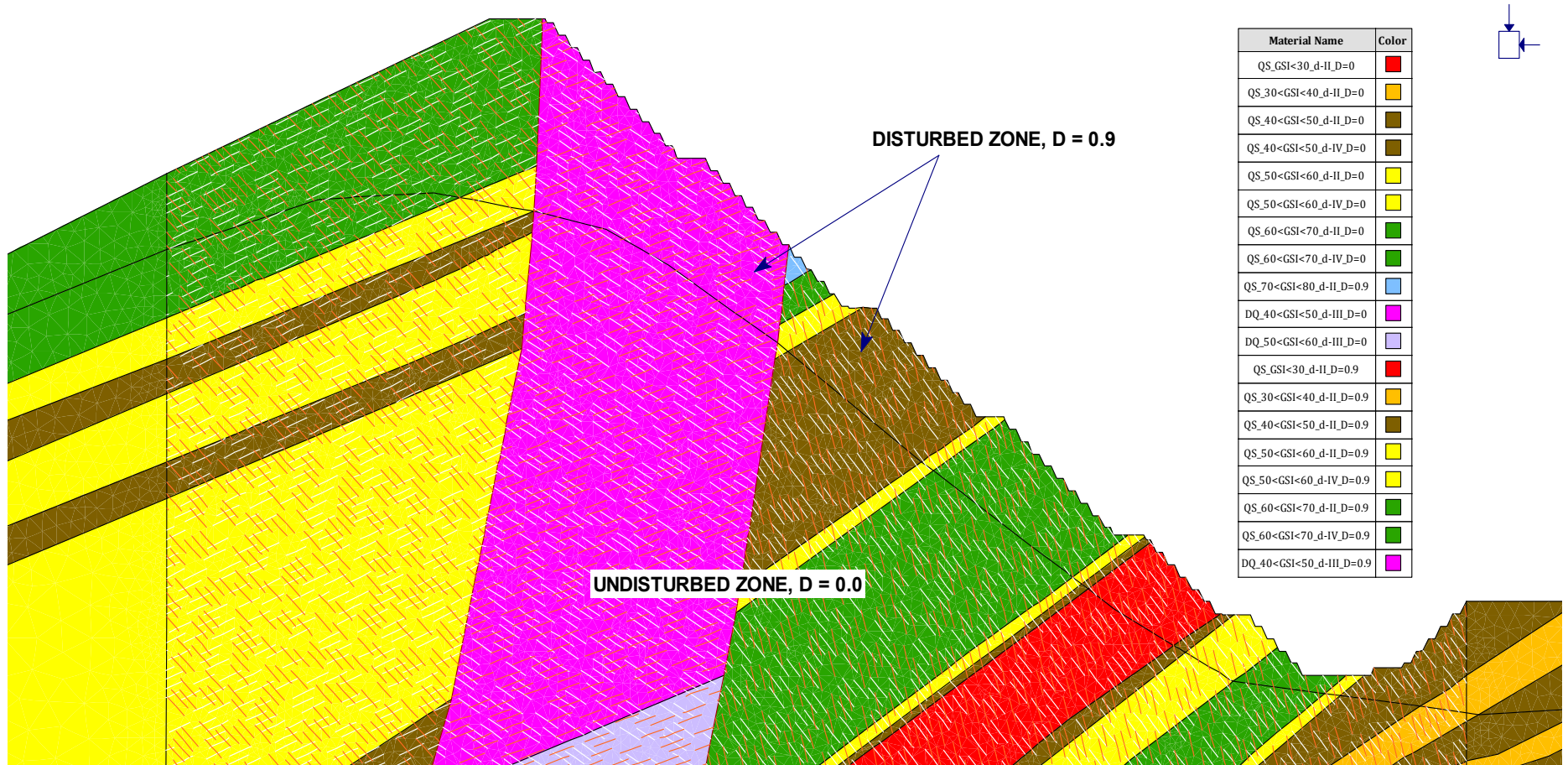
- P : Planar
- S : Stepping
- R : Rotation
- P+S : Mixed mode P y S
- R+S : Mixed mode R y S
- MS : Multi stepping

PRUDENCIO M. (2009): ESTUDIO DE LA RESISTENCIA Y MODOS DE FALLA DE MACIZOS ROCOSOS CON FRACTURAS NO PERSISTENTES. TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

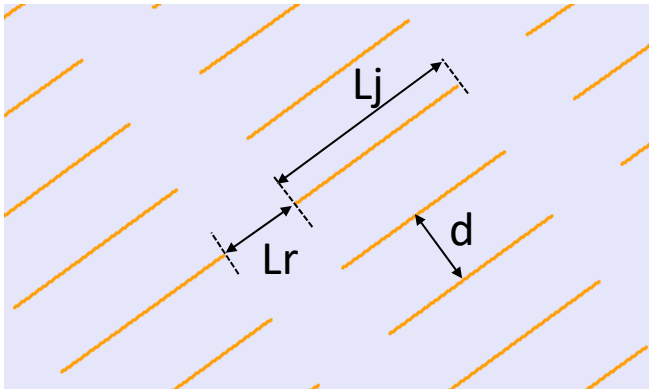
Zone	Failure Mode
1	Sliding on a single plane
2	Transition zone between sliding on a single plane and stepping failure mode. if $\sigma_2/\sigma_c > 0.04$ planar failure if $\sigma_2/\sigma_c < 0.04$ stepping
3	Stepping
4	Transition zone between stepping and rotation
5	Rotation
Note : If $\beta < 22.5$ Planar failure	

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

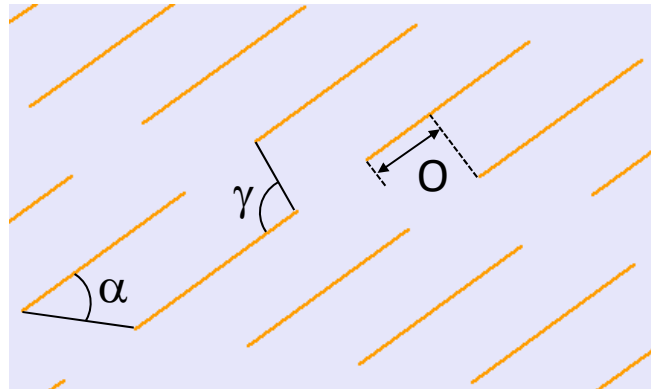
Ejemplo de Análisis de Estabilidad mediante Modelos Numéricos Bidimensionales



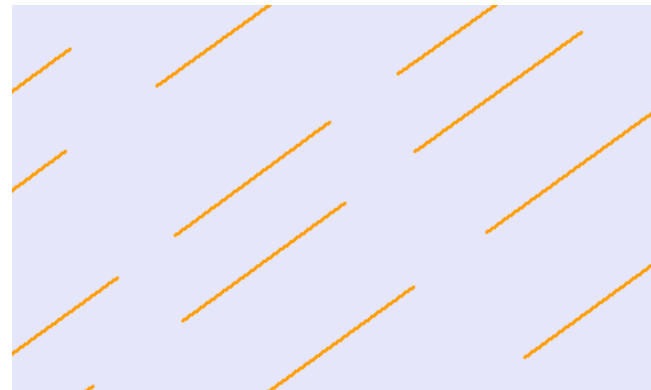
ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL



a) Paralelo Determinístico (Sin Desfase)



b) Paralelo Determinístico (con Desfase)



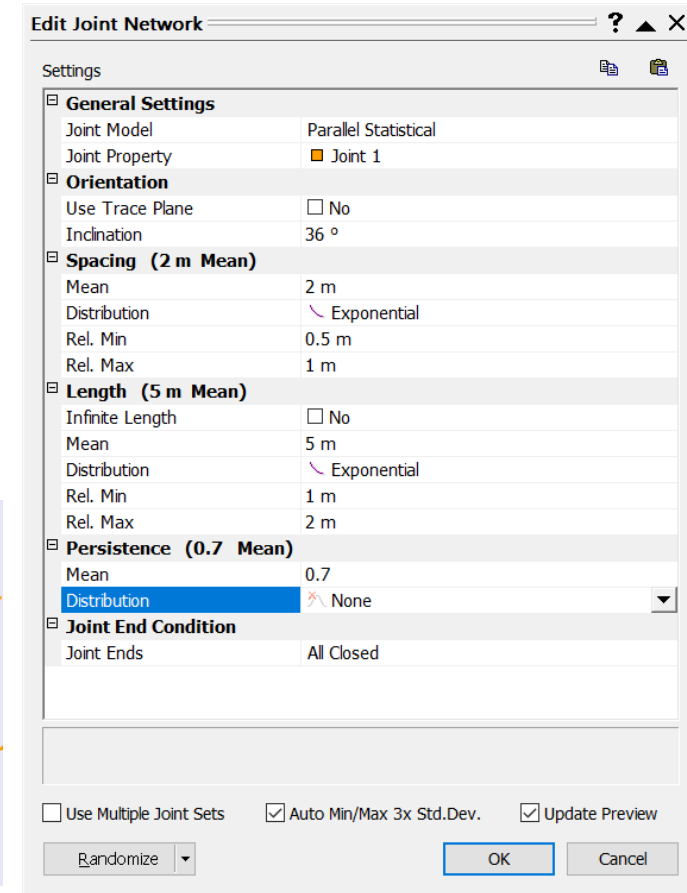
c) Paralelo Estadístico

Largo (L_j)

Persistencia (k) = $L_j / (L_j + L_r)$

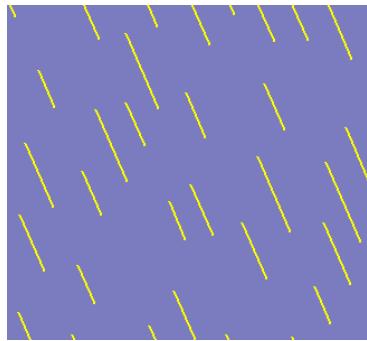
Espaciamiento (d)

Desfase u *offset* (O)



Parámetros geométricos de la fábrica estructural

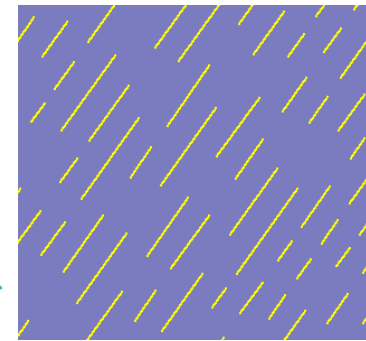
ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL



Set 1

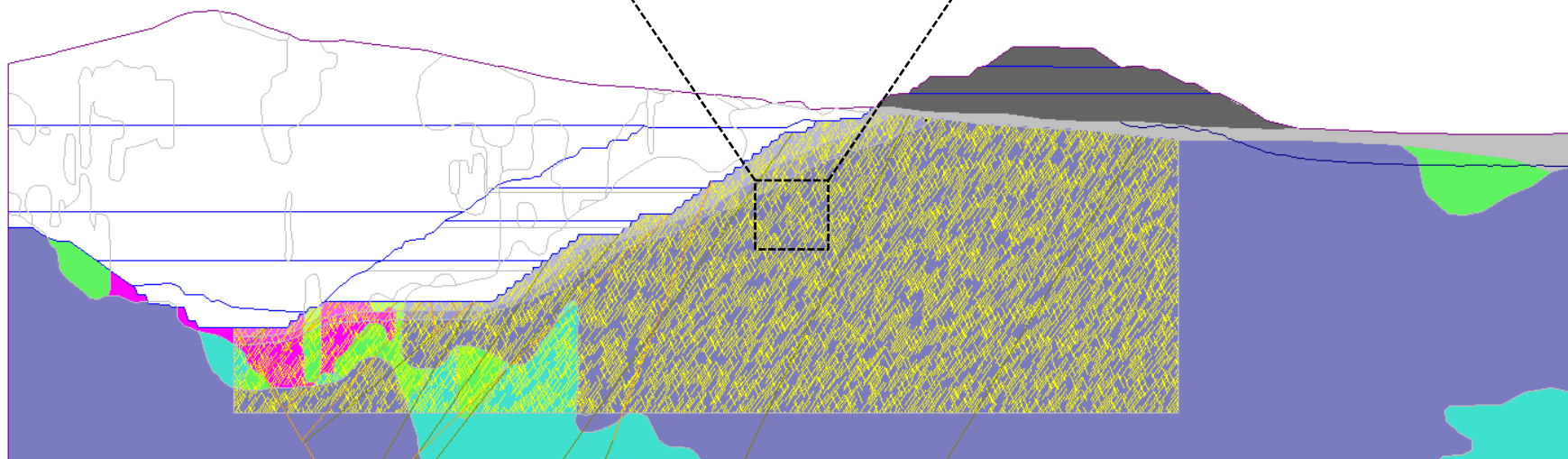
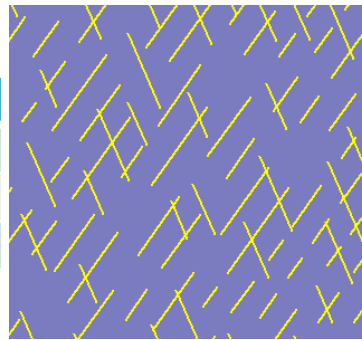
	Distribución	Media	Min.	Máx
Largo (m)	Exponencial	11	8	15
Espaciam. (m)	Exponencial	20	14	32
Persistencia	Determinístico	0.4	-	-

Largo (L)
Persistencia (K)
Espaciamiento (S)



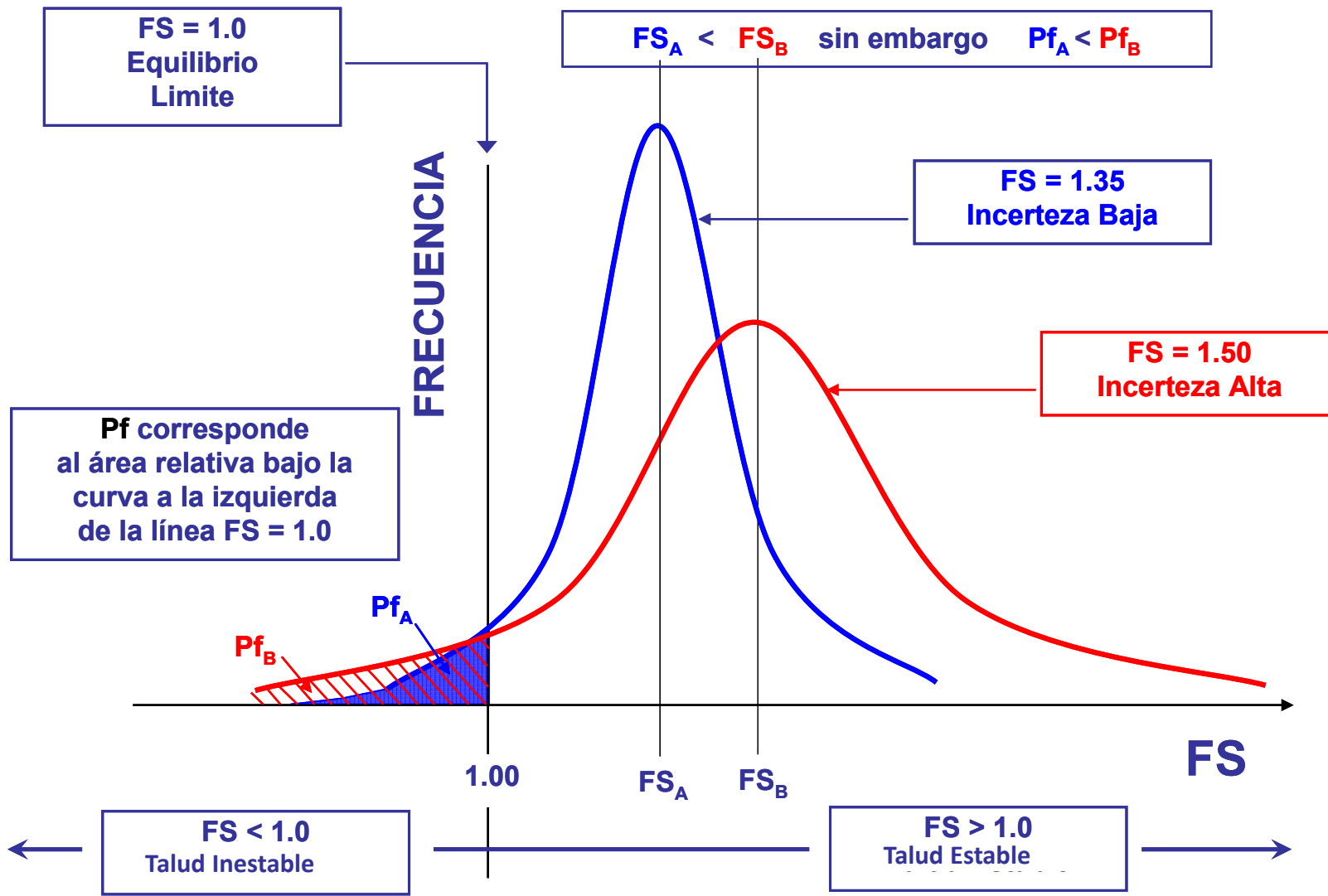
Set 2

	Distribución	Media	Min.	Máx
Largo (m)	Exponencial	10	9	11
Espaciam. (m)	Exponencial	20	12	24
Persistencia	Determinístico	0.6	-	-



ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Definición Probabilidad de Falla (Pf)



ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

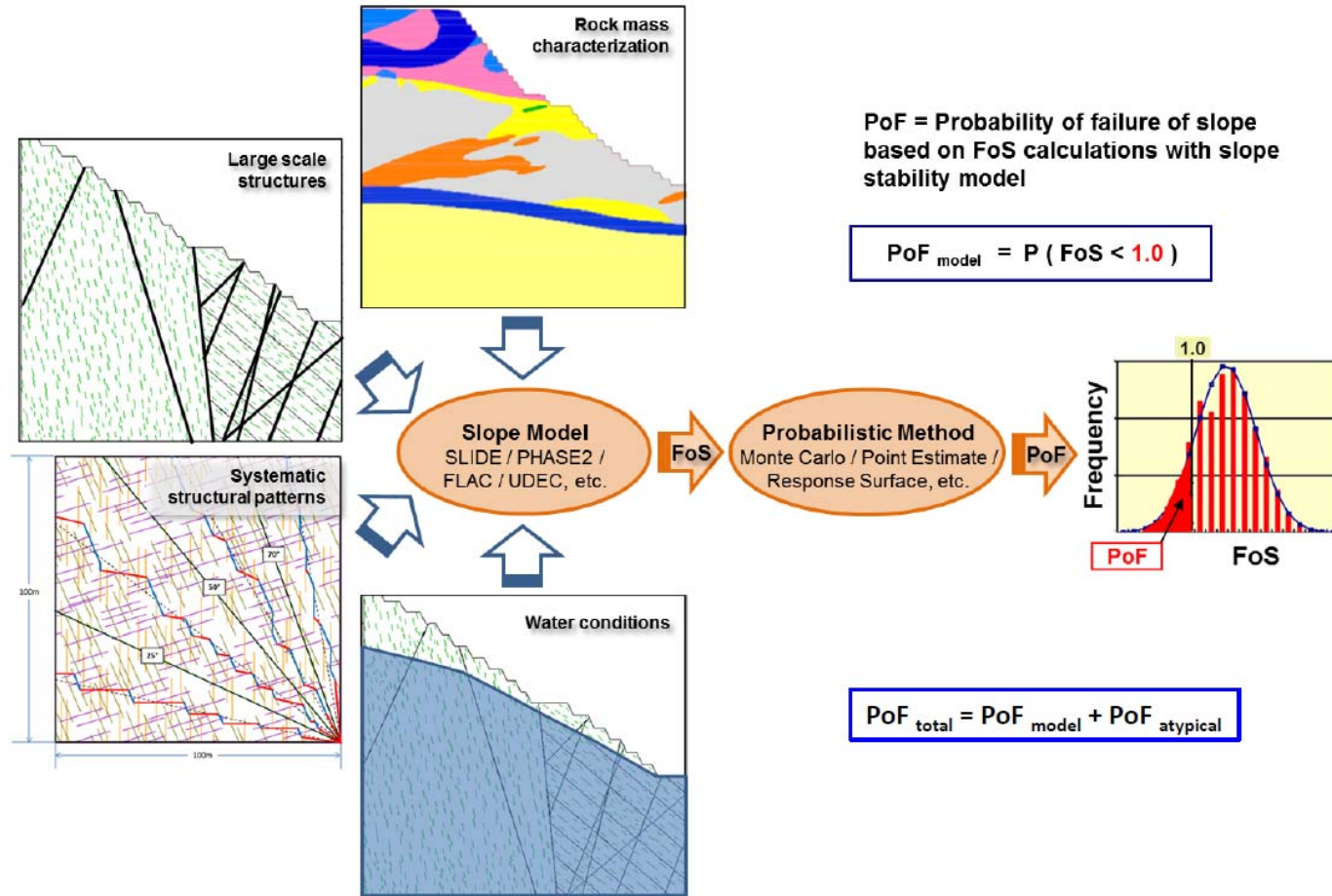
Criterios de Aceptabilidad

Escala	Consecuencia de la Falla	Factor de Seguridad (mínimo)		Probabilidad de Falla (máximo)
		Estático	Dinámico	P[FS ≤ 1]
Banco	Baja - Alta	1.1	N/A	25 - 50%
Inter-rampa	Baja	1.15 - 1.2	1.0	25%
	Media	1.2	1.0	20%
	Alta	1.2 - 1.3	1.1	10%
Global	Baja	1.2 - 1.3	1.0	15 - 20%
	Media	1.3	1.1	5 - 10%
	Alta	1.3 - 1.5	1.1	5%

READ & STACEY (2009): "GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE DESIGN".

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Concepto de Probabilidad de Falla en Taludes de Roca

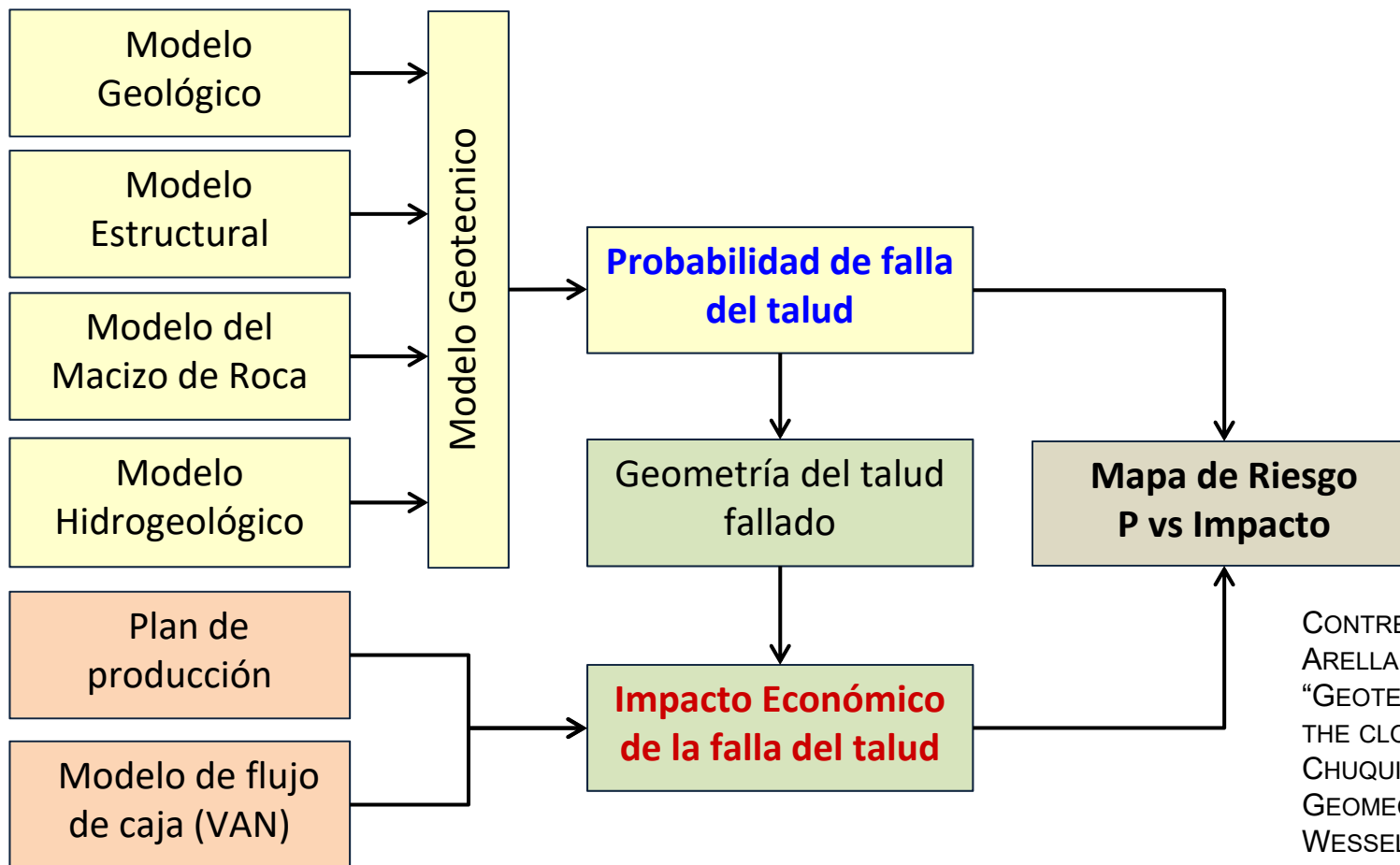


RISK BASED SLOPE DESIGN, CONTRERAS, L.F. (SRK, 2013)

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Metodología de diseño de taludes basada en el análisis de riesgo en términos del impacto económico de la falla de taludes.

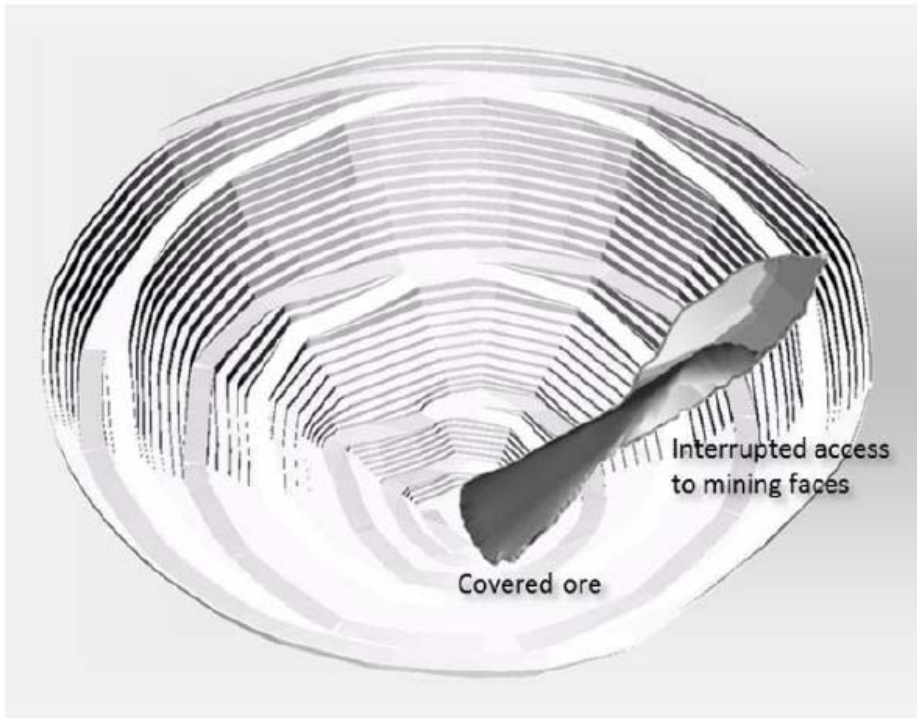
$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad (evento)} \times \text{Consecuencia del evento}$$



CONTRERAS, LF., HORMAZABAL, E. ARELLANO, M & LEDEZMA R. (2019): "GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS FOR THE CLOSURE ALTERNATIVES OF THE CHUQUICAMATA OPEN PIT". MINING GEOMECHANICAL RISK 2019 – J WESSELOO (ED.). PERTH, WA.

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Base Conceptual para la estimación del Impacto Económico producto de una falla o deslizamiento de taludes.



Slope Failure Impacts:

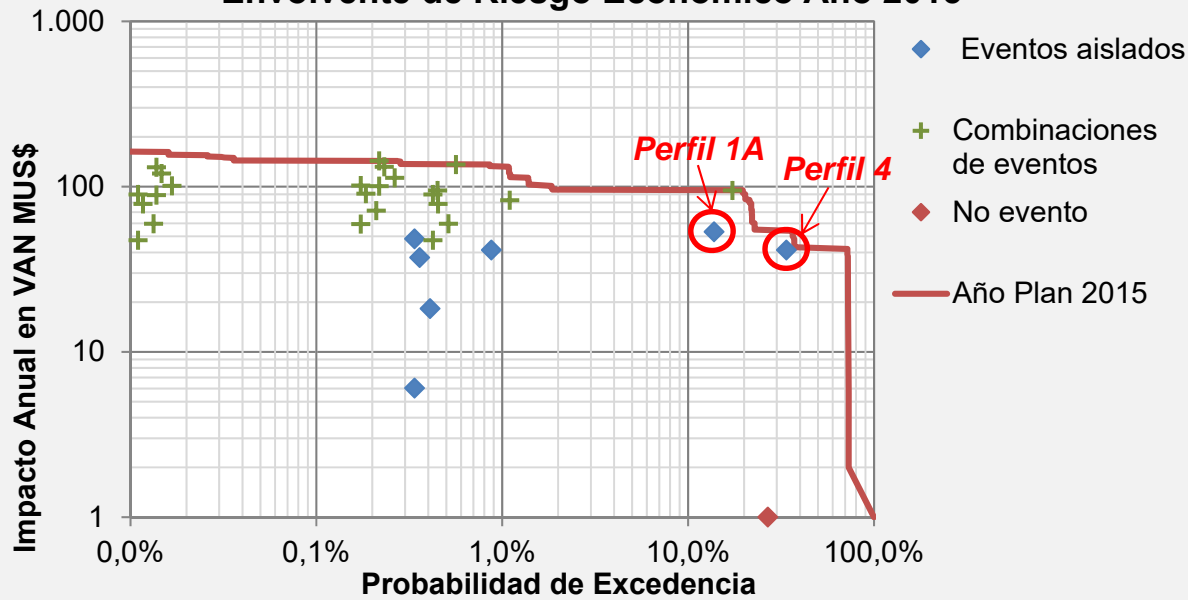
- Disruption of planned ore feed to plant.
- Additional costs to restore site.

$$\text{Failure Impact} = \text{NPV}_{\text{reference}} - \text{NPV}_{\text{with failure}}$$

THE ECONOMIC RISK MAP AS A TOOL FOR PIT SLOPE OPTIMIZATION, CONTRERAS, L.F. (SRK, 2015)

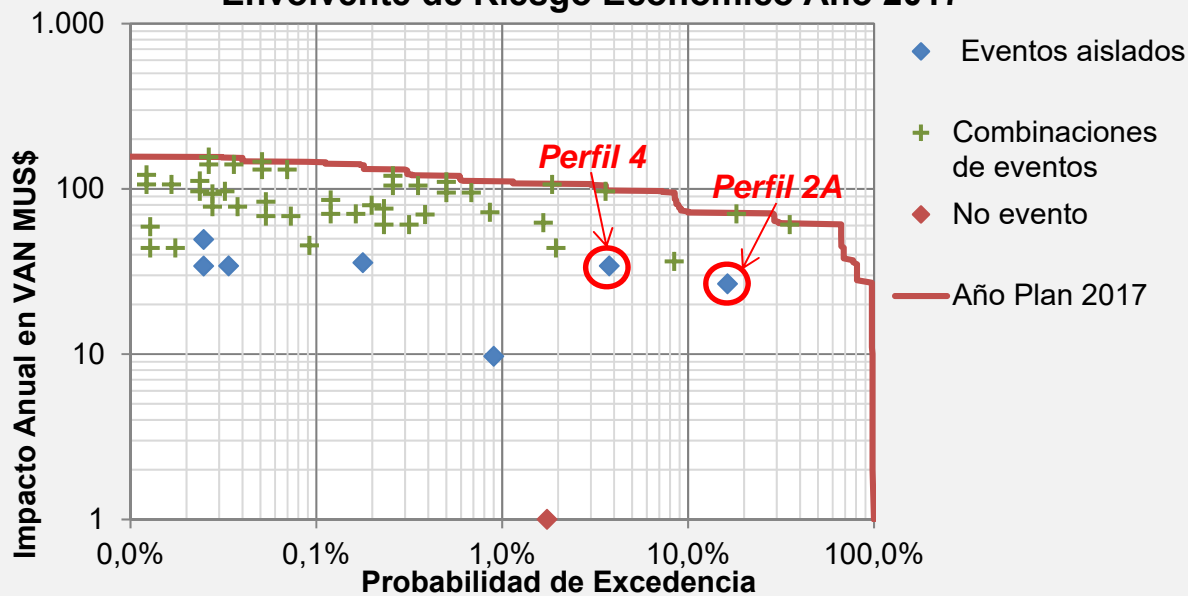
ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Envolvente de Riesgo Economico Año 2015



Ejemplo de la construcción de la envolvente económica de riesgo.

Envolvente de Riesgo Economico Año 2017



CONTRERAS, LF., HORMAZABAL, E. ARELLANO, M & LEDEZMA R. (2019): "GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS FOR THE CLOSURE ALTERNATIVES OF THE CHUQUICAMATA OPEN PIT". MINING GEOMECHANICAL RISK 2019 – J WESSELOO (ED.). PERTH, WA.

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Matriz de Riesgo para Impacto Económico

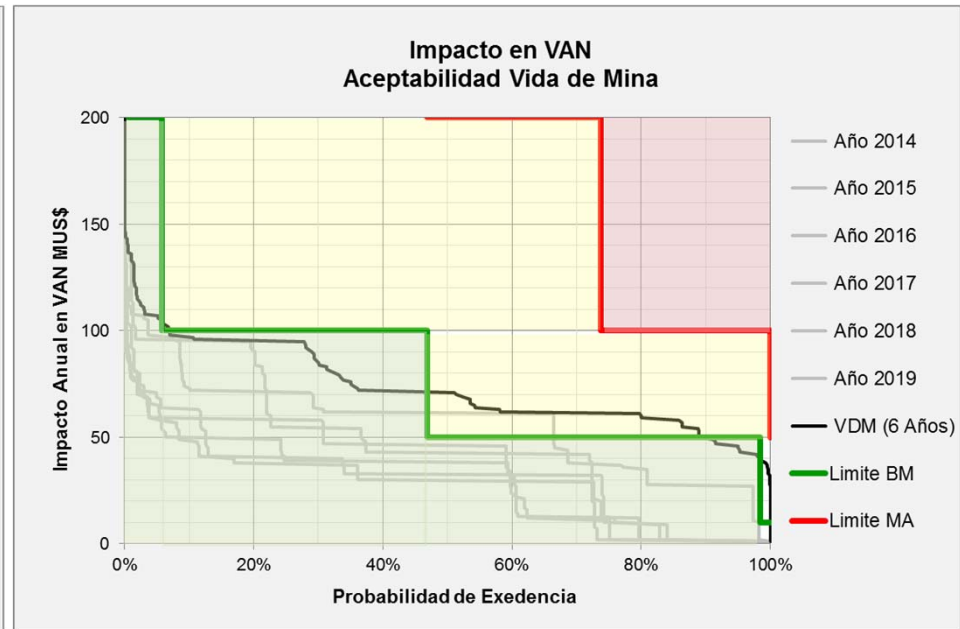
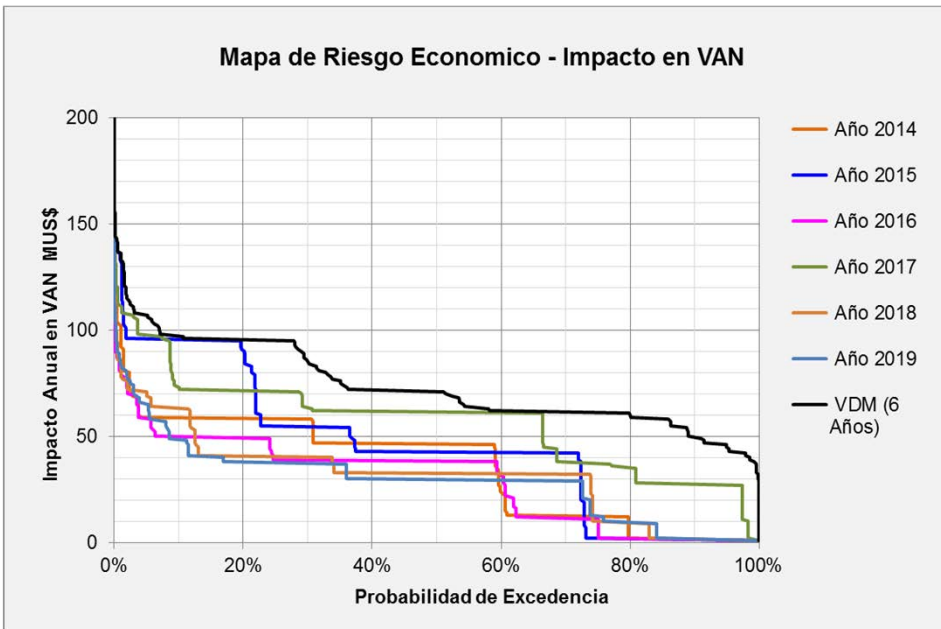
Impacto Anual	Nivel	Rango MUS\$	Categoria de Riesgo				
	5	> 200	A	A	A	A	A
	4	100 - 200	M	M	A	A	A
	3	50 - 100	B	M	M	M	A
	2	10 - 50	B	B	B	M	M
	1	< 10	B	B	B	B	B
		Rango %	<10%	10-20%	20-50%	50-80%	>80%
		Nivel	1	2	3	4	5
		Probabilidad					

Impacto Anual	Nivel	Rango % UA	Categoria de Riesgo				
	5	> 30%	A	A	A	A	A
	4	15% - 30%	M	M	A	A	A
	3	7.5% - 15%	B	M	M	M	A
	2	2% - 7.5%	B	B	B	M	M
	1	< 2%	B	B	B	B	B
		Rango %	<10%	10-20%	20-50%	50-80%	>80%
		Nivel	1	2	3	4	5
		Probabilidad					

CONTRERAS, LF., HORMAZABAL, E. ARELLANO, M & LEDEZMA R. (2019):
 "GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS FOR THE CLOSURE ALTERNATIVES OF THE
 CHUQUICAMATA OPEN PIT". MINING GEOMECHANICAL RISK 2019 – J
 WESSELOO (ED.). PERTH, WA.

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

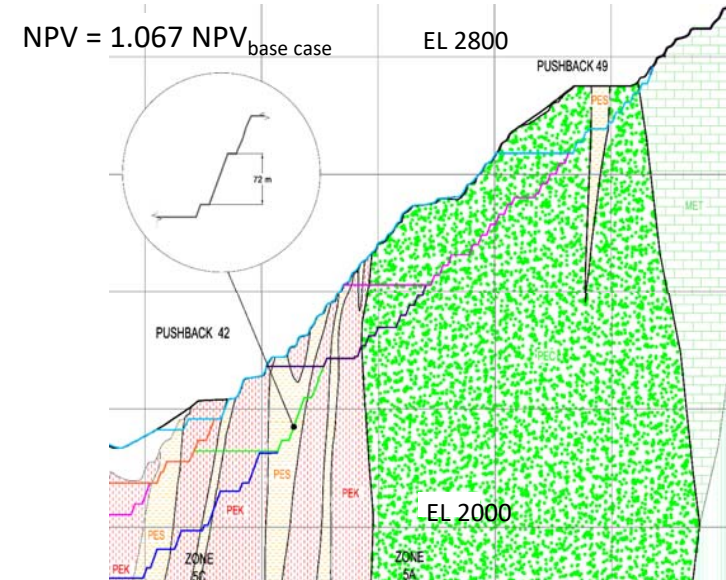
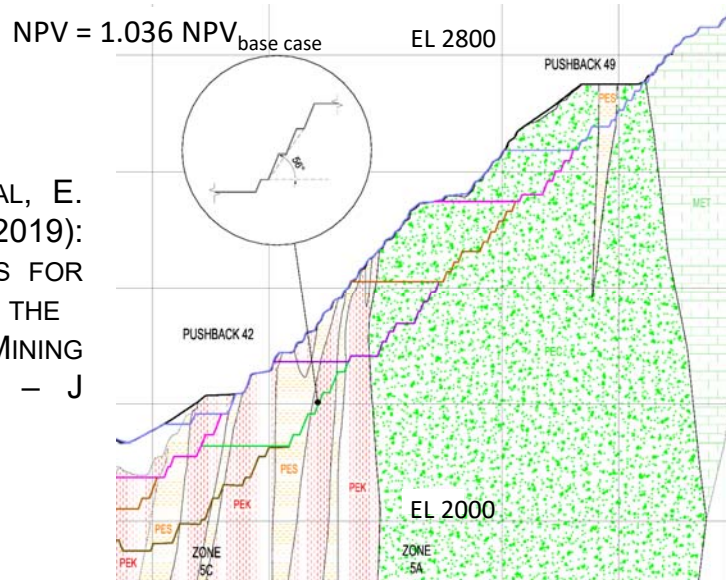
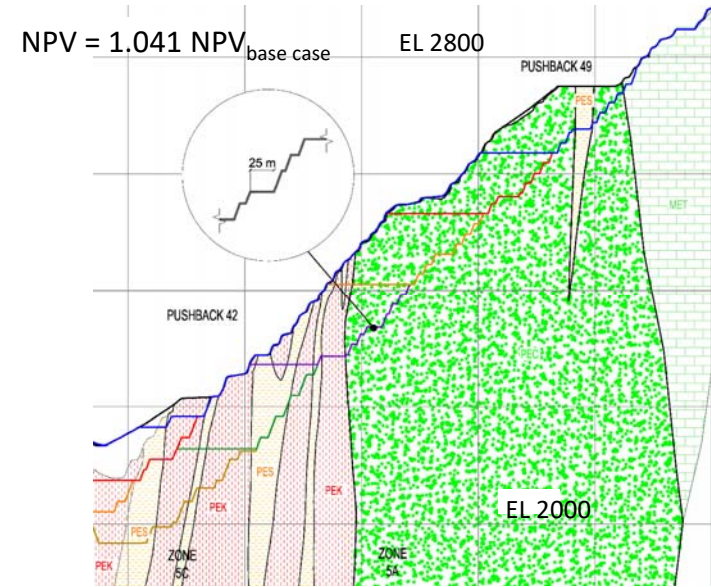
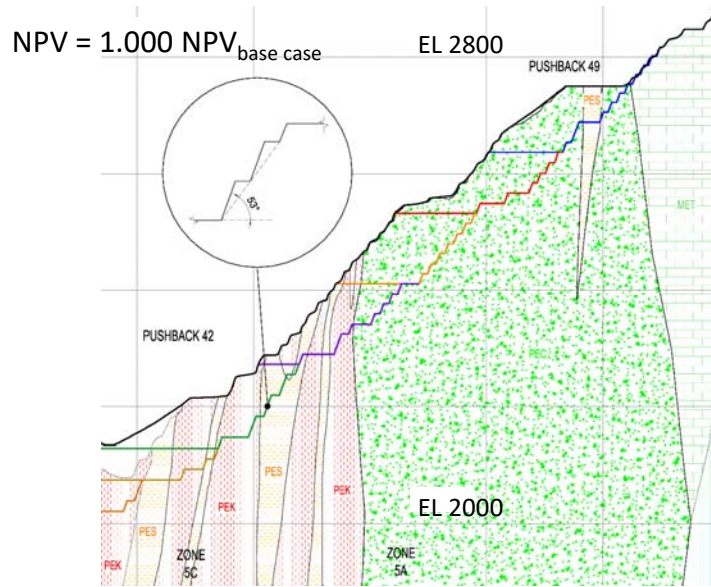
Mapa de Riesgo Económico



CONTRERAS, LF., HORMAZABAL, E. ARELLANO, M & LEDEZMA R. (2019):
"GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS FOR THE CLOSURE ALTERNATIVES OF THE
CHUQUICAMATA OPEN PIT". MINING GEOMECHANICAL RISK 2019 – J
WESSELOO (ED.). PERTH, WA.

ESCALA INTERRAMPA Y GLOBAL

Ejemplo de Aplicación del Mapa de Riesgo



CONTRERAS, LF., HORMAZABAL, E. ARELLANO, M & LEDEZMA R. (2019): "GEOTECHNICAL RISK ANALYSIS FOR THE CLOSURE ALTERNATIVES OF THE CHUQUICAMATA OPEN PIT". MINING GEOMECHANICAL RISK 2019 – J WESSELOO (ED.). PERTH, WA.

GRACIAS