



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE MINAS

MODELO DE ESFUERZOS IN SITU PARA CHILE Y SU INCIDENCIA EN EL DISEÑO
MINERO SUBTERRÁNEO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL DE MINAS

TANIA FRANCISCA GALARCE CASTRO

PROFESOR GUÍA:

JAVIER VALLEJOS MASSA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LUIS MERINO MEDINA

JORGE SOUGARRET LARROUQUETTE

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN

Los esfuerzos in situ son aquellos que son intrínsecos del macizo rocoso y se dividen en esfuerzo tectónico y gravitacional. Estos son una de las condiciones iniciales más importantes para estimar las solicitaciones que pueden desarrollarse en una obra de ingeniería de rocas. El buen conocimiento permite diseñar adecuadamente las labores mineras, obteniendo así excavaciones estables y más seguras.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar una metodología que permita ajustar estadísticamente un modelo representativo de una base de datos de mediciones de esfuerzos in situ, junto con relacionarlo con el tectonismo de la región.

La metodología propuesta para establecer el modelo de esfuerzos in situ queda dada por cuatro partes:

1. Filtrar la base de datos, usando el criterio de Chauvenet para la carga litostática y la regresión lineal del criterio de Mohr-Coulomb.
2. Formar el modelo sujeto a tres restricciones: intervalo de confianza del criterio de Mohr-Coulomb, primer invariante de esfuerzos y razón de esfuerzos $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$.
3. Plantear una serie de modelos que se diferencian en su cantidad de parámetros. La función objetivo se define a partir de los errores cuadráticos entre los esfuerzos principales del modelo y la base de datos. Para identificar el modelo óptimo se utiliza selección estadística de modelos.
4. Calcular las orientaciones para el modelo seleccionado.

Los modelos obtenidos se comparan con modelos propuestos por otros autores y aceptados en la literatura. Esta comparación entrega magnitudes y orientaciones de los esfuerzos consistentes, lo que permite concluir que la metodología presentada estima adecuadamente el comportamiento de la base de datos. La siguiente tabla presenta el tensor de esfuerzos obtenidos para Chile y Canadá.

	<i>Chile</i>		<i>Canadá</i>	
	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>
τ_{EN}	0,002	0,000	0,002	0,121
τ_{EV}	0,010	0,309	0,005	0,000
τ_{NV}	0,007	0,235	0,006	0,000
σ_{EW}	0,021	9,462	0,020	10,387
σ_{NS}	0,011	5,648	0,028	18,200
σ_V	0,027	0,000	0,026	0,000

Se evalúa el impacto de los esfuerzos in situ en el diseño de diversas labores mineras subterráneas, tales como pilares, caserones y galerías. Las variables utilizadas para medir el impacto son: la carga promedio sobre el pilar, la magnitud de la sobre-excavación en caserones, la zona fracturada en túneles y el impacto en el diseño de soporte en galerías.

Los resultados ilustran que cuando los esfuerzos presentan un comportamiento hidrostático la estabilidad de las excavaciones es mayor. Se aprecia que las tendencias obtenidas en función de la razón de esfuerzos horizontales y verticales (k), son lineales para pilares, caserones y túneles. En el caso del soporte el espaciamiento de los pernos disminuye y el espesor de shotcrete aumenta, a medida que aumenta la razón de esfuerzos k . Parte de este análisis demuestra que existen diversos factores que afectan el diseño de labores mineras, sin embargo, es importante como paso inicial y base conocer el estado preexistente en la roca y sus propiedades geomecánicas.

ABSTRACT

In situ stresses are those proper to the rock mass and they can be classified in tectonic and gravitational stress. These are one of the most important initial conditions to estimate stresses related to a rock engineering project. Good understanding allows to design mine workings, in order to have stables and secure excavations.

The main objective of the study is to develop a methodology capable of defining statistically a representative model of a database of in situ stresses and establish their relation with regional tectonism.

The proposed methodology to establish the in situ stress model consists in four steps:

1. Filtering the database considering the Chauvenet criteria for lithostatic pressure and a linear regression of Mohr-Coulomb criteria.
2. Build the model with three constrains: Mohr-Coulomb criteria's confidence interval, first Invariant and stress ratio $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$.
3. Propose a series of models with different number of parameters. The objective function aims to minimize squared error of principal stresses between model and database. Statistical model selection is used to select the optimal model.
4. Calculate the orientations for the selected model.

The obtained models are compared with models of other authors and accepted in the literature. This comparison gives consistent results for stresses values and orientations, which allows concluding that the presented methodology represents appropriately the behavior of the database. The next table presents the stress tensor obtained for Chile and Canada.

	<i>Chile</i>		<i>Canada</i>	
	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>
τ_{EN}	0,002	0,000	0,002	0,121
τ_{EV}	0,010	0,309	0,005	0,000
τ_{NV}	0,007	0,235	0,006	0,000
σ_{EW}	0,021	9,462	0,020	10,387
σ_{NS}	0,011	5,648	0,028	18,200
σ_V	0,027	0,000	0,026	0,000

The impact of in situ stresses on the design of mine working, such as: pillars, stopes and tunnels, is performed. Variables used to measure the impact are: pillar average load, magnitude of overbreak on stopes, failure zone in tunnels and the impact on support design of tunnels.

Results show that a greater stability on excavation occurs when stresses show a hydrostatic behavior. It can be seen that obtained tendencies show a linear behavior on the basis of the ratio of horizontal to vertical stress (k) for pillars, stopes and tunnels. On the case of tunnel support, bolt spacing decrease and shotcrete width increase with the growth of stress ratio k . Part of this analysis shows than several factors affect mine workings design, however, first step is to know rock mass preexisting conditions and its geomechanic properties.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de memoria se realizó en el marco del proyecto Innova Chile CORFO 11IDL2-10630: “Desarrollo de herramientas de diseño para minería subterránea selectiva en Chile”, desarrollándose por el Departamento de Ingeniería de Minas y el Advanced Mining Technology Centre (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Primero agradecer a mi familia que los amo. Gracias a mis padres, Susana y Juan, por apoyarme constantemente y creer siempre en mí. A mi hermano Diego por enseñarme que ser feliz depende de uno mismo y que cuento con él en todo momento. No puedo solo agradecer a mi núcleo familiar ya que todos los que me acompañan, abuelos, tíos y primos, han sido fundamentales para cumplir este sueño. En particular, agradecer a la familia García- Galarce por darme una mano al inicio de esta etapa.

Agradecer a los miembros de la comisión, en especial al profesor Javier Vallejos por guiarme en este trabajo y por dedicar tiempo y esfuerzo a este proyecto. Agradecer a Juanita por resolver mi vida constantemente.

Parte importante de esta etapa fueron aquellos que me acompañaron día a día, agradecer a las "caras" por estar ahí en los buenos y malos momentos. Gracias a mis compañeros de la "ofis" que siempre me dieron aliento cuando las cosas no funcionaban. Gracias a Claudia, Stephanie y Alfredo por su cariño y apoyo incondicional.

A mis amigos de la vida, con los que he crecido, decirles que los quiero y que su amistad es un tesoro para mí, agradecerles por los excelentes momentos y por estar en los malos también. A mis "miguis" además agradecerles por escucharme y aconsejarme siempre.

A Emilio darle las gracias por su compañerismo, apoyo, protección y lealtad pero por sobre todo por amarme más que entenderme.

Agradecer a mi Ita por enseñarme que lo importante en la vida es el amor y que con fuerza de voluntad todo se puede lograr. Dos lecciones puestas en este trabajo. Te extraño mucho.

Gracias totales!

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Estructuras Mineras.....	1
1.1.1 Diseño de Caserones.....	1
1.1.2. Diseño de pilares profundos	4
1.1.3. Esfuerzos totales alrededor de una excavación	5
1.2. Objetivos	5
1.3. Alcances.....	6
2. ANTECEDENTES	7
2.1. Definición de esfuerzo	7
2.2. Tipos de esfuerzos.....	8
2.3. Esfuerzo vertical	9
2.4. Esfuerzo horizontal	10
2.5. Relación entre esfuerzos principales y mecanismos de falla	15
2.6 Modelos de esfuerzos In Situ.....	24
2.6.1 Canadá	24
2.6.2. Chile.....	33
2.6.3. Otros Países	36
2.6.4. Resumen	43
3. Metodología.....	47
3.1. Base de datos.....	47
3.1.2. Filtro de la base de datos	48
3.1.3. Análisis de la base de datos	49
3.2. Método propuesto para ajustar un modelo de esfuerzos in-situ en función de la profundidad.....	49
3.2.2. Análisis exploratorio de la base de datos.....	49
3.2.3. Ajuste estadístico del modelo	50
3.3. Ajuste del modelo en otras bases de datos	52
3.4. Comparación con otros modelos.....	52
3.5. Impacto de los esfuerzos in situ en el diseño minero.....	52
3.5.2. Pilares	53
3.5.3. Caserones	54
3.5.4. Túneles.....	56
3.5.5. Soporte.....	57

3.6.	Resumen.....	61
4.	Análisis estadístico de la base de datos	62
4.1.	Filtro de la base de datos.....	62
4.1.2.	Base de datos completa.....	62
4.1.3.	Base de datos excluyendo la mina 6	63
4.1.4.	Base de datos de minas chilenas excluyendo la mina 6.....	65
4.2.	Análisis de la base de datos.....	66
4.2.2.	Información general.....	66
4.2.3.	Tensor de esfuerzos	67
4.2.4.	Esfuerzos principales	70
4.3.	Comentarios Finales.....	73
5.	modelo de esfuerzos in situ.....	74
5.1.	Análisis preliminar	74
5.1.1.	Criterio de Mohr-Coulomb:	74
5.1.2.	Primer Invariante:	75
5.1.3.	Razón de esfuerzos b	76
5.2.	Modelo	78
5.2.1.	Definición de los modelos	78
5.2.2.	Resultados para las alternativas	79
5.3.	Ajuste del modelo en otras bases de datos	83
5.3.1.	Mina 6.....	83
5.3.2.	Minas Canadienses	89
5.4.	Comparación con otros modelos.....	94
5.4.1.	Minas Chilenas	94
5.4.2.	Mina 6.....	100
5.4.3.	Minas canadienses	102
5.5.	Comentarios Finales.....	107
6.	Impacto de los esfuerzos in situ en el diseño minero subterráneo	108
6.1.	Pilares.....	108
6.2.	Caserones	110
6.3.	Túneles.....	111
6.4.	Tipo de Soporte	113
6.5.	Comentarios Finales.....	114
7.	Conclusionesy recomendaciones	116
8.	Referencias	119
ANEXO A	A-1

Orientaciones esfuerzos	A-1
ANEXO B.....	B-1
Esfuerzos Horizontales	B-1
ANEXO C.....	C-1
Tendencias Lineales en los Modelos	C-1
Base de Datos de minas chilenas	C-1
Base de Datos de la mina 6.....	C-7
Base de Datos de minas canadienses	C-14

Tablas

Tabla 2-1. Métodos para determinar esfuerzos. (Ljunggren, y otros 2003)	20
Tabla 2-2. Modelo lineal de los esfuerzos principales, Canadá (Arjang y Herget 1997).	27
Tabla 2-3. Modelo de esfuerzos principales, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).	32
Tabla 2-4. Modelo de esfuerzo lineal, Canadá (Udd 2006).	33
Tabla 2-5. Tensor de esfuerzo, Alemania.	38
Tabla 2-6. Razón de esfuerzo k y orientación para el esfuerzo horizontal máximo, China (Cai, y otros 2000).	41
Tabla 2-7. Modelo de esfuerzo In Situ, China (Cai, y otros 2000).	41
Tabla 2-8. Resumen de los esfuerzos principales.	43
Tabla 2-9. Resumen de los esfuerzos normales.	44
Tabla 3-1. Información de cada medición en base de datos.	47
Tabla 3-2. Modelos alternativos con sus características y restricciones.	52
Tabla 3-3. Parámetros a analizar en función de k para las diferentes estructuras mineras.	53
Tabla 3-4. Parámetros que se utilizan en el cálculo de la incidencia para los pilares.	53
Tabla 3-5. Dimisiones del caserón a utilizar.	55
Tabla 3-6. Características del material utilizado en el modelo lineal, caserón.	55
Tabla 3-7. Parámetros para los tres tipos de macizos rocosos (Hoek y Brown 1997).	57
Tabla 3-8. Tipos de rocas utilizados en el diseño de soporte.	59
Tabla 4-1. Número de datos base inicial.	62
Tabla 4-2. Datos eliminados por los tres filtros, primer análisis.	62
Tabla 4-3. Datos eliminados por los tres filtros, segundo análisis.	63
Tabla 4-4. Datos eliminados por los tres filtro, tercer análisis.	65
Tabla 4-5. Estadística de la profundidad.	67
Tabla 5-1. Rangos superior e inferior, restricción criterio de Mohr - Coulomb.....	78
Tabla 5-2. Rangos superior e inferior, restricción primer invariante de esfuerzos.....	78
Tabla 5-3. Rangos superior e inferior, restricción parámetro b	79
Tabla 5-4. Resultados de los diferentes modelos.....	79
Tabla 5-5. Tensor de Esfuerzo resultante del modelo optimizado con menor AIC.	79
Tabla 5-6. Restricciones para el modelo, mina 6.....	84

Tabla 5-7. Resultados de la optimización de los modelos para la mina 6.	84
Tabla 5-8. Modelo de esfuerzo para el modelo 4, mina 6.	85
Tabla 5-9. Restricciones para los modelos, minas canadienses.	89
Tabla 5-10. Resultados de la optimización de los modelos, minas canadienses.	90
Tabla 5-11. Tensor de esfuerzos para el modelo 6, minas canadienses.	90
Tabla 5-12. Modelos utilizados para la comparación del modelo de minas canadienses (McKinnon y Labrie 2006) (Udd 2006) (Arjang y Herget 1997) (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).	103
Tabla 5-13. Resumen de los modelos obtenidos.	107
Tabla Anexo A-1. Distribución minas por geografía.	A-2
Tabla Anexo B-1. Valores para los módulos de elasticidad de las orientaciones EW y NS.	B-2
Tabla Anexo C-1. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado.	C-1
Tabla Anexo C-2. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte.	C-2
Tabla Anexo C-3. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado.	C-7
Tabla Anexo C-4. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte, mina 6	C-8
Tabla Anexo C-5. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado, minas canadienses.	C-14
Tabla Anexo C-6. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte, minas canadienses.	C-14

Figuras

Figura 1-1. Estimación de los esfuerzos totales a partir de los esfuerzos In Situ (J. Vallejos 2013).	1
Figura 1-2. Factor A, B y C del método de estabilidad gráfico (Mathews, y otros 1981)	2
Figura 1-3. Gráfico de estabilidad (Madwesley y otros, 2001).	3
Figura 1-4. Relación entre la razón de esfuerzos k y los esfuerzos en la pared o techo (Madwesley y otros, 2001).	4
Figura 1-5. Fórmula para la estimación de los esfuerzos en pilares profundos (Coates 1981).	4
Figura 1-6. Fórmulas propuestas por Kirsch para conocer la distribución de los esfuerzos alrededor de una excavación (Kirsch 1898).	5
Figura 2-1. Componentes del tensor de esfuerzos en tres dimensiones en un sistema coordenado cartesiano.	7
Figura 2-2. Tipos de esfuerzos. (Hudson, Cornet y Christiansson 2003)	9
Figura 2-3. Esfuerzo vertical (Brown y Hoek 1978).	10
Figura 2-4. Diagrama del efecto de la erosión en la altura.	12
Figura 2-5. Relación entre la razón de esfuerzos $[k_{\text{Erosión}}/k_{\text{Sin Erosión}}]$ y la razón entre la altura erosionada y original $[\Delta H/H]$	13
Figura 2-6. Orientación del esfuerzo horizontal mayor en América del Sur (Heidbach, y otros 2008)	14
Figura 2-7. Razón de esfuerzos k en función de la profundidad (Brown y Hoek 1978).	15

Figura 2-8. Placas tectónicas, Fuente: http://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html	16
Figura 2-9. Interacción entre la placa de Nazca y Sudamericana. Fuente: http://www.predes.org.pe/index.html	17
Figura 2-10. Mecanismo Focal NF, falla normal (Heidbach, y otros 2008).	17
Figura 2-11. Mecanismo Focal NS, falla normal con componente de falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008)	17
Figura 2-12. Mecanismo Focal SS, falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008).	18
Figura 2-13. Mecanismo Focal TS, falla inversa con componente de falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008).	18
Figura 2-14. Mecanismo Focal TF, falla inversa (Heidbach, y otros 2008).	18
Figura 2-15. Histograma de la razón de esfuerzos b para cada tipo de falla (Lisle, y otros 2006).	19
Figura 2-16. Frecuencia del parámetro b para distintos mecanismos focales (Heidbach, y otros 2008).	20
Figura 2-17. Celda utilizada en el método Hollow Inclusion Cell (Duncan y Pender 1980).	21
Figura 2-18. Procedimiento de la medición de esfuerzos mediante la celda CSIRO Hollow Inclusion (Ljunggren, y otros 2003).	21
Figura 2-19. Ensayo Biaxial realizado al testigo sobre perforado.	22
Figura 2-20. (a) Zonas de donde provienen las mediciones de esfuerzos In Situ, (b) Histograma de la profundidad de las mediciones de esfuerzos In Situ (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).	24
Figura 2-21. Resultados de las correlaciones entre los esfuerzos principales y la profundidad (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).	25
Figura 2-22. Orientación esfuerzo principal mayor para cada dominio (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).	26
Figura 2-23. Orientación esfuerzo principal menor en cada dominio (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).	26
Figura 2-24. Modelo lineales establecidos para los esfuerzos (a) principales y (b) vertical, Canadá (Arjang y Herget 1997).	27
Figura 2-25. (a) Razón de esfuerzos $k_{m\acute{a}x}$, (b) Razón de esfuerzos $k_{m\acute{i}n}$, Canadá (Arjang y Herget 1997).	28
Figura 2-26. Orientación esfuerzo principal (a) mayor, (b) intermedio y (c) menor, Canadá (Arjang y Herget 1997).	28
Figura 2-27. Esfuerzo principal mayor para las mediciones de toda la región y las realizadas en la mina, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).	29
Figura 2-28. Interpretación alternativa de los esfuerzos principales (a) mayor y (b) intermedio (McKinnon y Labrie 2006).	30
Figura 2-29. Esquema del efecto producido en los esfuerzos asumiendo que el macizo a gran escala va cediendo (McKinnon y Labrie 2006).	31
Figura 2-30. Modelo lineal para el esfuerzo principal intermedio, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).	31
Figura 2-31. Relaciones (a) logarítmicas y (b) lineales para los esfuerzos principales y el esfuerzo vertical, Canadá (Udd 2006).	32

Figura 2-32. Esfuerzo vertical, Chile (Chacón 1988).	33
Figura 2-33. Esfuerzo horizontal, Chile (Chacón 1988).	34
Figura 2-34. Orientación esfuerzo principal mayor, El Teniente (Windsor, y otros 2006).	35
Figura 2-35. Orientación esfuerzos principales para (a) tres sitios de medición (b) un sitio de medición, El Teniente (Windsor, y otros 2006).	36
Figura 2-36. Orientación de esfuerzos horizontal máximo, Alemania (Brudy, y otros 1997).	37
Figura 2-37. Magnitudes de los esfuerzos horizontales, Alemania (Brudy, y otros 1997).	38
Figura 2-38. Orientación del esfuerzo horizontal máximo en el este de Australia (Hillis, Enever y Reynolds 1999).	39
Figura 2-39. Ubicación de las minas analizadas, China (Cai, y otros 2000).	40
Figura 2-40. Lugar geográfico donde se realizan las mediciones, Estados Unidos (Zoback y Healy 1992).	42
Figura 2-41. Esfuerzos horizontales en función de la profundidad, Estados Unidos (Zoback y Healy 1992).	43
Figura 2-42. Esfuerzos principales (a) mayor, (b) intermedio y (c) menor.	45
Figura 2-43. Esfuerzos (a) horizontal máximo, (b) horizontal mínimo y (c) vertical.	46
Figura 3-1. Convención para los esfuerzos.	48
Figura 3-2. Explicación de la elección del rango para la razón de esfuerzos b.	51
Figura 3-3. Representación de los parámetros para pilares profundos según la fórmula de Coates (1981).	53
Figura 3-4. Representación de ELOS (Geoffrey, 2009).	55
Figura 3-5. Representación de los parámetros de la función para la excavación circular. (J. Vallejos 2013).	56
Figura 3-6. Relación entre la condición de la roca y el SRF.	57
Figura 3-7. Relación entre SRF y el UCS/ σ_1 (J. Vallejos 2013).	58
Figura 3-8. Tipos de rocas dependiendo del valor del GSI.	59
Figura 3-9. Tipo de soporte (Grimstad y Barton 1993).	59
Figura 3-10. Definición del Span.	60
Figura 3-11. Diagrama de la metodología utilizada.	61
Figura 4-1. Regresión sigma V y profundidad, primer análisis.	63
Figura 4-2. Regresión sigma V vs profundidad, segundo análisis.	64
Figura 4-3. Regresión esfuerzos horizontales vs profundidad, segundo análisis.	64
Figura 4-4. Regresión sigma V y profundidad con filtro, tercer análisis.	65
Figura 4-5. Regresión esfuerzos horizontales vs profundidad, tercer análisis.	66
Figura 4-6. Histograma profundidad.	66
Figura 4-7. Distribución de minas en la base de datos.	67
Figura 4-8. Regresión lineal entre esfuerzos normales y profundidad. (a) esfuerzo horizontal EW, (b) esfuerzos horizontal NS y (c) esfuerzo vertical V.	69
Figura 4-9. Regresión lineal entre esfuerzos de corte y profundidad. (a) EW/NS, (b) EW/V y (c) NS/V.	70
Figura 4-10. Regresión lineal entre esfuerzos principales y profundidad (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.	72

Figura 4-11. Orientación esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.	72
Figura 4-12. Frecuencia de los azimut esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.	73
Figura 5-1. Relación de Morh-Coulomb, esfuerzos principales.	74
Figura 5-2. Regresión lineal (a) primer invariante, (b) segundo invariante y (c) tercer invariante de esfuerzo.	76
Figura 5-3. Histograma de la razón de esfuerzos b.	76
Figura 5-4. Histograma que compara los regímenes tectónicos (SS, TF y TS) (Heidbach, y otros 2008) y la base de datos.	77
Figura 5-5. Tendencia lineal del parámetro b en función de la profundidad.	78
Figura 5-6. Tendencia del esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor versus profundidad, seis modelos.	81
Figura 5-7. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos.	82
Figura 5-8. Orientación esfuerzos (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor, modelo elegido.	83
Figura 5-9. Regresión lineal del esfuerzo vertical y la profundidad, mina 6.	84
Figura 5-10. Tendencia para el esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor para los 6 modelos, mina 6.	86
Figura 5-11. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos, mina 6.	88
Figura 5-12. Orientación esfuerzos principales Mina 6. (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.	88
Figura 5-13. Tendencia esfuerzo vertical para los 6 modelos, minas canadienses.	89
Figura 5-14. Tendencia para el esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor para los 6 modelos, minas canadienses.	91
Figura 5-15. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos, minas canadienses.	93
Figura 5-16. Orientación esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor, minas canadienses.	93
Figura 5-17. Comparación para el esfuerzo vertical, minas chilenas.	95
Figura 5-18. Comparación para el esfuerzo horizontal máximo, minas chilenas.	95
Figura 5-19. Comparación para el esfuerzo horizontal máximo solo ecuaciones lineales, minas chilenas.	96
Figura 5-20. Comparación esfuerzo horizontal mínimo, minas chilenas.	96
Figura 5-21. Comparación razón $k_{\text{máx}}$, minas chilenas.	97
Figura 5-22. Comparación razón $k_{\text{mín}}$, minas chilenas.	97
Figura 5-23. Comparación del parámetro b, minas chilenas.	98
Figura 5-24. Comparación parámetro b y mecanismos focales, minas chilenas.	99
Figura 5-25. Comparación de los criterios de Mohr - Coulomb, minas chilenas.	99
Figura 5-26. Comparación del primer invariante de esfuerzos, minas chilenas.	100

Figura 5-27. Comparación esfuerzos principales, mina 6.	101
Figura 5-28. Comparación esfuerzo vertical, mina 6.	102
Figura 5-29. Comparación esfuerzo principal menor, minas canadienses.	104
Figura 5-30. Comparación esfuerzo vertical, minas canadienses.	105
Figura 5-31. Comparación de la primera invariante de esfuerzos, minas canadienses.	105
Figura 5-32. Comparación del criterio de Mohr-Coulomb, minas canadienses.	106
Figura 5-33. Comparación parámetro b, minas canadienses.	106
Figura 6-1. Relación entre S_p/S_v y la razón k para diferentes h/L, pilares.	108
Figura 6-2. Relación entre el S_p/S_v y la razón k para distintos r, pilares.	109
Figura 6-3. Relación entre el S_p/S_v y la razón k para distintos E_{rm}/E_{pm} , minas chilenas.	109
Figura 6-4. Modelo Phase2, caserones.	110
Figura 6-5. Relación entre el ELOS y la razón k, caserón.	111
Figura 6-6. Relación entre la zona de fractura y la razón k para diferentes macizos rocosos, túnel.	111
Figura 6-7. Relación entre la zona de fractura y la razón k solo los mejores macizos, túnel.	112
Figura 6-8. Relación entre la zona fracturada y la razón k para diferentes S_v/S_c , túnel.	112
Figura 6-9. Relación entre el SRF y la razón de esfuerzos k para diferentes profundidades, soporte.	113
Se aprecia en la Figura 6-9 que en zonas más superficiales el efecto del k en el SRF se pospone a valores de k mayores y que aumenta de manera lineal con un alto gradiente. Los valores finales representan a macizos rocosos de mala calidad donde los estallidos de roca pasan comúnmente según la Figura 6-10.	113
Figura 6-11. Relación entre el tipo de soporte y la razón de esfuerzos k, soporte.	114
En el caso del macizo rocoso de mala calidad, el espaciamiento es alto y se utiliza un grosor de shotcrete de que empieza desde los 90 [mm] hasta el máximo valor de la Figura 6-12. Para razones de esfuerzos mayores a 3 no existen resultados ya que quedan fuera de los rangos de la Figura 6-13.	114
Para el macizo rocoso de calidad regular, el espectro de valores para el grosor del shotcrete varía por todos los valores posibles, mientras que el espaciamiento de los pernos varía, pero de manera más estable. Luego del $k = 5,5$ no existen resultados, ya que quedan fuera del rango de la Figura 6-14.	114
Figura Anexo A-1. Tendencias del azimut con respecto a la profundidad.	A-1
Figura anexo A-2. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, desde norte al sur, Sigma 1.	A-2
Figura Anexo A-3. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 1.	A-2
Figura Anexo A-4. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de norte a sur, Sigma 2. A-3	3
Figura Anexo A-5. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 2.	A-3
Figura Anexo A-6. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de norte a sur, Sigma 3. A-4	4

Figura Anexo A-7. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 3.	A-4
Figura Anexo B-1. Tendencia de razón entre los esfuerzos horizontales con respecto a la profundidad.	B-1
Figura Anexo B-2. Histograma de la razón de esfuerzos horizontales.	B-2
Figura Anexo B-3. Razón de esfuerzos k_{EW} versus profundidad.	B-3
Figura Anexo B-4. Razón de esfuerzos k_{NS} versus profundidad.	B-3
Figura Anexo C-1. Esfuerzo de corte EW/NS para los 6 modelos.	C-2
Figura Anexo C-2. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos.	C-3
Figura Anexo C-3. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos.	C-3
Figura Anexo C-4. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos.	C-4
Figura Anexo C-5. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos.	C-4
Figura Anexo C-6. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos.	C-5
Figura Anexo C-7. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos.	C-5
Figura Anexo C-8. Histograma parámetro b de los 6 modelos más los mecanismo focales.	C-6
Figura Anexo C-9. Relaciones lineales del parámetro b con la profundidad para los 6 modelos. C-7	
Figura Anexo C-10. Esfuerzo de corte EW/NS para los 6 modelos, mina 6.	C-9
Figura Anexo C-11. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos, mina 6.	C-9
Figura Anexo C-12. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos, mina 6.	C-10
Figura Anexo C-13. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos, mina 6.	C-10
Figura Anexo C-14. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos, mina 6.	C-11
Figura Anexo C-15. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos, mina 6.	C-11
Figura Anexo C-16. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos, mina 6.	C-12
Figura Anexo C-17. Histograma razón de esfuerzos b de los 6 modelos más los mecanismo focales, mina 6.	C-12
Figura Anexo C-18. Relaciones lineales de la razón de esfuerzos b con la profundidad para los 6 modelos, mina 6.	C-13
Figura Anexo C-19. Esfuerzo de corte EW/NS para los 6 modelos, minas canadienses.	C-15
Figura Anexo C-20. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos, minas canadienses.	C-15
Figura Anexo C-21. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos, minas canadienses.	C-16
Figura Anexo C-22. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos, minas canadienses.	C-16
Figura Anexo C-23. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos, minas canadienses.	C-17
Figura Anexo C-24. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos, minas canadienses. .	C-17
Figura Anexo C-25. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos, minas canadienses.	C-18
Figura Anexo C-26. Histograma parámetro b de los 6 modelos más los mecanismo focales, minas canadienses.	C-18
Figura Anexo C-27. Relaciones lineales del parámetro b con la profundidad para los 6 modelos, minas canadienses.	C-19

1. INTRODUCCIÓN

La minería ha evolucionado constantemente a través de la historia, en particular la minería subterránea se ha desarrollado gracias al mayor conocimiento del comportamiento del macizo rocoso. Esto ha permitido la extracción de recursos minerales en condiciones que habrían sido desfavorables en tiempos anteriores.

Los esfuerzos in situ son una de las condiciones iniciales más importante para estimar los esfuerzos totales que pueden desarrollarse en una obra de ingeniería de rocas, tales como: cavernas, pilares, excavaciones, etc. (Figura 1-1). Por esto resulta fundamental conocer la orientación y magnitud de los esfuerzos in situ para establecer diseños más seguros y eficientes, obteniendo mejores recuperaciones y menores riesgo en el diseño establecido.

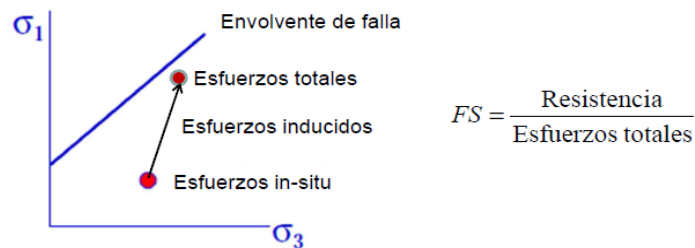


Figura 1-1. Estimación de los esfuerzos totales a partir de los esfuerzos In Situ (J. Vallejos 2013).

Desde el punto de vista del diseño de minas subterráneas, se puede decir que el dimensionamiento de la infraestructura y excavaciones mineras es un aspecto clave para obtener buenas recuperaciones y minas seguras, tanto para el personal, como para los equipos y el negocio minero. Asociados a estos conceptos, los esfuerzos in situ son una parte necesaria para realizar el diseño de las labores mencionadas, ya que son la condición inicial que presenta el material con el cual se está trabajando.

Como parte de la introducción se presentan distintas estructuras mineras que en su diseño incorporan la información asociada a los esfuerzos In Situ.

1.1 Estructuras Mineras

1.1.1 Diseño de Caserones

Para el diseño de caserones se utilizan varios métodos, dependiendo de la seguridad que se le quiera dar a éstos. Por ejemplo, se presenta en el método empírico de estabilidad gráfico de Mathews (1981) y Potvin (1988) usado para el diseño de caserones sin entrada de personal. Este gráfico fue modificado posteriormente por Mawdesley y otros (2001) quienes recopilan más de 400 casos de caserones estables y con falla, permitiendo actualizar las fronteras de estabilidad para este tipo de unidad básica de explotación.

El método, tanto de Mathews (1981) y Potvin (1988) como de Mawdesley y Otros (2001), utilizan un serie de factores de diseño y calidad del macizo rocoso que multiplicados resultan en un número de estabilidad N' (Potvin 1988). El valor del número N' depende de diferentes parámetros que se presentan a continuación.

Ecuación 1-1. Número N', diseño de caserones (Potvin 1988).

$$N' = Q' * A * B * C \tag{1}$$

Los factores son los siguientes:

- Q': Índice Q de Barton modificado (Barton, Lien y Lunde 1974).
- A: Factor de esfuerzos.
- B: Factor de orientación de discontinuidades.
- C: Factor de ajuste por gravedad.

Los esfuerzos totales se incluyen en la metodología de diseño mediante el factor A que se muestra a continuación.

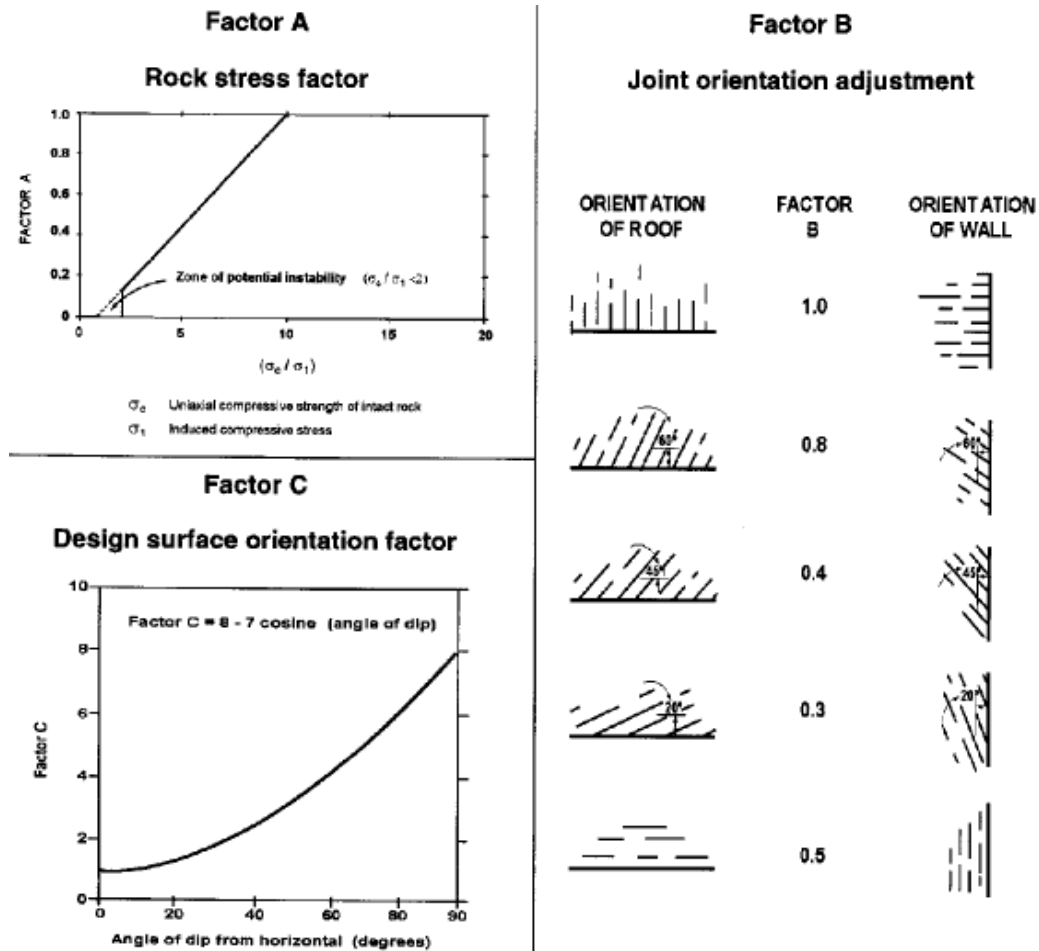


Figura 1-2. Factor A, B y C del método de estabilidad gráfico (Mathews, y otros 1981)

Como se presenta en la Figura 1-2 el sigma máximo corresponde al esfuerzo principal mayor evaluado en el centro de la pared de interés. Al aumentar el valor del esfuerzo máximo para cada pared, teniendo un mismo UCS, se obtienen un valor menor para el factor A, produciendo una disminución en el valor del parámetro N'.

El número de estabilidad complementado con el radio hidráulico, definido como la razón entre el área y el perímetro (1), entrega a partir de un gráfico de estabilidad (Figura 1-3) la condición de estabilidad del caserón.

$$R [m] = \frac{A [m^2]}{P [m]} \quad (2)$$

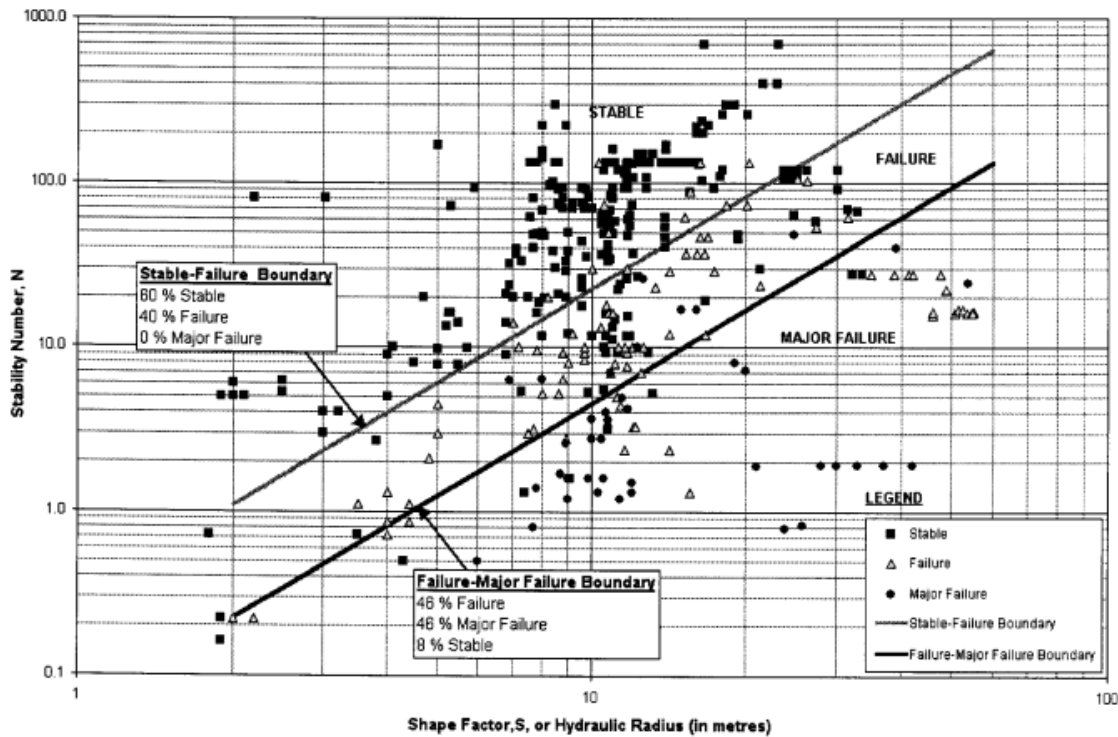


Figura 1-3. Gráfico de estabilidad (Madwesley y otros, 2001).

Se muestra en la Figura 1-3 las fronteras de estabilidad, se aprecia tres estados: estable, falla y falla mayor.

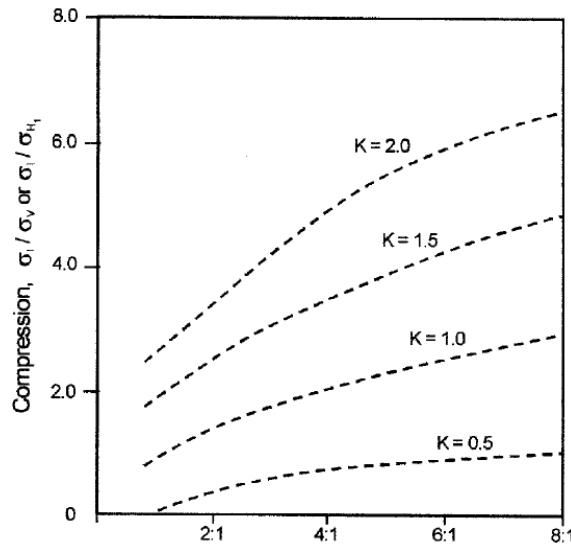


Figura 1-4. Relación entre la razón de esfuerzos k y los esfuerzos en la pared o techo (Madwesley y otros, 2001).

Como se aprecia en la Figura 1-3 si aumenta el N' se tiene la posibilidad de tener caserones estables con un radio hidráulico mayor.

1.1.2. Diseño de pilares profundos

En el diseño de pilares profundos, donde la profundidad es significativamente mayor al ancho de los paneles de pilares, se produce la desviación del esfuerzo vertical a los borde del yacimiento. Para incorporar este efecto en el diseño de pilares se utiliza la fórmula propuesta por Coates (1981). En esta metodología, los esfuerzos in situ son incorporados en el diseño mediante la razón de esfuerzos horizontales y verticales $k = \sigma_h / \sigma_v$. La Figura 1-5 presenta la fórmula de estimación:

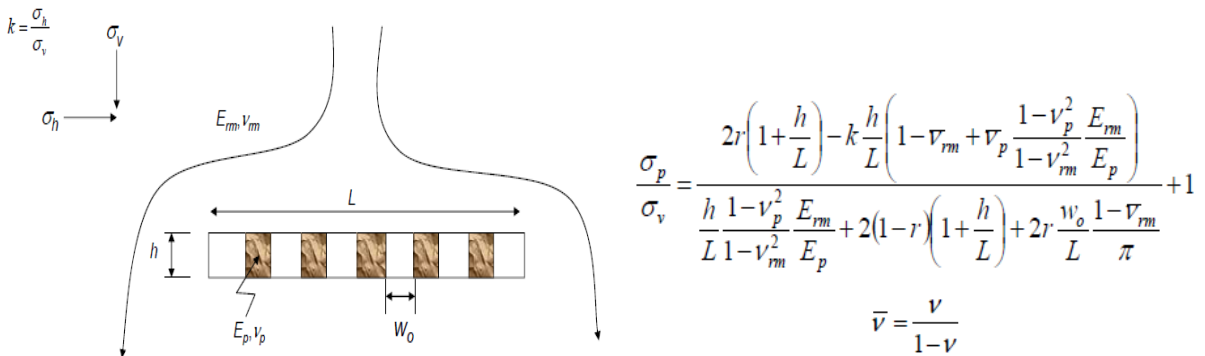


Figura 1-5. Fórmula para la estimación de los esfuerzos en pilares profundos (Coates 1981).

Donde:

- h: Es la altura del pilar [m]
- L: Extensión lateral del yacimiento [m]
- k: Razón entre esfuerzos horizontales y verticales

- E: Módulo de Young [GPa]
- ν : Módulo de Poisson
- r: Razón de extracción que depende del ancho de las calles y las dimensiones de los pilares
- w_0 : Ancho de excavación [m]
- σ_p : esfuerzo sobre el pilar [MPa]

Según la fórmula de la Figura 1-5 se aprecia que cuando aumenta la razón de esfuerzos in-situ k también aumenta la razón entre la carga sobre el pilar y el esfuerzo vertical.

1.1.3. Esfuerzos totales alrededor de una excavación

En este caso se utilizan las fórmulas de Kirsch (1898), para analizar la relación más simple, correspondiente a una excavación circular de dos dimensiones inserta en un medio continuo, isótropo, lineal, elástico. En este caso, se relaciona el esfuerzo in-situ vertical y horizontal de la siguiente forma:

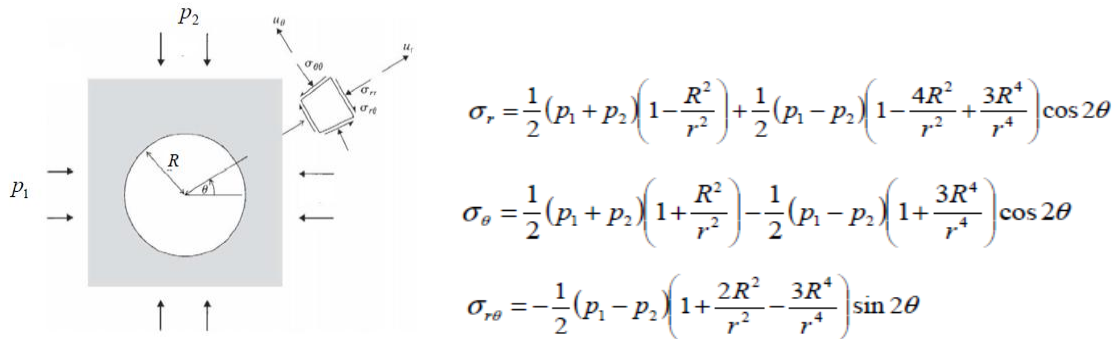


Figura 1-6. Fórmulas propuestas por Kirsch para conocer la distribución de los esfuerzos alrededor de una excavación (Kirsch 1898).

Se aprecia que los esfuerzos In-Situ son la base de los esfuerzos totales. La fórmula presenta los esfuerzos p_1 y p_2 como los esfuerzos in situ, estos se relacionan de manera lineal con los esfuerzos resultantes.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en desarrollar una metodología de análisis que permita establecer estadísticamente un modelo representativo de mediciones de esfuerzos in-situ en función de la profundidad.

Entre los objetivos específicos del trabajo se destacan:

- Recolectar una base de datos estandarizada de mediciones de esfuerzos en Chile.
- Establecer la influencia del movimiento tectónico en los resultados de mediciones de esfuerzos in-situ en Chile.
- Establecer un modelo estadístico que permita estimar el tensor de esfuerzos in-situ representativo de las condiciones geográficas y geológicas chilenas.

- Evaluar el impacto de los esfuerzos in-situ en el diseño minero subterráneo de pilares, caserones, excavaciones y el tipo de soporte requerido en galerías..

1.3. Alcances

Las mediciones de esfuerzos in-situ en roca son rara vez uniformes y su distribución depende de un número de factores tales como: complejidades del macizo rocoso (heterogeneidad, fábrica, discontinuidades, etc.) y el historial de carga al cual el macizo rocoso ha sido sometido (actividad tectónica, erosión o glaciación). El resultado es que las mediciones de esfuerzos in-situ locales pueden no representar correctamente el estado de esfuerzos promedio.

Si bien se realizan filtros estadísticos básicos, una exclusión rigurosa de todos los datos sospechosos de la base de datos representa una tarea onerosa que podría terminar en una base de datos insuficiente para la determinación estadística de tendencias. Consecuentemente, los datos son aceptados de la manera que fueron entregados inicialmente, con la expectativa que los errores se encuentren distribuidos de tal manera que las tendencias promedios derivadas de la base de datos son representativas de las tendencias actuales. Esta metodología es apropiada para estudios de pre-factibilidad por lo que se necesitan de mediciones locales y específicas del sitio para verificar y validar las tendencias promedios.

La base de datos en lo que se fundamenta el trabajo está establecida por mediciones de diferentes faenas en Chile y por lo tanto el modelo se ajusta a estos valores y queda definido para el territorio chileno. Cabe destacar, que el ajuste se acota a las profundidades que están establecidas por las mediciones obtenidas entre el rango 150 - 950 [m] .

El estudio del impacto de los esfuerzos In Situ en las infraestructuras mineras considera las relaciones analíticas disponibles de la literatura (ver sección de Metodología). Se evalúa la dependencia de estas fórmulas con los esfuerzos in-situ, sin embargo, no se establecen mayores relaciones con respecto a la estabilidad o seguridad de las estructuras mineras, es decir, no se cuantifica el factor de seguridad de estas.

2. ANTECEDENTES

A continuación se presentan los antecedentes comenzando con una introducción que caracteriza los esfuerzos en excavaciones mineras y como se miden. Se evalúan y analizan los estudios realizados con respecto a los esfuerzos in situ en otros lugares del mundo.

2.1. Definición de esfuerzo

Los esfuerzos son fundamentales en el diseño de excavaciones subterráneas, tanto civiles como mineras. El esfuerzo está definido como fuerza por unidad de área y su unidad de medición son los MPa (3).

$$1[MPa] = 145.04 [psi] = 10.197 \left[\frac{kg - fuerza}{cm^2} \right] \quad (3)$$

Los esfuerzos en tres dimensiones quedan determinados por esfuerzos normales y de corte, sumando un total de 9 componentes. Éstos están definidos en planos y direcciones cartesianas de la siguiente forma, cabe destacar que la convención que se presenta toma como esfuerzo positiva al esfuerzo compresivo.

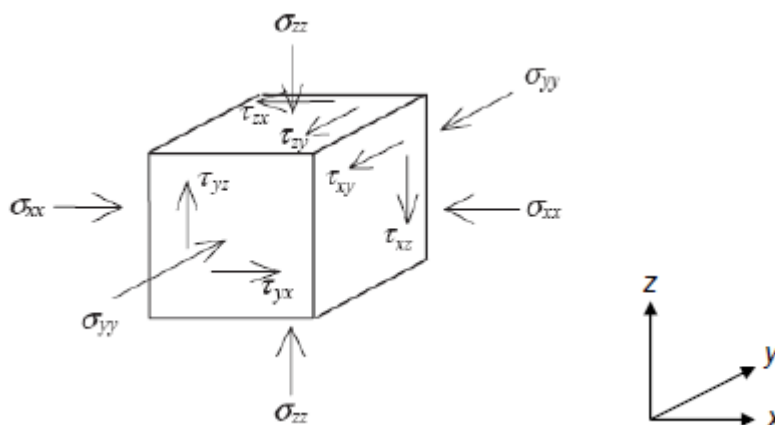


Figura 2-1. Componentes del tensor de esfuerzos en tres dimensiones en un sistema coordenado cartesiano.

Los esfuerzos pueden ser descritos mediante el tensor de esfuerzos (4), el cual reúne todas sus componentes dependiendo de su plano y dirección.

$$[\Pi] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde:

- σ_{ii} : Esfuerzos normales en el plano normal al eje i
- τ_{ij} : Esfuerzos de corte en el plano normal al eje i en la dirección j

Donde i o j puede representar al eje x , y , z .

Cuando el cuerpo se encuentra en equilibrio el tensor queda simétrico ya que los momentos quedan en equilibrio, por lo que la cantidad de elementos se reduce a 6: 3 esfuerzos normales y 3 esfuerzos de corte.

El tensor de esfuerzos es posible someterlo a rotaciones de manera de encontrar un sistema coordinado donde los esfuerzos de corte son nulos. Este tensor define a los esfuerzos principales.

Para obtener la magnitud de los esfuerzos principales se buscan los valores propios, λ , del tensor de esfuerzos, según la ecuación (5):

$$\det(\Pi - \lambda I) = 0 \quad (5)$$

Donde I , corresponde a la matriz identidad. Al resolver esta ecuación se obtiene el polinomio característico.

$$\lambda^3 + I_3 * \lambda^2 + I_2 * \lambda + I_1 = 0 \quad (6)$$

Donde I_i , $i=1, 2, 3$, representan a los invariantes de esfuerzos

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (7)$$

$$I_2 = \sigma_{xx} * \sigma_{yy} + \sigma_{yy} * \sigma_{zz} + \sigma_{zz} * \sigma_{xx} - (\tau_{xy}^2 * \tau_{xz}^2 * \tau_{yz}^2) \quad (8)$$

$$I_3 = \sigma_{xx} * \sigma_{yy} * \sigma_{zz} + 2 * (\tau_{xy} * \tau_{xz} * \tau_{yz}) - (\sigma_{xx} * \tau_{yz}^2 + \sigma_{yy} * \tau_{xz}^2 + \sigma_{zz} * \tau_{xy}^2) \quad (9)$$

Resolviendo el polinomio, obviando la solución no trivial, se obtienen las magnitudes de los esfuerzos principales.

Posteriormente, se calculan los vectores propios para cada valor propio, lo que permite obtener la orientación del esfuerzo principal.

$$(\Pi - \lambda_i I)v = 0 \quad (10)$$

Donde v es el vector propio, que contiene a los cosenos directores para la orientación del esfuerzo principal λ_i . Resolviendo esta ecuación se obtiene un sistema de 3 ecuaciones con lo cual se pueden obtener los cosenos directores.

2.2. Tipos de esfuerzos

Los esfuerzos se pueden dividir en esfuerzos in situ e inducidos (Figura 2-2). Los primeros se relacionan a las condiciones preexistentes en el macizo rocoso, mientras que los esfuerzos inducidos son aquellos que se originan producto de las excavaciones. Los esfuerzos In situ dependen del esfuerzo gravitacional y tectónico.

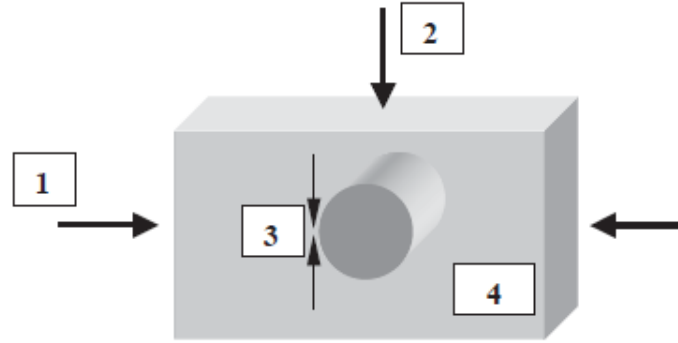


Figura 2-2. Tipos de esfuerzos. (Hudson, Cornet y Christiansson 2003)

Donde el autor define:

- 1: Esfuerzos Tectónico.
- 2: Esfuerzos Gravitacional.
- 3: Esfuerzo Local, esfuerzo de campo cercano, esfuerzo inducido.
- 4: Esfuerzo Residual, esfuerzo termal.

El esfuerzo tectónico depende de los movimientos de las placas tectónicas.

2.3. Esfuerzo vertical

El esfuerzo gravitacional o vertical, σ_v , generalmente es el resultado del peso de la columna de roca por unidad de área sobre el lugar de medición, relacionándose de la siguiente manera:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho g dz \quad (11)$$

Donde ρ es la densidad de la roca [kg/cm^3], g es la aceleración de gravedad [m/s^2] y z es la profundidad [m], quedando el esfuerzo vertical en [MPa]. Los datos de la Figura 2-3 presentados por Hoek y Brown (1978) son generalmente consistentes con el supuesto de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

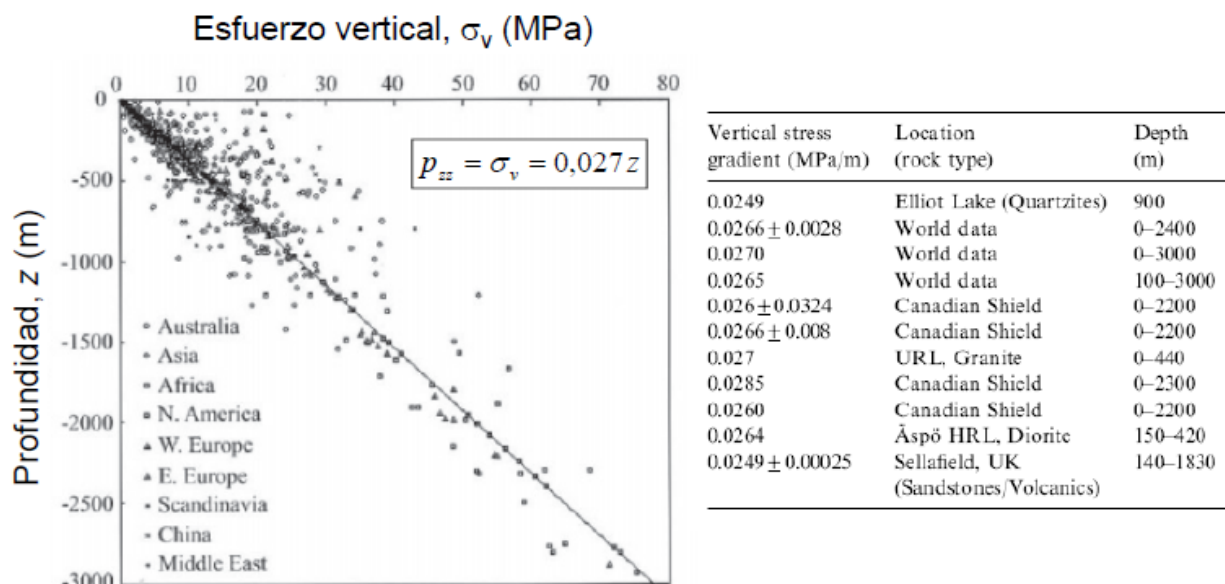


Figura 2-3. Esfuerzo vertical (Brown y Hoek 1978).

Se han observado valores para el esfuerzo vertical que difieren de esta fórmula (Martin y Chandler 1993) (Gaviglio, y otros 1990), estas desviaciones se pueden atribuir a una diversidad de efectos, entre otros, la topografía, esfuerzos inducidos, procesos geológicos, erosión, tectonismo.

2.4. Esfuerzo horizontal

El esfuerzo horizontal es mucho más complejo y depende de más factores como las condiciones de borde y las propiedades de la roca, como describen diferentes autores (Herget 1988) (Amadei y Stephansson 1977). Se define la razón de esfuerzo horizontal y vertical, que permite dimensionar el esfuerzo horizontal a partir del vertical.

$$k = \sigma_h / \sigma_v \quad (12)$$

La razón k de esfuerzos contempla valores que varían entre 0 a 5.5 según estudios empíricos (Brown y Hoek 1978) y depende de la profundidad. Los valores mayores a 3 están asociados al proceso de erosión en la capa más superficial de la corteza terrestre, además de otros factores como composición de la roca y tectonismo (Sen y Sadagah 2002). A menor profundidad el k es mayor, por otro lado, cuando aumenta la profundidad, el esfuerzo vertical aumenta hasta igualar al esfuerzo horizontal adquiriendo valores de k cercanos a 1.

Dentro de la literatura se tiene que la razón de esfuerzos k depende de varios factores que no están asociados solo a los esfuerzos verticales y horizontales, entre estos se encuentra la topografía y la composición de la roca (Sen y Sadagah 2002). Sin embargo, existen diferentes aproximaciones de esta variable, por ejemplo, la fórmula obtenida por Sheorey (1994), que relaciona el esfuerzo k con el módulo de deformación E_h de la corteza terrestre y la profundidad.

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right) \quad (13)$$

Donde:

- z : profundidad [m]
- E_h : módulo de deformación horizontal de la corteza terrestre [GPa]

Cabe destacar que el análisis se basa en una relación de esfuerzo-deformación elasto-plástica para una superficie transversalmente isótropa. Por lo que a toda profundidad se tienen valores en la dirección vertical, transversal a la orientación de la estratificación, y paralelo a la orientación de la estratificación.

El autor (Sheorey 1994) menciona que la razón de esfuerzos k es mayor cuando se está cerca a la superficie (esto por la curvatura de la tierra y los efectos de la temperatura y la presión), además concluye que el módulo de deformación influye de manera significativa en la razón de esfuerzos.

Es posible estimar el esfuerzo horizontal mediante relaciones esfuerzo-deformación (Ley de Hooke) del tipo lineales para un medio elástico.

$$\epsilon_{ii} = \frac{1}{E} [\sigma_{ii} - \nu(\sigma_{jj} + \sigma_{kk})] \quad (14)$$

Donde:

- E : Módulo de deformación
- ν : Razón de Poisson
- σ_{ii} : Esfuerzos normales en el plano normal al eje i
- ϵ_{ii} : Deformaciones normales en el plano normal al eje i

A continuación se presentan tres casos de aplicación de las relaciones esfuerzo-deformación a la estimación de esfuerzos in-situ.

El primer caso, corresponde a un depósito sedimentario, que no ha sufrido procesos de erosión o tectonismo. Debido al proceso de depositación es razonable asumir que la deformación horizontal es cero en comparación a la vertical y además se toma como supuesto el que los dos esfuerzos horizontales son iguales, obteniendo las siguientes relaciones.

$$\epsilon_h = 0 = \frac{1}{E} [\sigma_h - \nu(\sigma_h + \sigma_v)]$$

$$\sigma_h = \nu(\sigma_h + \sigma_v)$$

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \nu \left(\frac{\sigma_h}{\sigma_v} + 1 \right)$$

Remplazando las razones de esfuerzos por k .

$$k = \nu(k + 1)$$

$$k = \frac{\nu}{(1 - \nu)}$$

Para un valor de ν de 0,25 el valor de k corresponde a 0,33, mientras que para un valor de ν igual a 0,5 el valor de k corresponde a 1.

El segundo caso corresponde a efecto de la erosión en el valor de k , se toma la relación obtenida anteriormente y se analiza el siguiente caso.

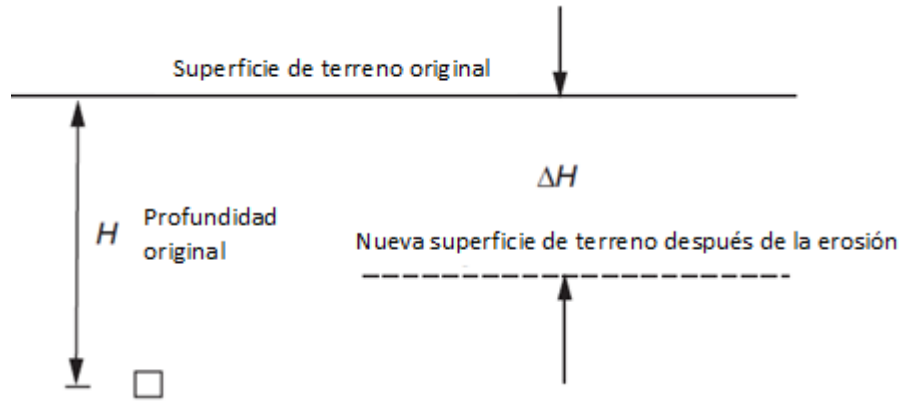


Figura 2-4. Diagrama del efecto de la erosión en la altura.

En el caso inicial los esfuerzos son los siguientes.

$$\sigma_v^i = \gamma H$$

$$\sigma_h^i = k * \sigma_v^i = \frac{\nu}{(1 - \nu)} * \gamma H$$

Cuando se produce la erosión se tiene el siguiente caso final, cabe destacar que se toma como supuesto que el esfuerzo horizontal es el mismo que en el caso anterior.

$$\sigma_v^f = \gamma(H - \Delta H)$$

$$\sigma_h^f = k * \sigma_v^f = \frac{\nu}{(1 - \nu)} * \gamma H$$

Obteniendo la siguiente razón k .

$$k^f = \frac{\sigma_h^f}{\sigma_v^f} = \frac{\frac{\nu}{(1 - \nu)} * \gamma H}{\gamma(H - \Delta H)} = \frac{\nu}{(1 - \nu)} * \frac{H}{H - \Delta H}$$

$$k^f = \frac{\nu}{(1 - \nu)} * \frac{1}{1 - \frac{\Delta H}{H}}$$

Se aprecia que el valor de la razón de esfuerzos k depende de la altura erosionada. Si tomamos como valor de $\frac{\Delta H}{H}$ igual a 0,3 obtenemos que el valor de k varía desde 0,5 cuando el valor de ν es 0,25, mientras que cuando este aumenta a 0,5 el valor de k es de 1,4.

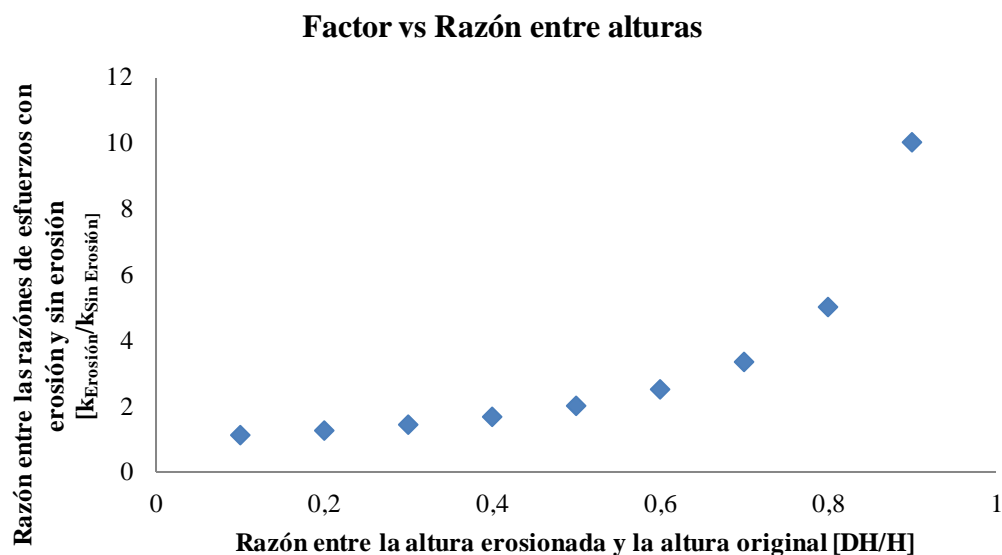


Figura 2-5. Relación entre la razón de esfuerzos $[k_{Erosión}/k_{Sin Erosión}]$ y la razón entre la altura erosionada y original $[\Delta H/H]$.

Se concluye que el efecto de la erosión aumenta el valor de la razón de esfuerzos k para un mismo valor de la razón de Poisson (ν). La Figura 2-5 muestra que la razón $[k_{Erosión}/k_{Sin Erosión}]$ aumenta de manera exponencial cuando aumenta la razón entre las alturas.

El tercer caso, corresponde al efecto del tectonismo en Chile. Se han realizado distintos estudios en el mundo para conocer la dirección del esfuerzo horizontal mayor. La siguiente figura presenta los resultados para el caso de América del Sur (Heidbach, y otros 2008).

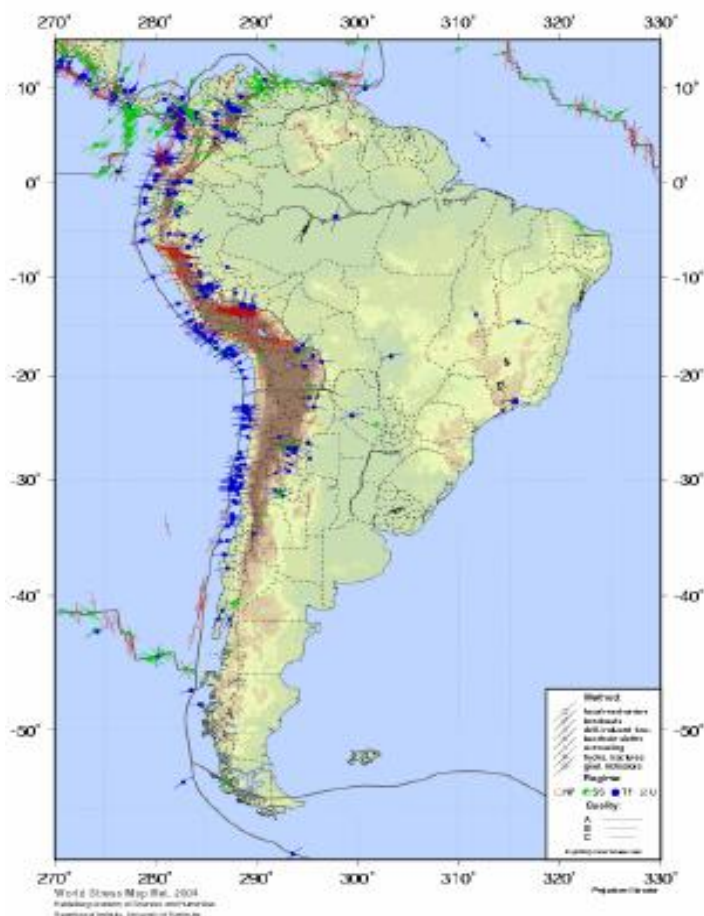


Figura 2-6. Orientación del esfuerzo horizontal mayor en América del Sur (Heidbach, y otros 2008)

Se observa que el esfuerzo horizontal mayor cambia su orientación según la influencia de las placas tectónicas. Al apreciar la orientación del esfuerzo horizontal mayor y la geografía en la zona chilena se aprecia que las mayores deformaciones se producen en la dirección EW por la conformación de los Andes, mientras que, en la dirección NS es posible suponer que la deformación es pequeña o casi nula.

Tomando los supuestos mencionados y la ley de Hooke se puede establecer la relación entre el esfuerzo in situ y las deformaciones relacionadas a la geografía chilena. Si se establece que la deformación en la dirección NS es igual a cero se tienen las siguientes relaciones.

$$0 = \frac{1}{E} [\sigma_{NS} - \nu(\sigma_{EW} + \sigma_V)]$$

$$0 = [\sigma_{NS} - \nu(\sigma_{EW} + \sigma_V)]$$

$$\sigma_{NS} = \nu(\sigma_{EW} + \sigma_V)$$

$$\frac{\sigma_{NS}}{\sigma_V} = \nu \left(\frac{\sigma_{EW}}{\sigma_V} + 1 \right)$$

Se reemplazan las razones de esfuerzos por sus respectivos k.

$$k_{NS} = \nu(k_{EW} + 1)$$

$$k_{EW} = \frac{k_{NS}}{\nu} - 1$$

Se puede suponer la razón de Poisson igual a 0,25, valor típico para este parámetro.

$$k_{E-O} = 4 k_{N-S} - 1$$

De la ecuación anterior es posible apreciar que el valor de k_{EW} es mayor a k_{NS} , es decir, que el esfuerzo EW es mayor a esfuerzo NS.

En la Figura 2-7 se presentan todos los modelos para la razón de esfuerzos k mostrados anteriormente. Cabe destacar, que en el modelo que utiliza como deformación horizontal NS igual a 0 se toma como valor de $k_{NS}=1$, mientras que el modelo utilizando la fórmula de Sheorey utiliza un $E_h=50$ [GPa]

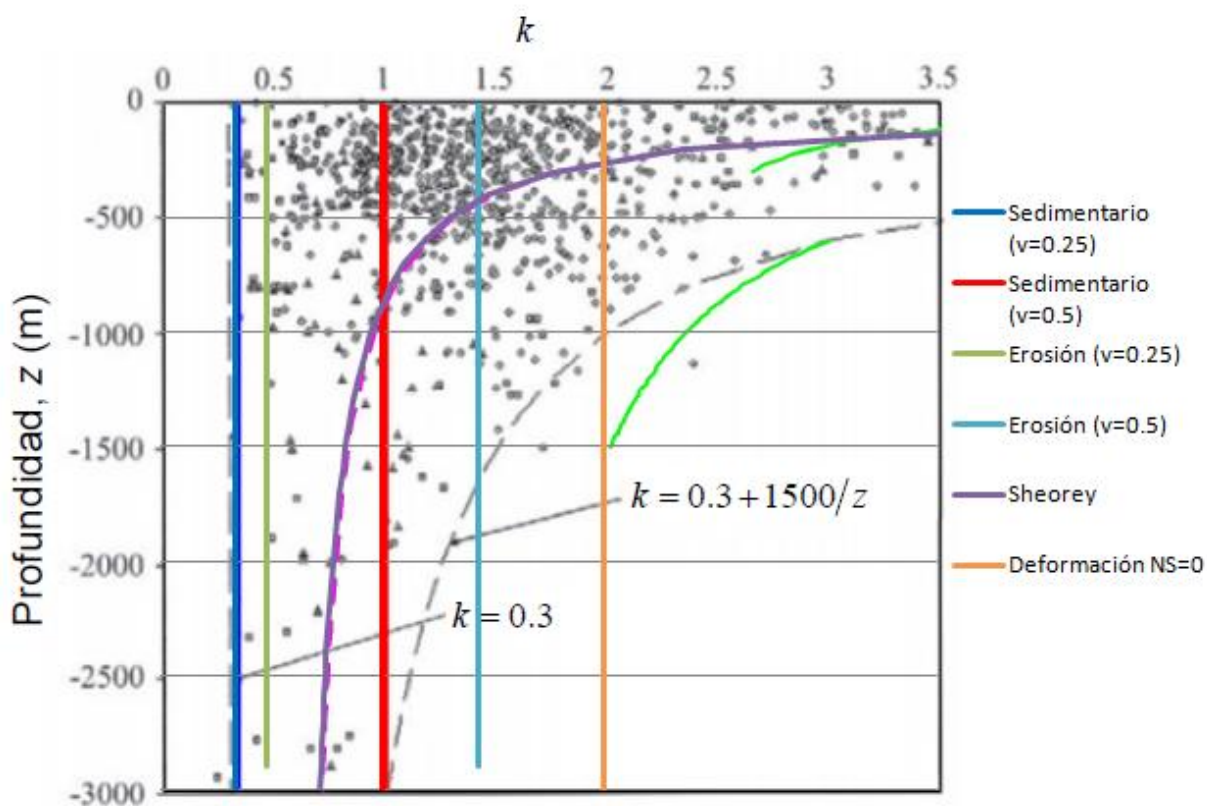


Figura 2-7. Razón de esfuerzos k en función de la profundidad (Brown y Hoek 1978).

2.5. Relación entre esfuerzos principales y mecanismos de falla

La teoría de la tectónica de placas entrega una explicación para las placas tectónicas que existen en la tierra, mostrada en la Figura 2-8, y su movimiento sobre el manto terrestre, pudiendo explicar también la ocurrencia de terremotos en sectores específicos o como se forman las cadenas montañosas. Diferentes estudios entregan información con la cual se puede construir un patrón de desplazamiento de estas placas, pudiendo establecer diferentes tipos de contactos.

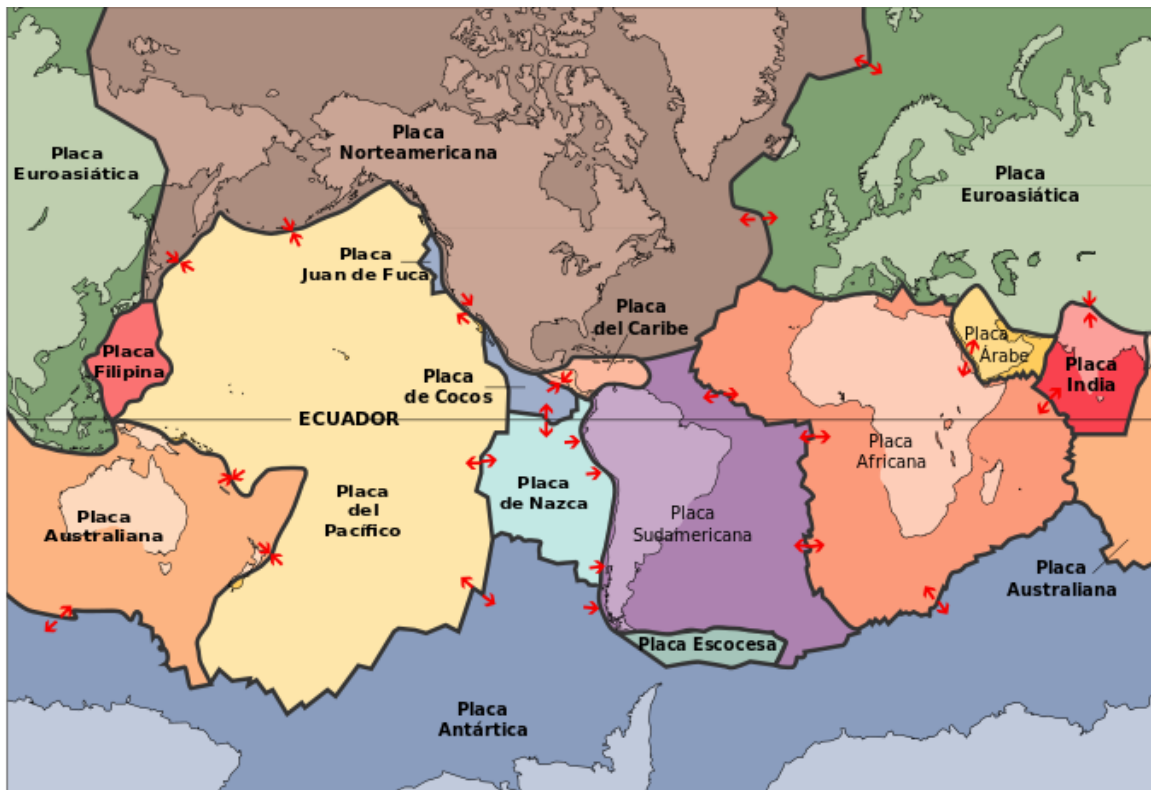


Figura 2-8. Placas tectónicas, Fuente: <http://pubs.usgs.gov/publications/text/slabs.html>.

Los tipos de contactos son:

1. Divergentes: son límites en los que las placas se separan unas de otras y, por lo tanto, emerge magma desde regiones más profundas (por ejemplo, la dorsal mesoatlántica formada por la separación de las placas de Eurasia y Norteamérica y las de África y Sudamérica).
2. Convergentes: son límites en los que una placa choca contra otra, formando una zona de subducción (la placa de Nazca se hunde bajo la placa Sudamericana) o un cinturón orogénico (si las placas chocan y se comprimen). Son también conocidos como "bordes activos".
3. Transformantes: son límites donde los bordes de las placas se deslizan una con respecto a la otra a lo largo de una falla de transformación.

En determinadas circunstancias, se forman zonas de límite o borde, donde se unen tres o más placas formando una combinación de los tres tipos de límites.

En particular en el territorio chileno se tiene un contacto convergente donde la placa Sudamericana se sobrepone a la placa de Nazca (Figura 2-9).

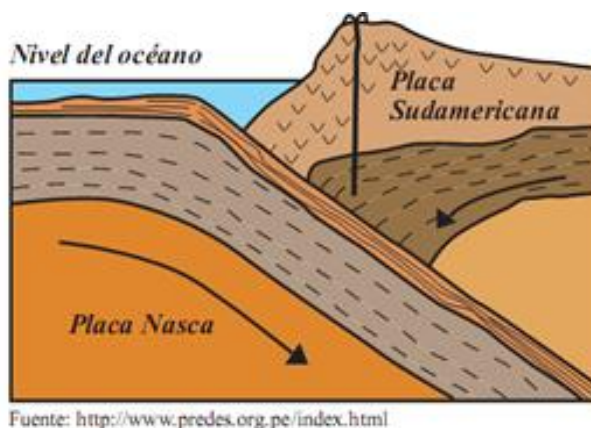


Figura 2-9. Interacción entre la placa de Nazca y Sudamericana. Fuente: <http://www.predes.org.pe/index.html>.

Las orientaciones de los esfuerzos principales entregan información de los diferentes tipos de falla que ocurren en la corteza terrestre.

Es posible identificar cinco tipos de mecanismos focales que se describen a continuación:

1. NF: Falla normal. Esfuerzo principal mayor tiene una orientación vertical.

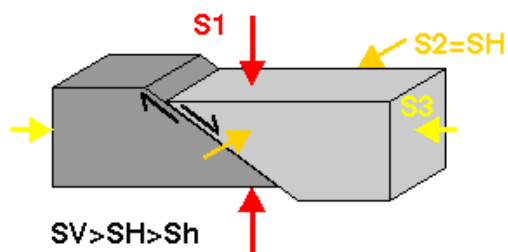


Figura 2-10. Mecanismo Focal NF, falla normal (Heidbach, y otros 2008).

2. NS: Predomina la falla normal con un componente de falla de rumbo.

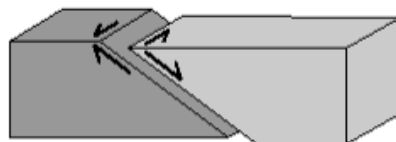


Figura 2-11. Mecanismo Focal NS, falla normal con componente de falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008).

3. SS: Falla de rumbo. El esfuerzo principal intermedio tiene una orientación vertical.

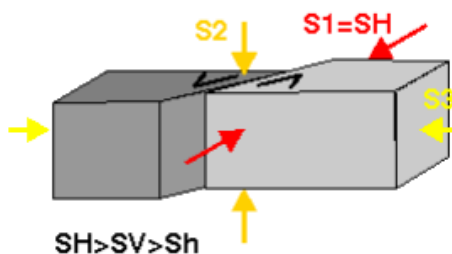


Figura 2-12. Mecanismo Focal SS, falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008).

4. TS: Predomina la falla inversa con un componente de falla de rumbo.

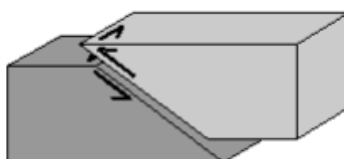


Figura 2-13. Mecanismo Focal TS, falla inversa con componente de falla de rumbo (Heidbach, y otros 2008).

5. TF: Falla de tipo inversa. El esfuerzo principal menor tiene una orientación vertical.

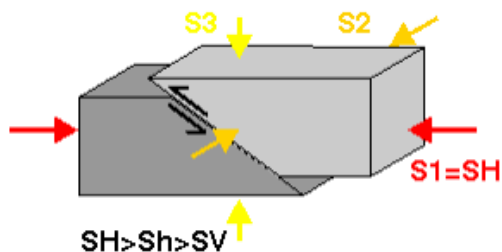


Figura 2-14. Mecanismo Focal TF, falla inversa (Heidbach, y otros 2008).

Algunos autores han cuantificado la correlación entre los esfuerzos principales y el tipo de falla asociado. Para este análisis utilizan la razón de esfuerzos b , que describe la forma del elipsoide de esfuerzo definido por (Bishop 1966) y (Angelier 1975).

$$b = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (15)$$

Este parámetro puede variar desde un estado de compresión, cuando b tiene valores entre 0 y 0.5, o en uno de extensión, cuando los valores varían entre 0.5 y 1.

Uno de los estudios realizado por Lisle y otros (2006) muestra la frecuencia del parámetro b para cada tipo de falla (Figura 2-15), se recolectaron 250 datos que forman parte de Wold Stress Map (Reinecker, y otros 2004).

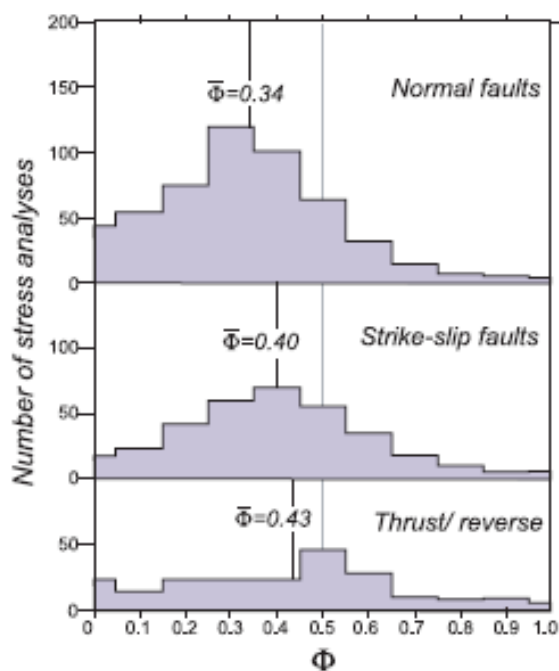


Figura 2-15. Histograma de la razón de esfuerzos b para cada tipo de falla (Lisle, y otros 2006).

Se aprecia en la Figura 2-15 que las medias para cada tipo de falla son diferentes, la menor corresponde a la falla normal y la mayor a la falla inversa, mientras que la intermedia pertenece a la falla de rumbo.

El World Stress Map database (Heidbach, y otros 2008) es una recopilación mundial de información sobre el campo de esfuerzos actual de la corteza terrestre, la base contiene registros de 21.750 lugares y su versión más reciente es del 2008. Al analizar la base de datos del World Stress Map database (Heidbach, y otros 2008) es posible establecer relaciones entre los mecanismos de falla y la razón de esfuerzos b .

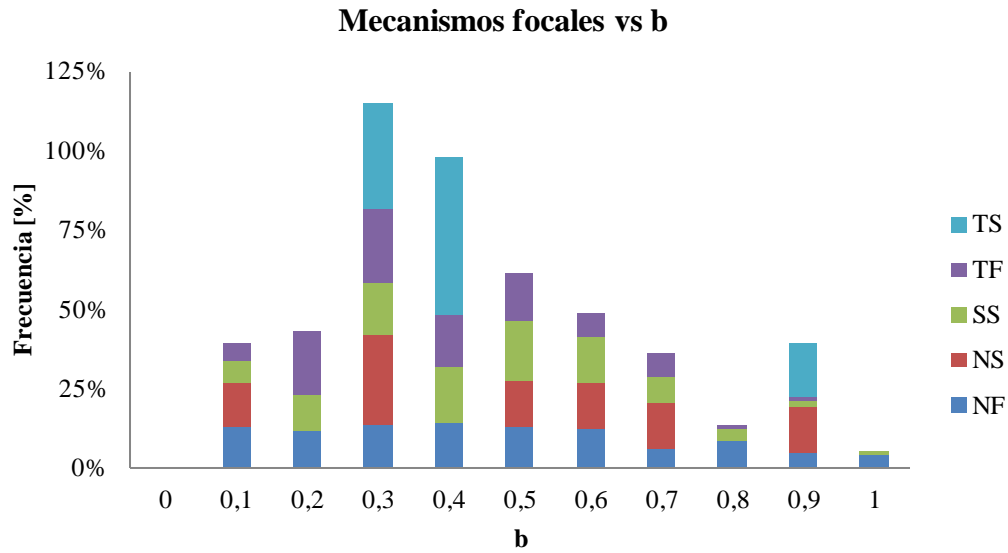


Figura 2-16. Frecuencia del parámetro b para distintos mecanismos focales (Heidbach, y otros 2008).

Los esfuerzos se estiman con diferentes técnicas, que se pueden dividir en dos grandes grupos: métodos directos que consisten en la perturbación de la roca y métodos indirectos que consisten en la observación del comportamiento de la roca sin tener mayor influencia en el proceso (Tabla 2-1).

Tabla 2-1. Métodos para determinar esfuerzos. (Ljunggren, y otros 2003)

Métodos Directos	Métodos Indirectos
<ul style="list-style-type: none"> • Flatjack test, • Fracturamiento hidráulico (HF, HTPF), • United States Bureau of Mines (USBM) overcoring torpedo, • Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) overcoring gauge, • Sobre excavación 	<ul style="list-style-type: none"> • Breakouts en sondajes, • Soluciones de mecanismo focal, • Emisiones acústicas, • Relajación de deformaciones inelásticas, • Disking

En este estudio, los esfuerzos considerados para el análisis son obtenidos mediante el método de Overcoring – CSIRO Hollow Inclusion Cell. Este método permite medir deformaciones de las paredes a través de 12 strain gauges ubicados en la celda que se introduce en la perforación realizada (Ljunggren, y otros 2003).

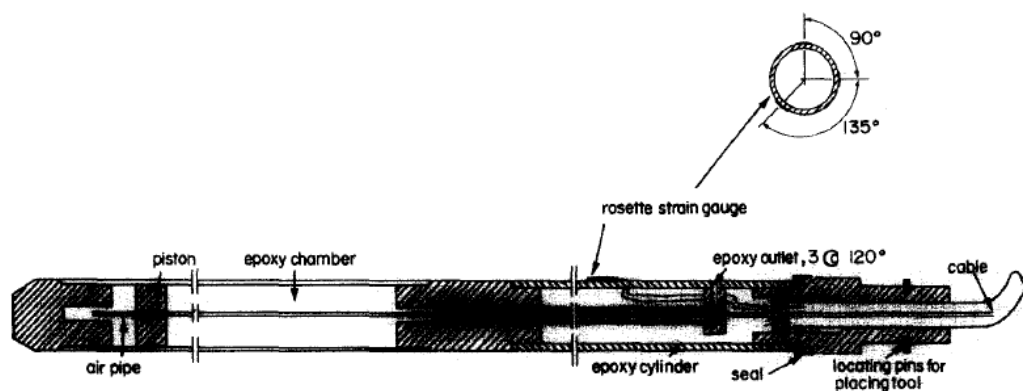


Figura 2-17. Celda utilizada en el método Hollow Inclusion Cell (Duncan y Pender 1980).

Los ángulos presentados en la Figura 2-17 son los elegidos para los strain gauges con tal de simplificar los cálculos del análisis que se realiza posteriormente para obtener los esfuerzos.

La Figura 2-18 muestra una ilustración con el procedimiento:

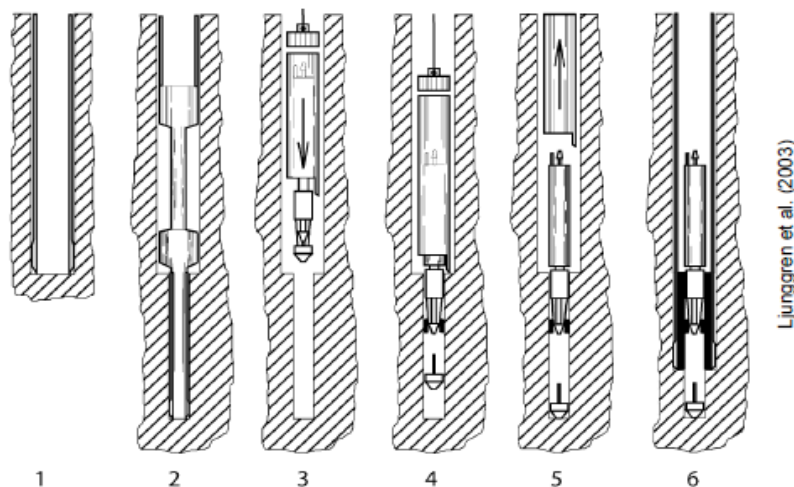


Figura 2-18. Procedimiento de la medición de esfuerzos mediante la celda CSIRO Hollow Inclusion (Ljunggren, y otros 2003).

1. Se realiza el sondaje de 155 [mm] de diámetro.
2. Se realiza la perforación piloto de 38 [mm] de diámetro y de un largo aproximado de 600 [mm]
3. Se inserta la celda CSIRO Hollow Inclusion al sondaje.
4. Se acomoda la celda en la perforación piloto.
5. Se extrae la herramienta de instalación.
6. Tras dejar que los medidores de desplazamiento peguen bien (se deja aproximadamente una noche), se sobre perfora registrando los desplazamiento y la temperatura. Posteriormente se arranca el testigo sobre perforado para inspeccionarlo.

Al retirar el testigo, de aproximadamente 140–143[mm] se le efectúa un ensayo biaxial (Figura 2-19) para la determinación de las propiedades elásticas de la roca como el módulo de deformación (E) y la razón de Poisson (ν).



Figura 2-19. Ensayo Biaxial realizado al testigo sobre perforado.

Este método tiene las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

1. Se puede obtener el tensor de esfuerzos completos en una sola medición.
2. Es posible utilizarlo para conocer cambio de los esfuerzos en el tiempo.
3. Es apropiado para rocas isótropas y anisótropas.

Desventajas:

1. Puede presentar problemas con el agua o material suelto en las paredes del sondaje

Para obtener los valores de los esfuerzos a partir de las deformaciones medida por los strain gauges se utiliza un análisis lineal elástico, para esto es necesario utilizar los valores obtenidos del ensayo biaxial.

Se muestran a continuación las ecuaciones que relacionan la deformación obtenida con los esfuerzos propuesta por Duncan (1980)

$$E_2 e_{\theta} \left[\frac{\pi}{2} \right] = [\sigma_x^0 + \sigma_y^0] \bar{K}_1 + [\sigma_x^0 - \sigma_y^0] \bar{K}_2 - \sigma_z^0 \bar{K}_4 \quad (16)$$

$$E_2 e_{\theta} \left[\frac{5\pi}{4} \right] = [\sigma_x^0 + \sigma_y^0] \bar{K}_1 - 2\tau_{xy}^0 \bar{K}_2 - \sigma_z^0 \bar{K}_4 \quad (17)$$

$$E_2 e_z = \sigma_z^0 - \nu [\sigma_x^0 + \sigma_y^0] \quad (18)$$

$$E_2 e_{\theta} [0] = [\sigma_x^0 + \sigma_y^0] \bar{K}_1 - [\sigma_x^0 - \sigma_y^0] \bar{K}_2 - \sigma_z^0 \bar{K}_4 \quad (19)$$

Los factores K son introducidos por Worotnicki y Walton (1976), en el caso de la solución establecida por Leeman (1968) éstas son todas igual a 1.

$$\bar{K}_1 = K_1(\rho) \quad (20)$$

$$K_1(\rho) = d_1(1 - v_1v_2) \left[1 - 2v_1 + \frac{R_1^2}{\rho^2} \right] + v_1v_2 \quad (21)$$

$$\bar{K}_2 = 2[1 - v_2^2]K_2(\rho) \quad (22)$$

$$K_2(\rho) = (1 - v_1)d_2\rho^2 + d_3 + \frac{v_1d_4}{\rho^2} + \frac{d_5}{\rho^4} \quad (23)$$

$$\bar{K}_3 = K_3(\rho) \quad (24)$$

$$K_3(\rho) = d_6 \left[1 + \frac{R_1^2}{\rho^2} \right] \quad (25)$$

$$\bar{K}_4 = v_2K_4(\rho) \quad (26)$$

$$K_4(\rho) = -\frac{(v_1 - v_2)d_1}{v_2} \left[1 - 2v_1 + \frac{R_1^2}{\rho^2} \right] + \frac{v_1}{v_2} \quad (27)$$

Los valores de las constantes d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 y d_6 dependen de la razón entre los módulos de corte de la roca y el epoxi y la razón entre los radios de la celda y el diámetro de la perforación menor.

Reuniendo toda esta información se obtienen los esfuerzos normales y de corte (Duncan y Pender 1980).

$$\sigma_z^o = \frac{E_2}{[\bar{K}_1 - v_2\bar{K}_4]} \left\{ \bar{K}_1 e_z + \frac{v_2}{2} \left[e_\theta(0) + e_\theta\left(\frac{\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (28)$$

$$\sigma_y^o = \frac{\bar{K}_4\sigma_z^o}{2\bar{K}_1} + \frac{E_2}{4\bar{K}_1\bar{K}_2} x \left\{ [\bar{K}_2 + \bar{K}_1]e_\theta(0) + [\bar{K}_2 - \bar{K}_1]e_\theta\left[\frac{\pi}{2}\right] \right\} \quad (29)$$

$$\sigma_y^o = \frac{\bar{K}_4\sigma_z^o}{2\bar{K}_1} + \frac{E_2}{4\bar{K}_1\bar{K}_2} x \left\{ [\bar{K}_2 - \bar{K}_1]e_\theta(0) + [\bar{K}_2 + \bar{K}_1]e_\theta\left[\frac{\pi}{2}\right] \right\} \quad (30)$$

$$\tau_{xy}^o = -\frac{1}{2\bar{K}_2} \left\{ E_2 e_\theta\left(\frac{5\pi}{4}\right) + \sigma_z^o\bar{K}_4 - [\sigma_x^o + \sigma_y^o]\bar{K}_1 \right\} \quad (31)$$

$$\tau_{xz}^o = \frac{E_2}{16[1 + v_2]\bar{K}_3} x \left\{ -3\gamma_{\theta z}\left[\frac{\pi}{2}\right] + \gamma_{\theta z}(0) + \sqrt{2}\gamma_{\theta z}\left[\frac{5\pi}{4}\right] \right\} \quad (32)$$

$$\tau_{yz}^o = \frac{E_2}{16[1 + v_2]\bar{K}_3} x \left\{ -3\gamma_{\theta z}(0) + \gamma_{\theta z}\left[\frac{\pi}{2}\right] + \sqrt{2}\gamma_{\theta z}\left[\frac{5\pi}{4}\right] \right\} \quad (33)$$

Donde

- $\gamma_{\theta z} = \frac{1}{G} \tau_{\theta z}^0$

Se aprecia que para rocas duras los valores de las constantes K son cercanos a 1, para otras características los valores disminuyen.

2.6 Modelos de esfuerzos In Situ

Se presentan a continuación los estudios de esfuerzos in situ realizados en diferentes países. Haciendo referencia a los modelos establecidos para estimar los esfuerzos in situ con la profundidad.

2.6.1 Canadá

1. Maloney, Kaiser y Vorauer (2006):

Estos autores realizan un estudio en Canadá, en la falla Cadillac (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006), con una base de datos que contenía 242 mediciones de esfuerzos en cuatro zonas (Churchill, Southern, Grenville y Superior) que se presentan en la Figura 2-20 (a). La Figura 2-20 (b) muestra que la mayoría de las mediciones se concentran en profundidades menores a 1250 metros.

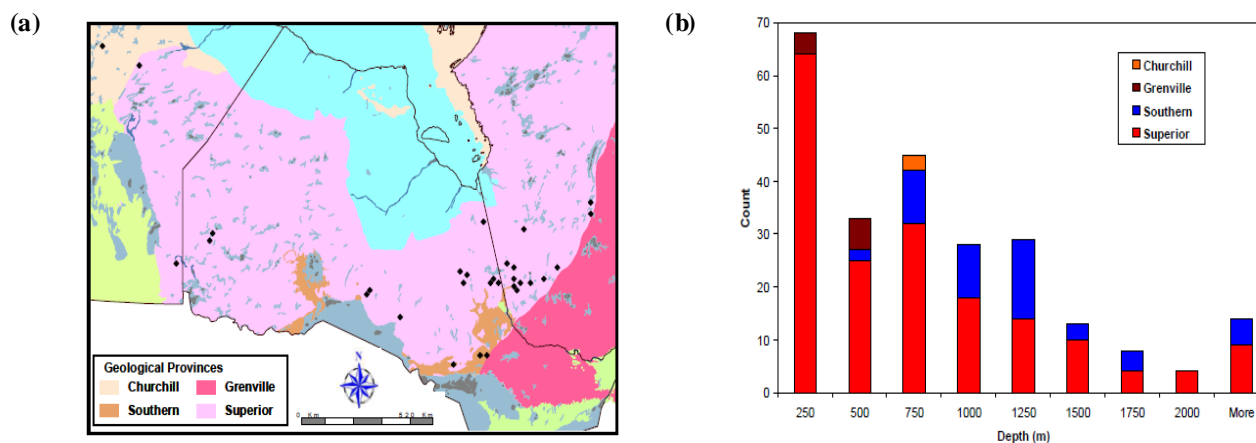


Figura 2-20. (a) Zonas de donde provienen las mediciones de esfuerzos In Situ, (b) Histograma de la profundidad de las mediciones de esfuerzos In Situ (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).

Con estos antecedentes los autores analizaron la base de datos obteniendo las siguientes correlaciones de los esfuerzos principales con la profundidad.

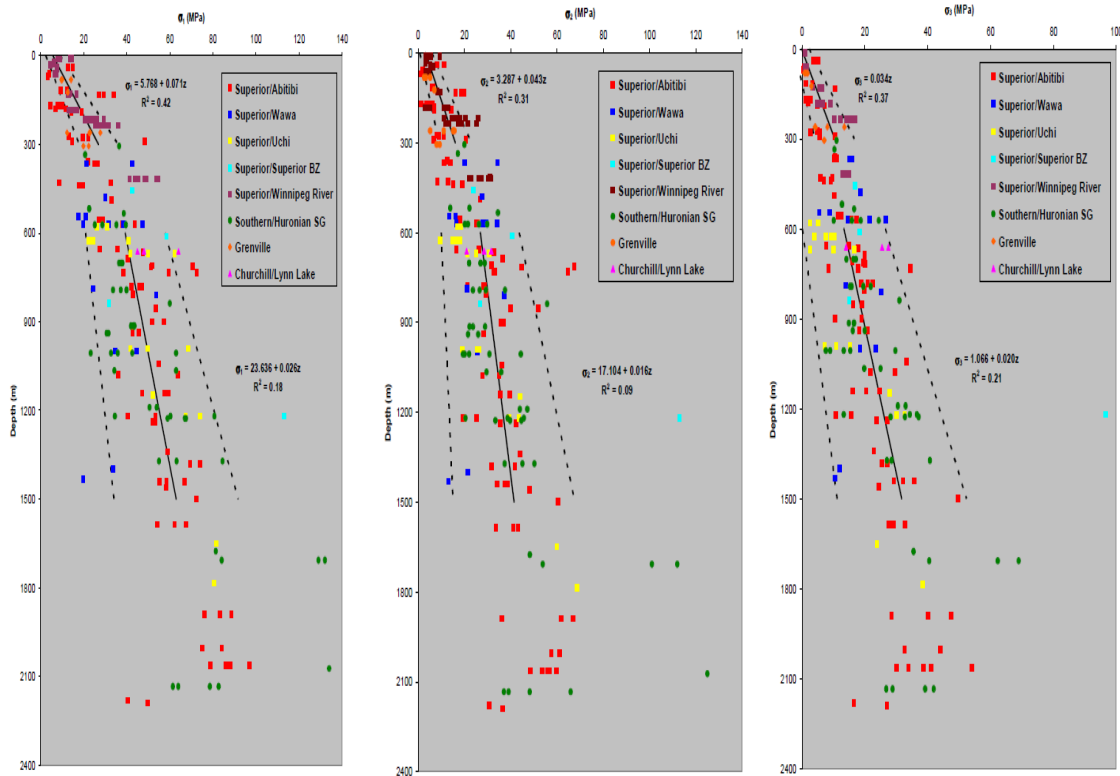


Figura 2-21. Resultados de las correlaciones entre los esfuerzos principales y la profundidad (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).

A la izquierda, centro y derecha de la Figura 2-21 se muestra la correlación entre el esfuerzo principal mayor, intermedio y menor en función de la profundidad. En estas tendencias se definen tres dominios que están relacionados con la profundidad de las mediciones y que se deben a las diferentes perturbaciones que puede tener el macizo. Se destaca que los dominios encontrados corresponden a:

- Dominio 1: 0- 300 [m], los esfuerzos están relacionados a las características geológicas locales. Los esfuerzos están perturbados por variaciones en la rigidez de la roca y por fallas o discontinuidades.
- Dominio 2: zona de transición. En este caso existen perturbaciones que dependerá de cada sector a estudiar, el rango de profundidad también varía según el tipo de macizo rocoso.
- Dominio 3: 600 o 1500 [m] en adelante, los esfuerzos están relacionados a las fallas regionales y la actividad tectónica. Este dominio está poco perturbado.

Es importante mencionar que para profundidades mayores a 1500 [m] las mediciones no son consideradas, por tener mayores posibilidades de estar influenciadas por los esfuerzos inducidos en el lugar de la medición.

Con respecto a la orientación de los esfuerzos se realizaron diferentes gráficos (Figura 2-22 y Figura 2-23) que muestran la concentración tanto en el dominio 1 (menos profundo) cómo en el dominio 3 (más profundo). En el caso del esfuerzo principal mayor (Figura 2-22), se aprecia que

la orientación varía con la profundidad, pero no de manera tan marcada, y que el esfuerzo principal (Figura 2-23) menor es prácticamente vertical en los dos dominios.

Los esfuerzos principales (mayor y menor) son ortogonales, siendo el menor casi vertical. El trabajo destaca que el esfuerzo principal mayor tiene la dirección NE-SW, siendo consistente con la actividad tectónica de la zona ya que coincide con lo obtenido por otros autores para la zona estudiada.

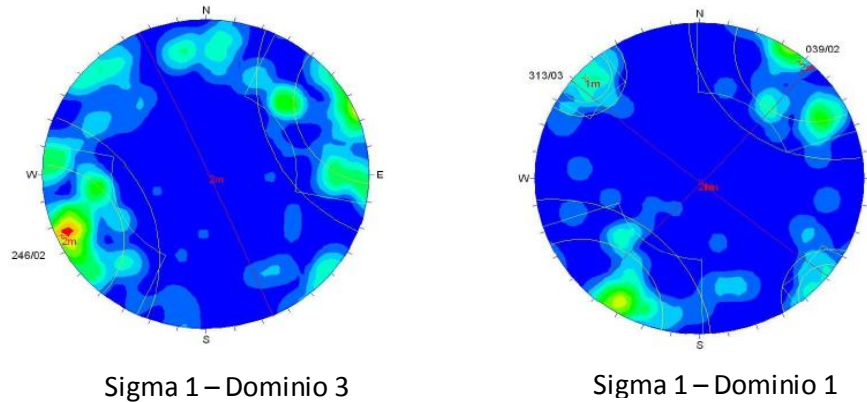


Figura 2-22. Orientación esfuerzo principal mayor para cada dominio (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).

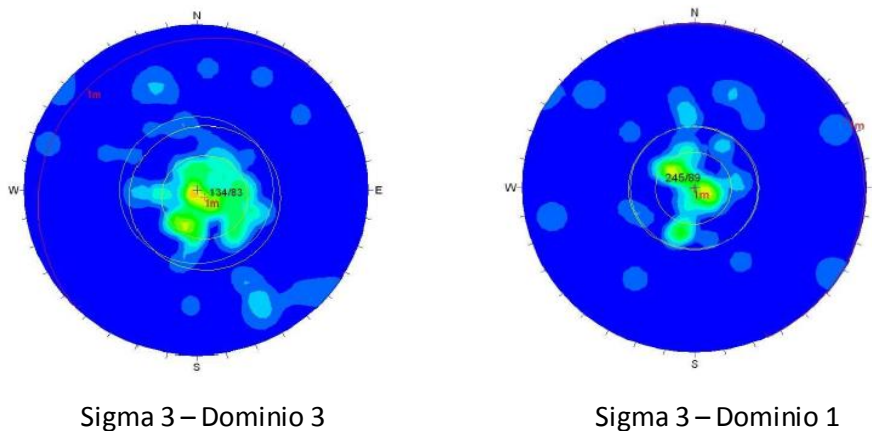


Figura 2-23. Orientación esfuerzo principal menor en cada dominio (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).

Dentro de las limitaciones de este trabajo podemos identificar, la falta de rigurosidad en la definición de los dominios. Si bien en la Figura 2-21 se observa un cambio en el gradiente de las mediciones, no se intenta determinar estadísticamente la zona de transición. Adicionalmente, no se compara el ajuste del modelo propuesto con un modelo que considere a los tres dominios como uno solo.

2. Arjang y Herget (1997):

En este estudio se compilaron 214 mediciones provenientes de 39 minas, donde se estudiaron los esfuerzos principales, esfuerzo vertical y las razones de esfuerzos k . Las mediciones llegaban a profundidades de 2250 [m].

Los resultados del estudio consideran modelos lineales para los esfuerzos, estimados en función de regresiones lineales con la profundidad.

La Figura 2-24 ilustran las mediciones y modelos establecidos para los esfuerzos principales y vertical:

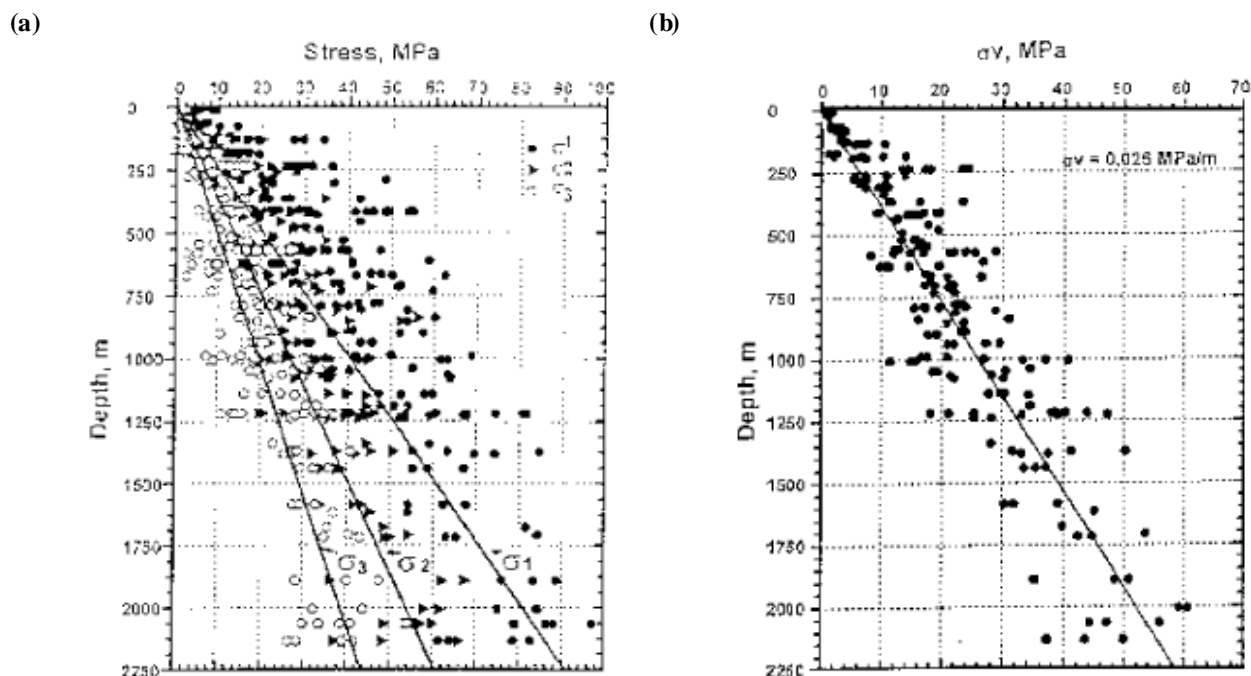


Figura 2-24. Modelo lineales establecidos para los esfuerzos (a) principales y (b) vertical, Canadá (Arjang y Hergert 1997).

La Tabla 2-2 presenta las ecuaciones obtenidas de la regresión.

Tabla 2-2. Modelo lineal de los esfuerzos principales, Canadá (Arjang y Hergert 1997).

Esfuerzo	Intercepción [MPa]	Gradiente [MPa/m]	Coefficiente de Correlación
σ_1	13.5 ± 1.3	0.0344 ± 0.0014	0.87
σ_2	8.0 ± 0.9	0.0233 ± 0.0090	0.85
σ_3	3.0 ± 0.7	0.0180 ± 0.0007	0.87
σ_v	0.0	0.0260	-

La Figura 2-25 presenta la razón de esfuerzo vertical horizontal máxima y mínima.

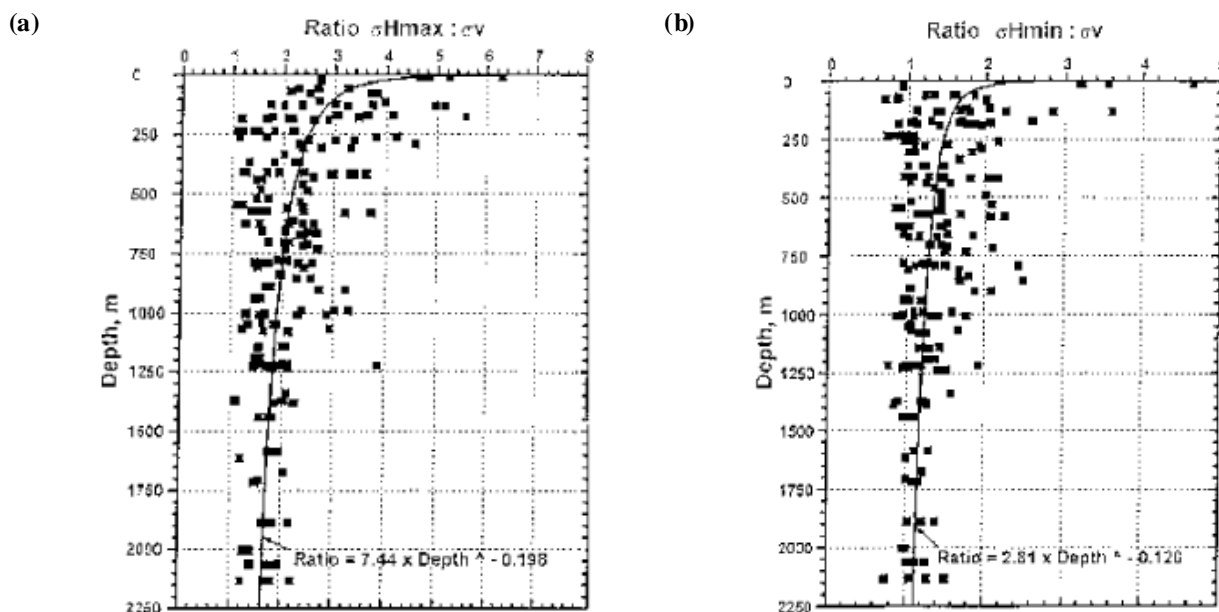


Figura 2-25. (a) Razón de esfuerzos $k_{máx}$ (b) Razón de esfuerzos $k_{mín}$, Canadá (Arjang y Herget 1997).

De los resultados mostrados en la Figura 2-25 se rescata que la razón para el esfuerzo horizontal máximo varía entre 7.8 al 1.2. Cuando la profundidad es mayor a 1000[m] los valores son casi siempre menores a 2.2. En el caso del esfuerzo horizontal mínimo su rango varía desde 4.6 al 0.6 y se acerca a 1 luego de los 1400[m].

Con respecto a las orientaciones de los esfuerzos principales se obtiene lo siguiente.

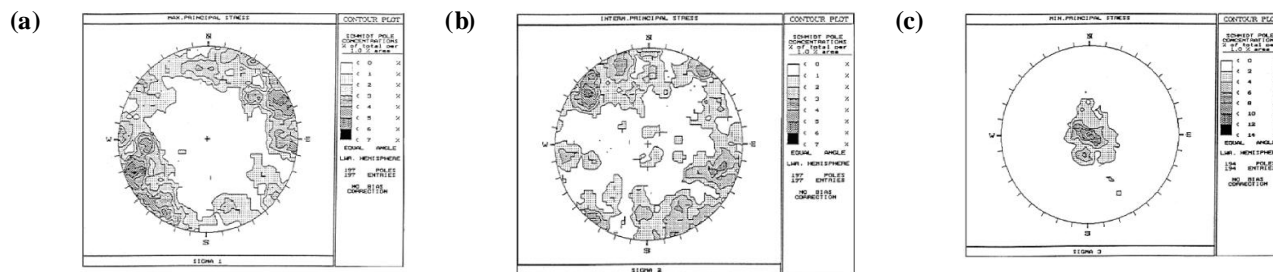


Figura 2-26. Orientación esfuerzo principal (a) mayor, (b) intermedio y (c) menor, Canadá (Arjang y Herget 1997).

En el caso del esfuerzo principal menor (Figura 2-26c) los datos están todos concentrados en la vertical, mientras que, los otros esfuerzos (Figura 2-26a y b) muestran que los datos no tienen una distribución homogénea, sin embargo, en el caso del esfuerzo principal mayor este tiene una tendencia NE-SW mientras que el intermedio es NW-SE.

El autor concluye que, si bien estos modelos pueden ser utilizados para etapas tempranas del diseño como es el caso de los estudios de pre-factibilidad, es necesario obtener mediciones del lugar específico, ya que los esfuerzos se ven afectados por diferentes factores como la geología local que pueden alterar lo obtenido regionalmente.

3. McKinnon y Labrie (2006):

En este estudio se analizaron datos de una área específica de Canadá, Cadillac, Quebec, con profundidades entre 1460 a 2190 [m]. El autor compara lo encontrado en 4 mediciones en una mina cercana a la falla Cadillac con lo obtenido en otros estudios para la zona en general (Figura 2-27).

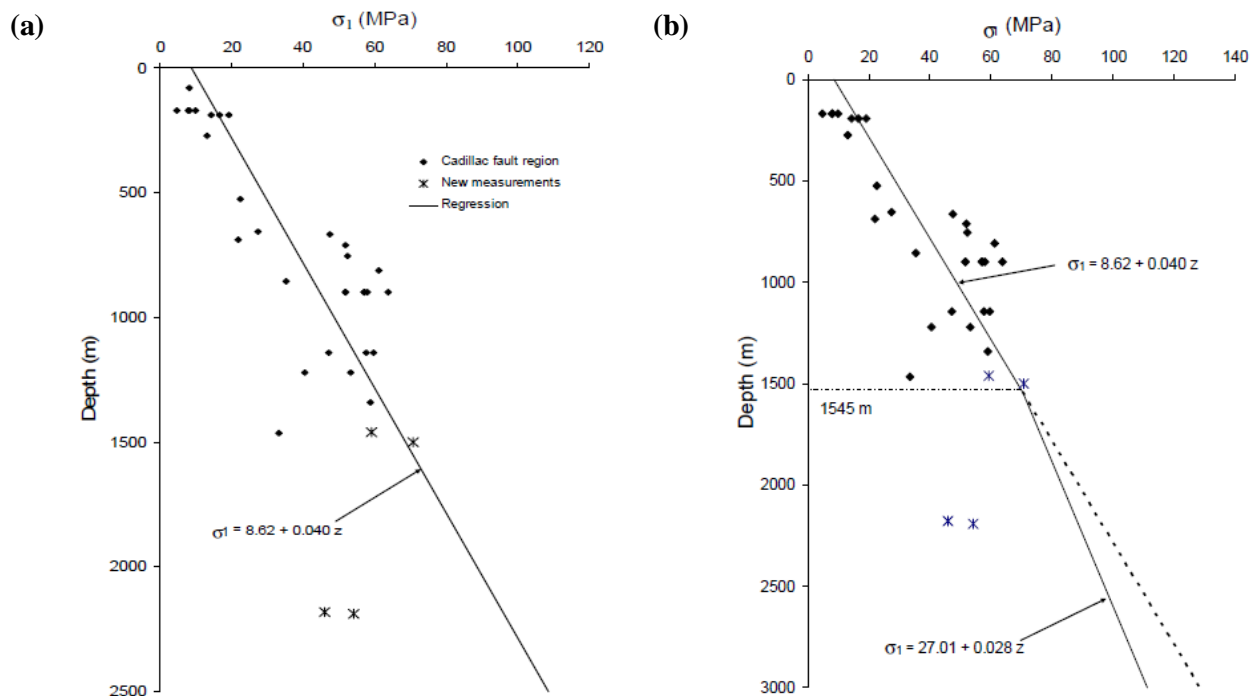


Figura 2-27. Es fuerza principal mayor para las mediciones de toda la región y las realizadas en la mina, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).

La Figura 2-27 indica como las nuevas mediciones realizadas a mayor profundidad se distancian del modelo en comparación a los otros puntos medidos en la región.

Para estimar un modelo de esfuerzos in-situ, consistente con las nuevas mediciones, los autores, realizan un ajuste lineal entre σ_1 - σ_3 y σ_2 - σ_3 , ya que la envolvente de esfuerzos muestra un alto grado de correlación y con una ligera diferencia de la envolvente propuesta para la región según lo mostrado en la Figura 2-28.

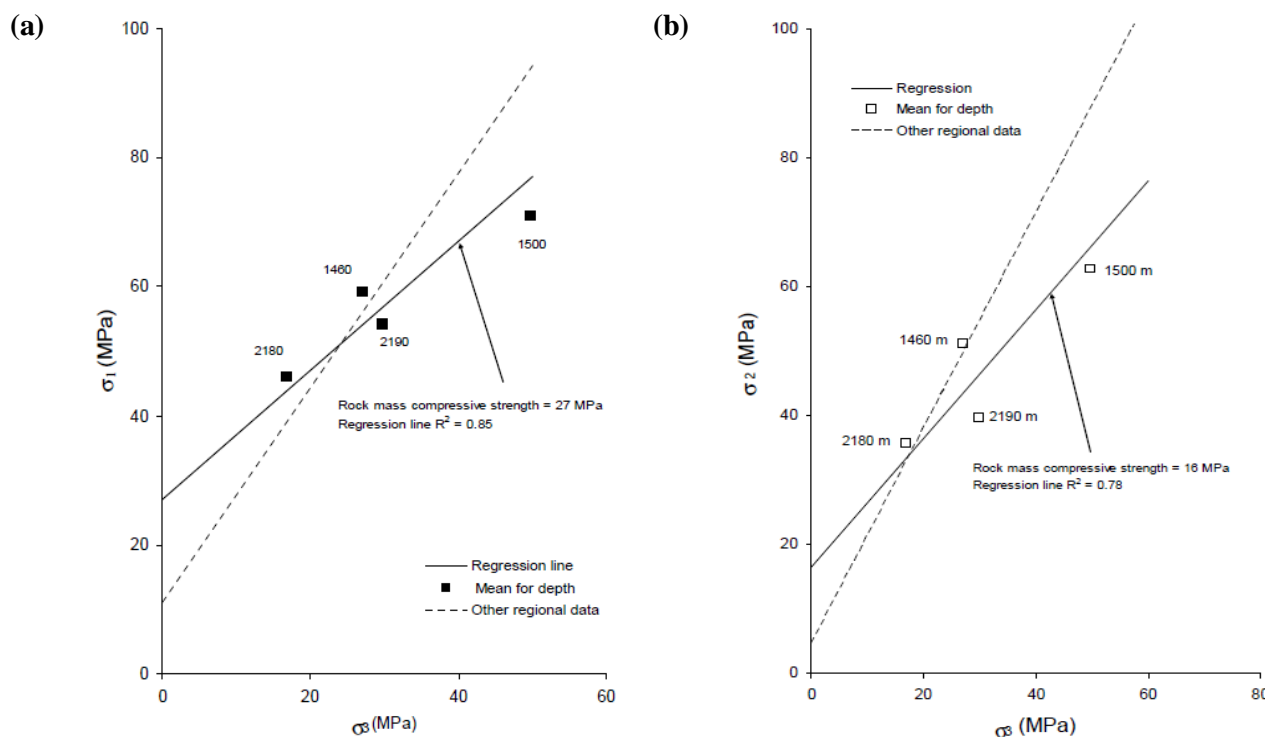


Figura 2-28. Interpretación alternativa de los esfuerzos principales (a) mayor y (b) intermedio (McKinnon y Labrie 2006).

Una interpretación alternativa puede explicar muchos aspectos de los esfuerzos medidos a gran profundidad, esta asume que a gran escala el macizo rocoso va cediendo (escala geológica) y que por lo tanto las fallas son las que controlan los esfuerzos en este caso. Este supuesto es consistente con otros estudios de esfuerzos por diferentes autores: Jamison y Cook (1980), Zoback y otros (2002), McKinnon and Garrido (2003).

El suponer que el macizo va cediendo a gran escala puede explicar los bajos esfuerzos obtenidos a gran profundidad, como se muestra en la Figura 2-29. Se espera que a gran escala las fuerzas estén en un estado residual, es decir, que el macizo no se esté reblandeciendo. En este caso, cualquier perturbación al macizo rocoso resultará en que el estado de esfuerzos se mueva a través de la envolvente como muestra la Figura 2-29.

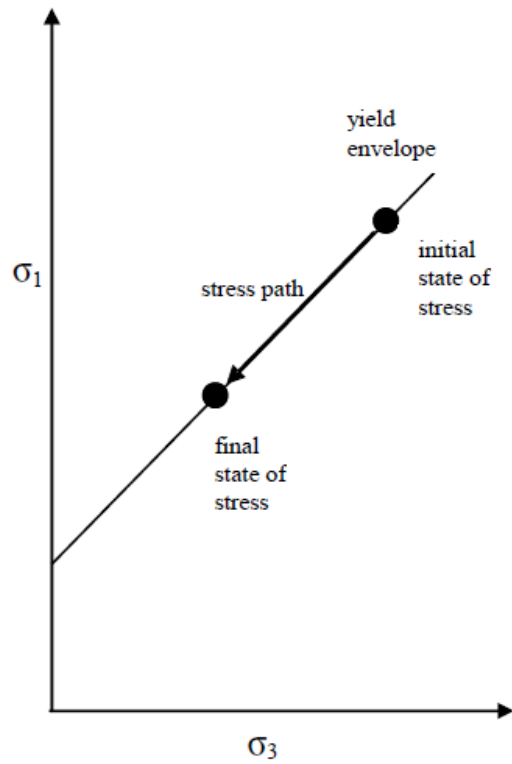


Figura 2-29. Esquema del efecto producido en los esfuerzos asumiendo que el macizo a gran escala va cediendo (McKinnon y Labrie 2006).

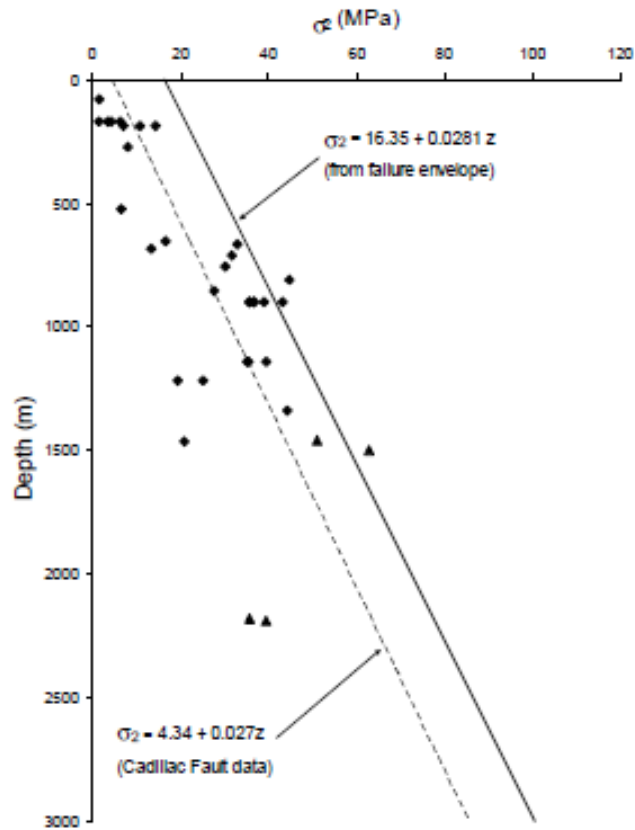


Figura 2-30. Modelo lineal para el esfuerzo principal intermedio, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).

Los modelos presentados en la Figura 2-27 y Figura 2-30 muestran gradientes e intersecciones que difieren de lo obtenido por otros autores para la región, el esfuerzos principal mayor tiene valores por sobre a los obtenidos con el modelo del esfuerzo intermedio. En el caso del esfuerzo principal menor se asume que este es igual al vertical y que por lo tanto corresponde a la carga litostática.

Tabla 2-3. Modelo de esfuerzos principales, Canadá (McKinnon y Labrie 2006).

	Intercepción [MPa]	Gradiente [MPa/m]
σ_1	27.01	0.0281
σ_2	16.35	0.0281
σ_3	0.0	0.0281

En este estudio se destaca como la geología local puede influir en los esfuerzos in situ ya que al comparar con el resto de la región se observan marcadas diferencias.

4. Udd (2006):

En este estudio se analizan mediciones de esfuerzos de Canadá en Sudbury Basin, donde se establecen relaciones lineales y logarítmicas para los esfuerzos principales y el esfuerzo vertical.

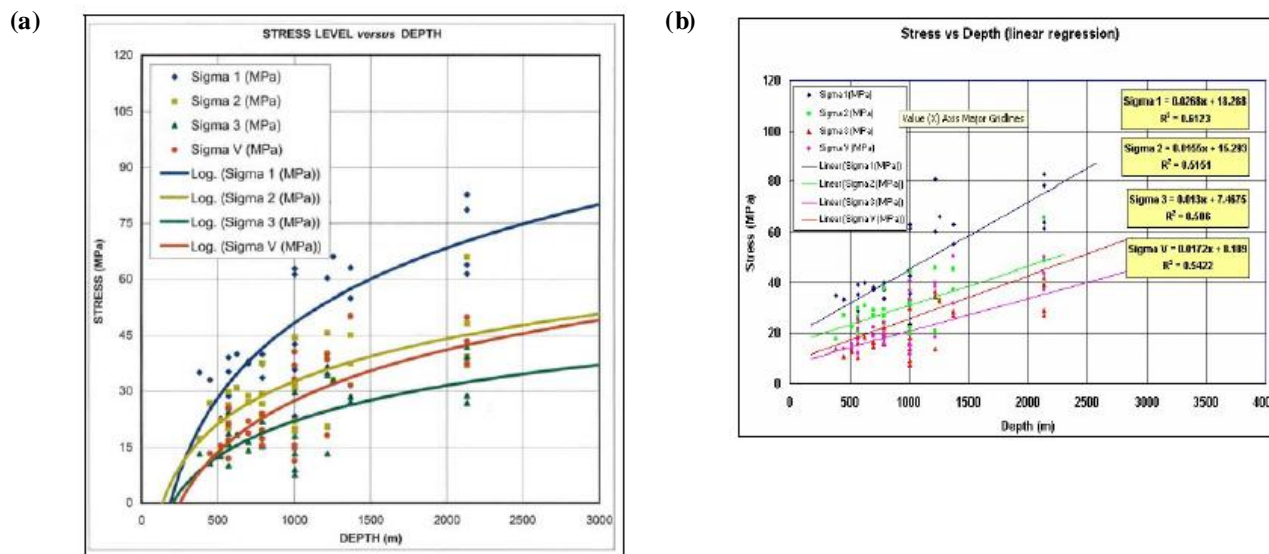


Figura 2-31. Relaciones (a) logarítmicas y (b) lineales para los esfuerzos principales y el esfuerzo vertical, Canadá (Udd 2006).

En el caso de la regresión logarítmica se indica que el gradiente del esfuerzo va disminuyendo a medida que la profundidad aumenta y por lo tanto llegar a un estado de esfuerzos hidrostático es difícil con esta tendencia, lo cual no concuerda con lo esperado a grandes profundidades.

En el caso de la regresión lineal el gradiente es constante, permitiendo llegar a un estado de esfuerzos hidrostático, Figura 2-31. Sin embargo, el autor establece que con esta interpretación a una profundidad de 3000[m] se puede llegar a tener esfuerzos de 100 [MPa], un orden de magnitud más que los esfuerzos medidos.

Tabla 2-4. Modelo de esfuerzo lineal, Canadá (Udd 2006).

Esfuerzo	Intercepción [MPa]	Gradiente [MPa/m]	Coefficiente de Determinación
σ_1	18.288	0.0268	0.61
σ_2	15.293	0.0155	0.52
σ_3	7.468	0.0130	0.51
σ_v	8.189	0.0172	0.54

Cabe destacar que en ambas relaciones, lineal y logarítmica, tienen valores similares para el coeficiente de correlación indicando que el grado de confiabilidad de ambos es análogo.

2.6.2. Chile

1. Chacón (1988)

En el estudio realizado por Chacón (1988) se analizaron mediciones de esfuerzos en minas chilenas, buscando modelos que se ajustarán de mejor forma a los datos. Se obtuvieron las siguientes relaciones:

Esfuerzo vertical versus profundidad: Se ajustan modelos lineales y exponenciales obteniendo las siguientes relaciones.:

$$\sigma_v = 0.05 * z - 1.11 \quad (34)$$

$$\sigma_v (\text{máximo}) \leq 4.58 * e^{0.0045*z} \quad (35)$$

$$\sigma_v (\text{mínimo}) \geq 1.22 * e^{0.0043*z} \quad (36)$$

La Figura 2-32 presenta de manera gráfica las ecuaciones anteriores para el esfuerzo vertical.

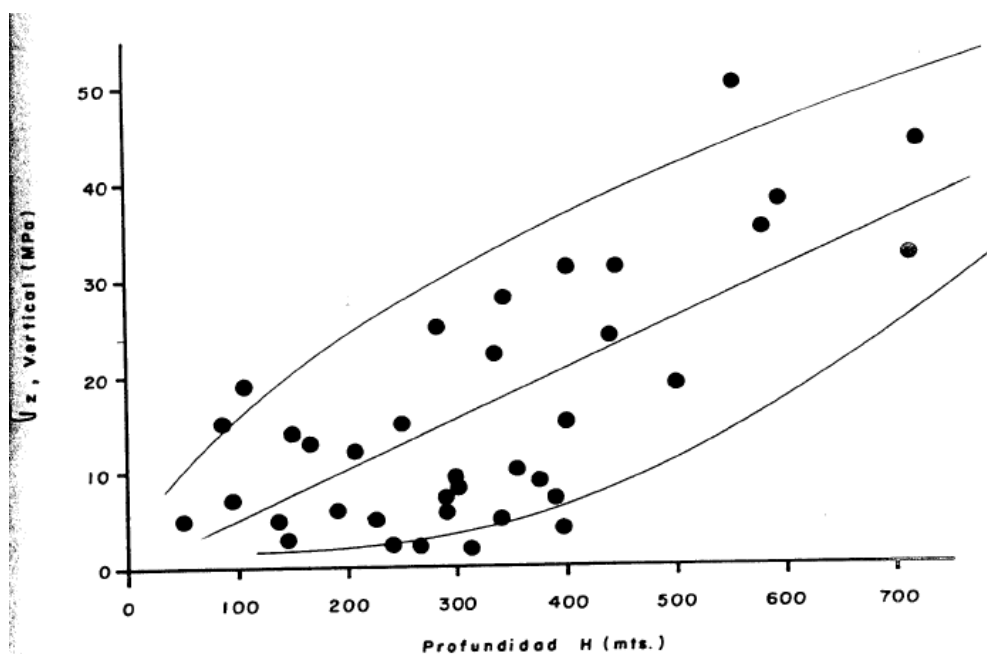


Figura 2-32. Esfuerzo vertical, Chile (Chacón 1988).

Esfuerzo horizontal versus profundidad: En este caso se analizan los valores máximos encontrados en el plano horizontal, independiente de la orientación (NS o EW). Al igual que en el caso anterior se buscaron modelos exponenciales para obtener una zona de probabilidad de los esfuerzos según la profundidad.

$$\sigma_h (\text{máximo}) \leq 4.32 * e^{0.0067*z} \quad (37)$$

$$\sigma_h (\text{mínimo}) \geq 1.19 * e^{0.0049*z} \quad (38)$$

A continuación se presenta el gráfico del esfuerzo horizontal.

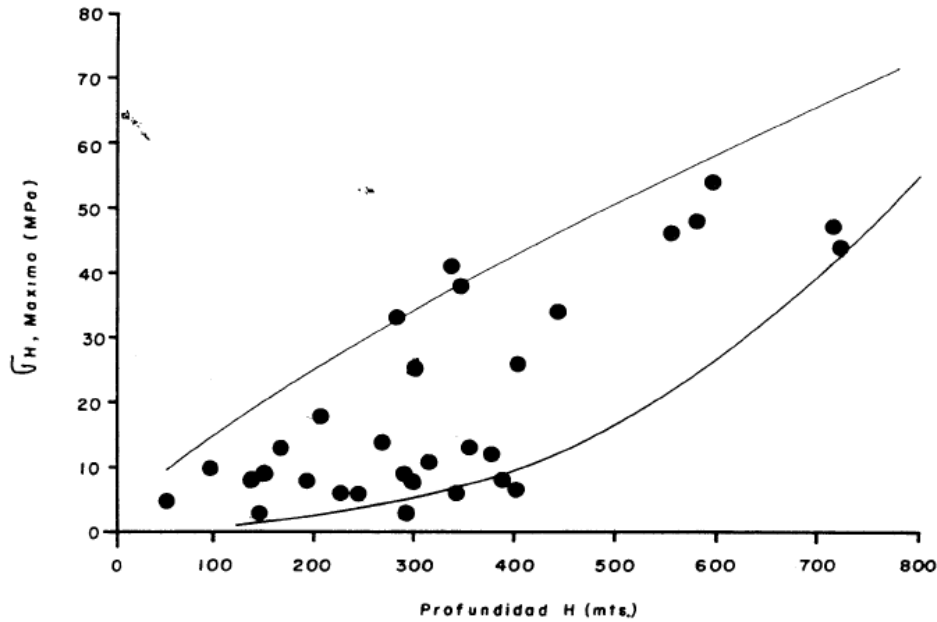


Figura 2-33. Esfuerzo horizontal, Chile (Chacón 1988).

Esfuerzos horizontales versus esfuerzos verticales: En este caso se buscaron las relaciones entre el esfuerzo horizontal y vertical dando las siguientes relaciones para esfuerzos horizontales máximos y mínimos (promedio entre esfuerzo horizontal NS y EW).

$$\sigma_h (\text{máximo}) = 1.11 * \sigma_v + 3.94 \quad (39)$$

$$\sigma_h (\text{mínimo}) = 0.977 * \sigma_v + 1.89 \quad (40)$$

Estas relaciones tuvieron buenas correlaciones con un R de 0.92 y de 0.93 para la primera y para la segunda, respectivamente. A partir de todas estas relaciones se encontró también una expresión exponencial para la razón entre el esfuerzo horizontal máximo y vertical mínimo.

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} \leq 1.11 + 3.22 * e^{-0.0043*z} \quad (41)$$

En lo que respecta a la incidencia de los esfuerzos tectónicos sobre el diseño minero, se realizaron estudios sobre pilares, techo de excavaciones y caving de bloques. Estos análisis concluyen que el modelo presentado por el autor presenta claras diferencias en el análisis

estructural de las excavaciones con respecto al estado de sollicitación gravitacional que se utilizó para la comparación, por lo que concluye que el buen conocimiento de los esfuerzos In Situ mejora la posibilidad de tener estructuras seguras, estables y faenas más eficientes.

En este estudio se analizan alrededor de 30 datos que no son filtrados, por lo tanto no se sabe si existen valores atípicos. Además no se entregan tendencias establecidas para los esfuerzos por lo que solo se puede definir un rango de valores para las diferentes profundidades. Tampoco se entregan conclusiones para las orientaciones de los esfuerzos principales.

2. Windsor, y otros 2006:

Estos autores analizan mediciones de 150 sitios diferentes en la mina El Teniente, realizadas con diferentes técnicas de medición. Parte de los resultados se enfocan en la dirección del esfuerzo principal mayor y la magnitud de los esfuerzos principales.

Se presentan la orientación del esfuerzo principal mayor.

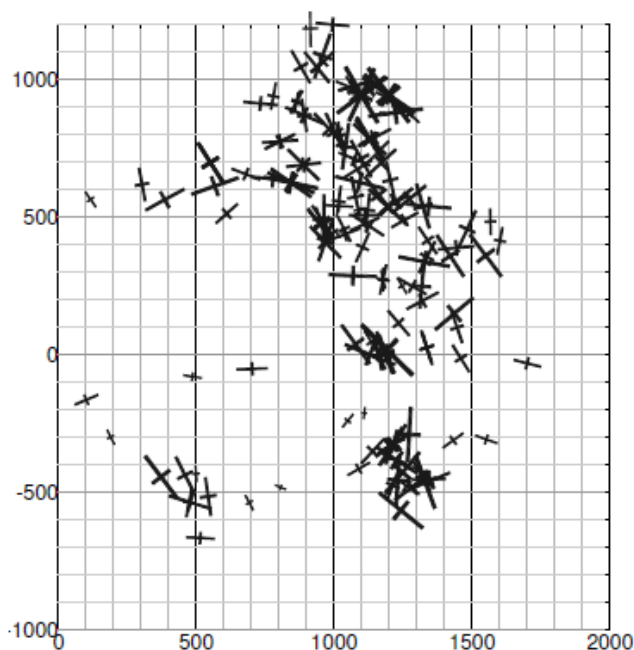


Figura 2-34. Orientación esfuerzo principal mayor, El Teniente (Windsor, y otros 2006).

La Figura 2-34 indica que la distribución contiene un mayor número de orientaciones NNW o N con una menor proporción con orientación EW.

El estudio entrega además, las orientaciones para los tres esfuerzos principales.

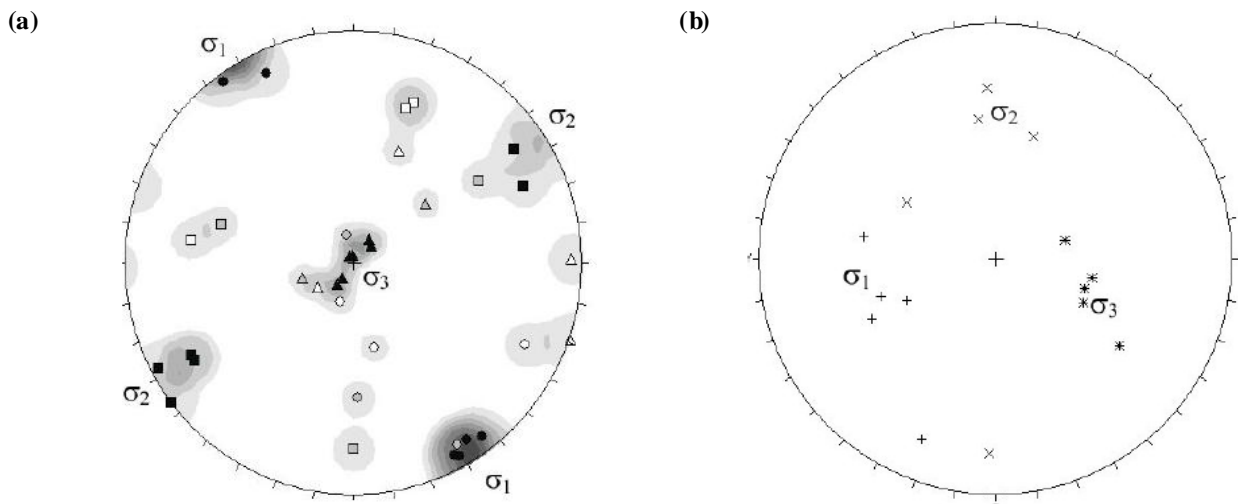


Figura 2-35. Orientación esfuerzos principales para (a) tres sitios de medición (b) un sitio de medición, El Teniente (Windsor, y otros 2006).

De la primera imagen, Figura 2-35a, se aprecia que el esfuerzo principal tiene una orientación NNW-SSE, mientras que en la segunda imagen, Figura 2-35b, se tiene una orientación EW-WSW. Cabe destacar que el sitio de la última imagen se encuentra más lejano del sector donde se realizan las labores mineras.

El estudio concluye que varios de los sectores donde se realizan las mediciones están ya afectados por los esfuerzos inducidos por la actividad minera. Además, las mediciones más cercanas a las labores mineras tienen orientaciones totalmente opuestas a la esperada mientras que en los sectores más lejanos se tiene orientaciones esperadas por los esfuerzos tectónicos asociados.

Otros autores como McKinnon (2003) también han establecido orientaciones como las presentadas en el estudio anterior. En este caso se concluye que la orientación N-S del esfuerzo principal mayor viene dada por la ubicación de la mina El Teniente ya que estaría localizada en un sector donde existen una sistema de estructuras geológicas que afectan de manera significativa al campo de esfuerzos regional.

2.6.3. Otros Países

En este punto se presentan estudios de diferentes países donde se realizan mediciones de esfuerzos In Situ y se establecen tendencias de los modelos. En general los trabajos indican las orientaciones de los esfuerzos principales y sus magnitudes.

1. Alemania (Brudy, y otros 1997):

El estudio muestra las magnitudes y orientaciones de los tres esfuerzos principales que han sido estimados para profundidades que van desde los 7.7 [km] a los 8.6 [km], a partir del programa German Continental Deep Drilling Program (KTB).

Se muestra a continuación la orientación del esfuerzo horizontal máximo en el área estudiada

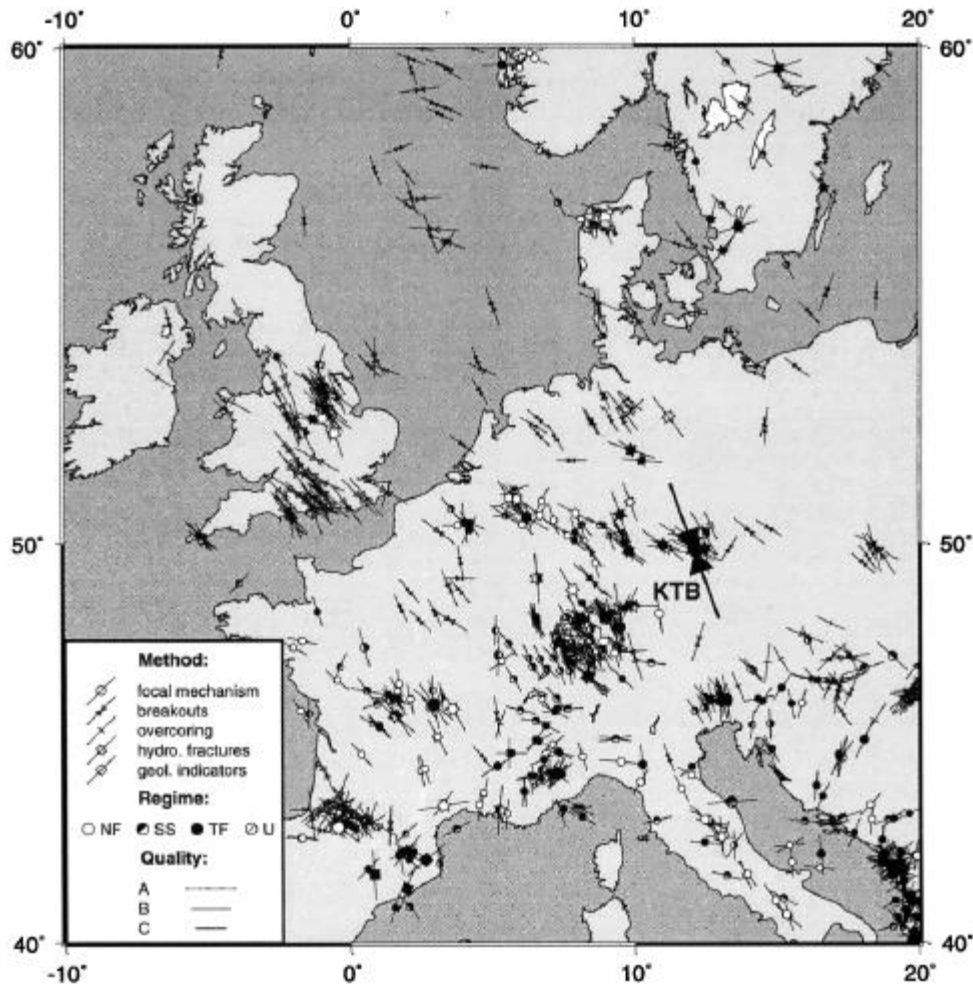


Figura 2-36. Orientación de esfuerzos horizontal máximo, Alemania (Brudy, y otros 1997).

Como se aprecia en la Figura 2-36 la orientación del esfuerzo horizontal máximo se presenta de manera uniforme en la región, además de ser también uniforme con respecto a la profundidad, obteniendo una orientación $N160^{\circ} \pm 10^{\circ}E$ que es consistente con la orientación promedio encontrada en el oeste de Europa.

En la Figura 2-37, se destaca la combinación de dos técnicas para obtener las magnitudes de los esfuerzos horizontales máximos y mínimos, mostrando una tendencia lineal con respecto a la profundidad. El esfuerzo vertical es calculado como la carga listotática, igual a 0.028 [MPa/m] , por la profundidad.

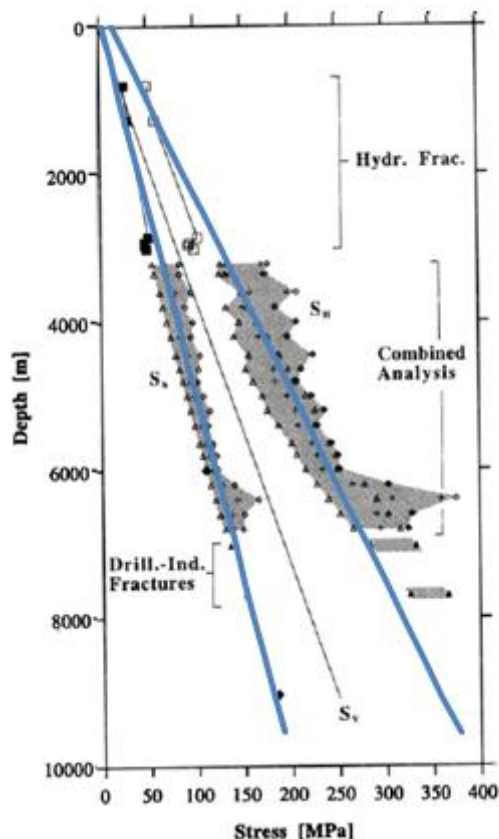


Figura 2-37. Magnitudes de los esfuerzos horizontales, Alemania (Brudy, y otros 1997).

El estudio concluye que las orientaciones son uniformes cuando aumentan en la profundidad aunque existen algunas variaciones pequeñas donde la más llamativa se encuentra a 7.2 [km] de profundidad (Figura 2-37).

Se estimaron las tendencias de los esfuerzos horizontales y se obtiene el siguiente tensor.

Tabla 2-5. Tensor de esfuerzo, Alemania.

Es fuerza	Intercepción [MPa]	Gradiente [MPa/m]
σ_H	15.0	0.038
σ_h	5.0	0.020
σ_v	0.0	0.028

2. Australia (Hillis, Enever y Reynolds 1999):

En el estudio se analizan esfuerzos In Situ para dos áreas cercanas: la cuenca de Sydney y la de Bowen. Se muestran a continuación la orientación del esfuerzo horizontal máximo para los lugares mencionados. En la Figura 2-38a se muestran las orientaciones para las dos cuencas analizadas. En el caso de la Figura 2-38b se observa el acercamiento a la cuenca Bowen y en la Figura 2-38c se muestra la cuenca Sydney. Para la cuenca Bowen las orientaciones son similares

para las 4 áreas analizadas, mientras que en la cuenca Sydney existe una mayor variabilidad en las orientaciones para los 4 sitios analizados.

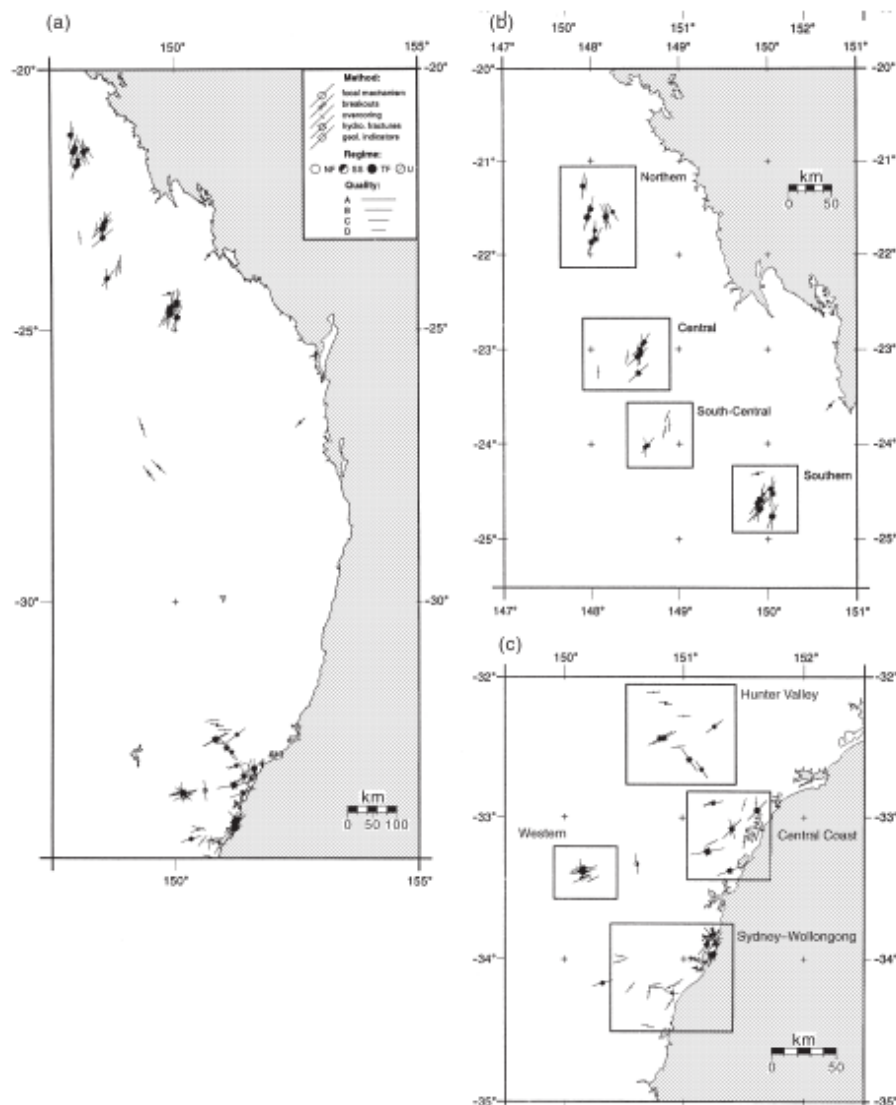


Figura 2-38. Orientación del esfuerzo horizontal máximo en el este de Australia (Hillis, Enever y Reynolds 1999).

Con respecto a las magnitudes de los esfuerzos, los autores realizan el análisis en términos de la condición geológica, considerando tres casos: falla normal ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$), falla de rumbo ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$) y falla inversa ($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$).

En el caso de la cuenca Bowen el 80% de los datos muestra la condición de falla inversa, sin embargo, existe un porcentaje considerable (17%) que, asociado a la parte Norte y Sur de la cuenca, muestra una condición de falla de rumbo. El restante 3% muestra la condición de falla normal.

En el caso de la cuenca Sydney el 90% de los datos muestra una condición de falla inversa, el 10% restante se divide en un 8% para la condición de falla de rumbo y un 2% para falla normal. Es claro ver que en este caso el tipo de falla es más preponderante que en el caso de la cuenca Bowen.

La gran presencia de datos con la condición de falla inversa es consistente con el mecanismo focal asociado a esta parte de Australia.

3. China (Cai, y otros 2000):

En este caso se analizan 5 minas chinas (Figura 2-39) estableciendo en cada una de ellas: un modelo para los esfuerzos vertical, horizontal máximo y horizontal mínimo, y la orientación del esfuerzo horizontal máximo..

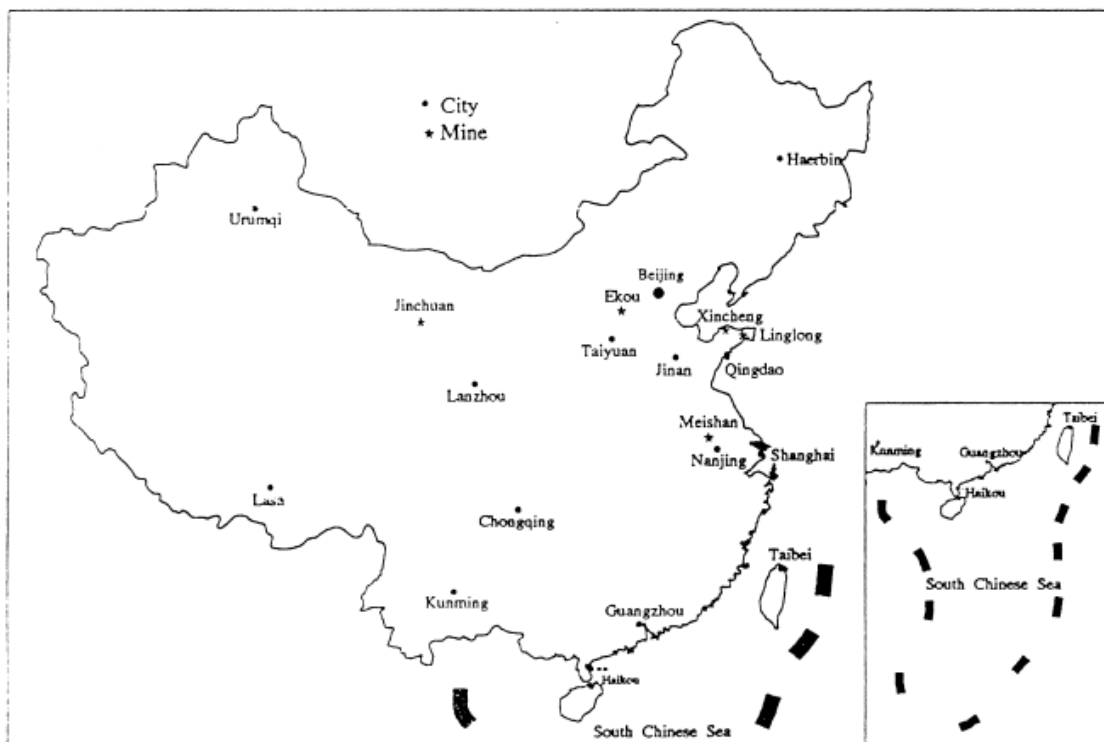


Figura 2-39. Ubicación de las minas analizadas, China (Cai, y otros 2000).

A partir de lo analizado se concluyen los siguientes puntos:

1. Dos esfuerzos principales se encuentran asociados a orientaciones horizontales mientras que el tercero se orienta verticalmente. Este patrón es más regular en áreas montañosas.
2. Las razones de esfuerzos k con respecto al esfuerzo horizontal máximo y la orientación del esfuerzo horizontal máximo en cada mina quedan dados por:

Tabla 2-6. Razón de esfuerzo k y orientación para el esfuerzo horizontal máximo, China (Cai, y otros 2000).

	k	Orientación
Xincheng	2.1 - 2.3	NWW-SEE
Linglong	1.9 - 2.5	NWW-SEE
Meishan	1.6 - 2.4	NW-SE
Ekou	2.1 - 5.1	NNW-SSE
Jinchuan	1.7 - 2.3	NEE-SWW

Las orientaciones indicadas son cercanas a la orientación del esfuerzo tectónico en las áreas mencionadas, lo que demuestra que parte importante del esfuerzo horizontal depende de este esfuerzo tectónico.

4. El esfuerzo vertical es muy cercano a la definición lineal que relaciona la carga litostática con la profundidad en el caso de las 4 primeras minas, mientras que la última muestra resultados levemente menores a este valor (Tabla 2-7).

5. El modelo calibrado por el autor presenta las siguientes tendencias lineales.

Tabla 2-7. Modelo de esfuerzo In Situ, China (Cai, y otros 2000).

Mina	Es fuerzo	Intercepción [MPa]	Gradiente [MPa/m]
Xincheng	σ_H	-0,44	0,0592
	σ_h	0,44	0,0314
	σ_v	-0,07	0,0281
Linglong	σ_H	0,72	0,0591
	σ_h	0,80	0,0234
	σ_v	0,32	0,0280
Meishan	σ_H	0,14	0,0511
	σ_h	-0,19	0,0253
	σ_v	-0,09	0,0282
Ekou	σ_H	5,61	0,0565
	σ_h	3,55	0,0198
	σ_v	0,45	0,0312
Jinchuan	σ_H	0,10	0,0507
	σ_h	-0,02	0,0200
	σ_v	-0,21	0,0254

4. Estados Unidos (Zoback y Healy 1992):

El estudio analiza la zona de Cajon Pass en el estado de California donde la falla de San Andrés es parte importante del análisis tectónico relacionado.

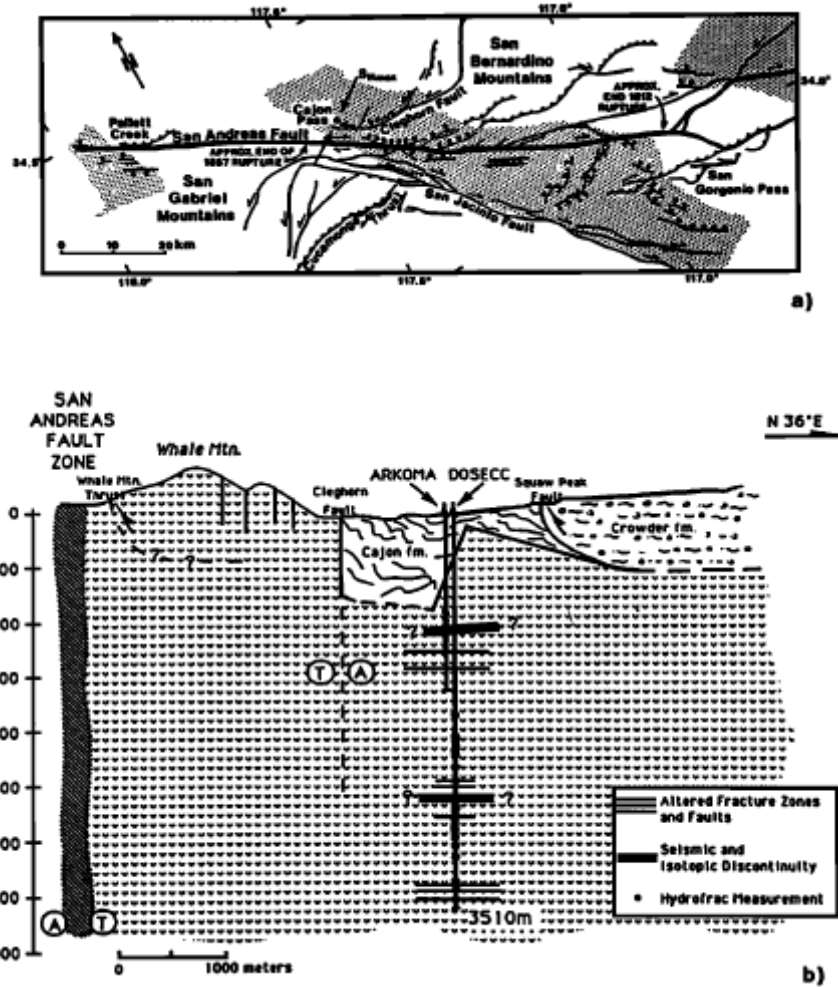


Figura 2-40. Lugar geográfico donde se realizan las mediciones, Estados Unidos (Zoback y Healy 1992).

La orientación del esfuerzo horizontal máximo es de $N57^{\circ}E \pm 19$ para las profundidades desde los 1.75 [km] hasta los 3.5 [km] °.

La línea oblicua en la Figura 2-41 representa al esfuerzo vertical establecido por la densidad de la roca. De la figura se establece que el esfuerzo horizontal mínimo es sustancialmente menor que el esfuerzo vertical, excepto en las mediciones cercanas a los 2100 [m]. En el caso de las mediciones del esfuerzo horizontal mayor, éstas siempre son mayores al esfuerzo vertical.

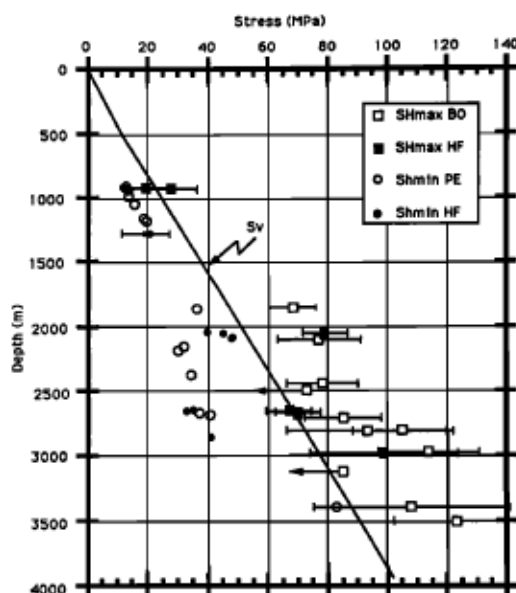


Figura 2-41. Esfuerzos horizontales en función de la profundidad, Estados Unidos (Zoback y Healy 1992).

Se concluye que las magnitudes de los esfuerzos son consistentes con el modelo propuesto para el sector, donde se encuentra la falla de San Andrés.

2.6.4. Resumen

Se presenta a continuación una tabla resumen con todos los tensores expuestos anteriormente.

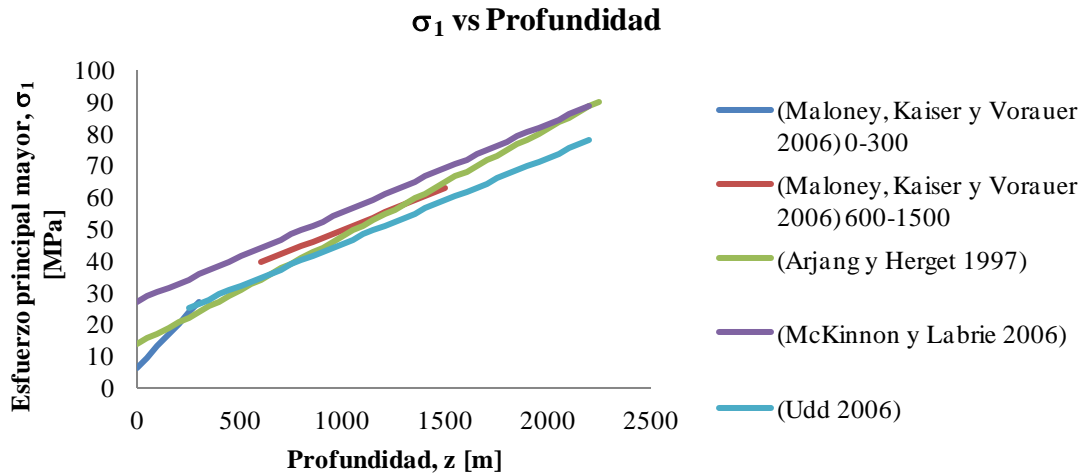
Tabla 2-8. Resumen de los esfuerzos principales.

País, Región	Prof [m]	σ_1 [MPa]		σ_2 [MPa]		σ_3 [MPa]		Autor	Observaciones
		Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]		
Canadá	0-300	5,768	0,071	3,287	0,043	0,000	0,034	(Maloney, Kaiser y Vorauer 2006)	s1:NE-SW s3: Vertical
Canadá	600-1.500	23,636	0,026	17,104	0,016	1,066	0,020	(Maloney, Kaiser y Vorauer 2006)	s1:NE-SW s3: Vertical
Canadá	0-2.250	13,500	0,034	8,000	0,023	3,000	0,018	(Arjang y Herget 1997)	s1: NE-SW s2: NW-SE s3: Vertical
Canadá	0-2.190	27,010	0,028	16,350	0,028	0,000	0,028	(McKinnon y Labrie 2006)	Regresión entre los esfuerzos mayor - menor e intermedio-menor
Canadá	250-2200	18,288	0,027	15,293	0,015	7,468	0,013	(Udd 2006)	Comparación entre relaciones lineales y logarítmicas

Tabla 2-9. Resumen de los esfuerzos normales.

País, Región	Prof [m]	σ_H [MPa]		σ_h [MPa]		σ_v [MPa]		Autor	Observaciones
		Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]		
Canadá	250-2200	-	-	-	-	8,189	0,017	(Udd 2006)	Comparación entre relaciones lineales y logarítmicas
Chile	50-750	2,708	0,056	0,806	0,049	-1,110	0,050	(Chacón 1988)	-
Alemania	500-8.600	15,000	0,038	5,000	0,020	0,000	0,028	(Brudy, y otros 1997)	σ_H : N160°± 10°E
China Xincheng	205-310	-0,440	0,059	0,440	0,031	-0,070	0,028	(Cai, y otros 2000)	σ_H : NWW-SEE
China Linglong	250-570	0,720	0,059	0,800	0,023	0,320	0,028	(Cai, y otros 2000)	σ_H : NWW-SEE
China Meishan	342-420	0,140	0,051	-0,190	0,025	-0,090	0,028	(Cai, y otros 2000)	σ_H : NW-SE
China Ekou	118-310	5,610	0,057	3,550	0,020	0,450	0,031	(Cai, y otros 2000)	σ_H : NNW-SSE
China Jinchuan	580-790	0,010	0,051	-0,020	0,020	-0,021	0,025	(Cai, y otros 2000)	σ_H : NEE-SWW

Además se muestra los gráficos para los esfuerzos principales y normales.



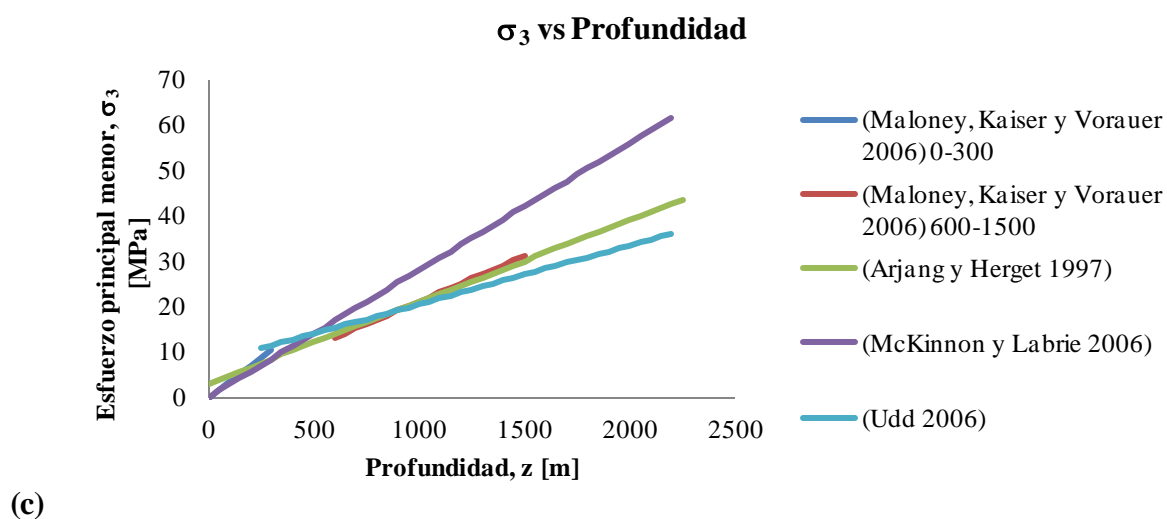
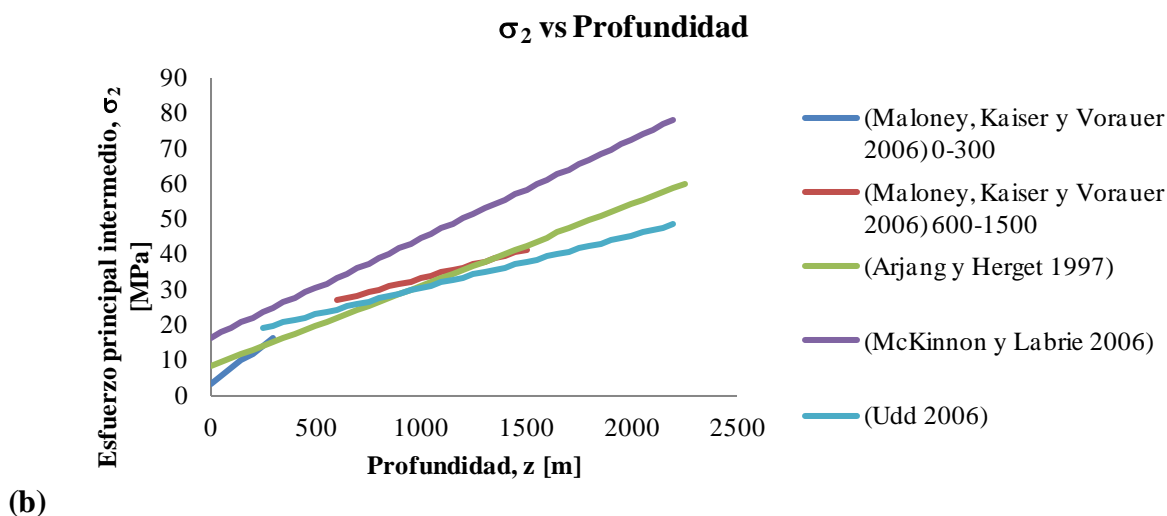
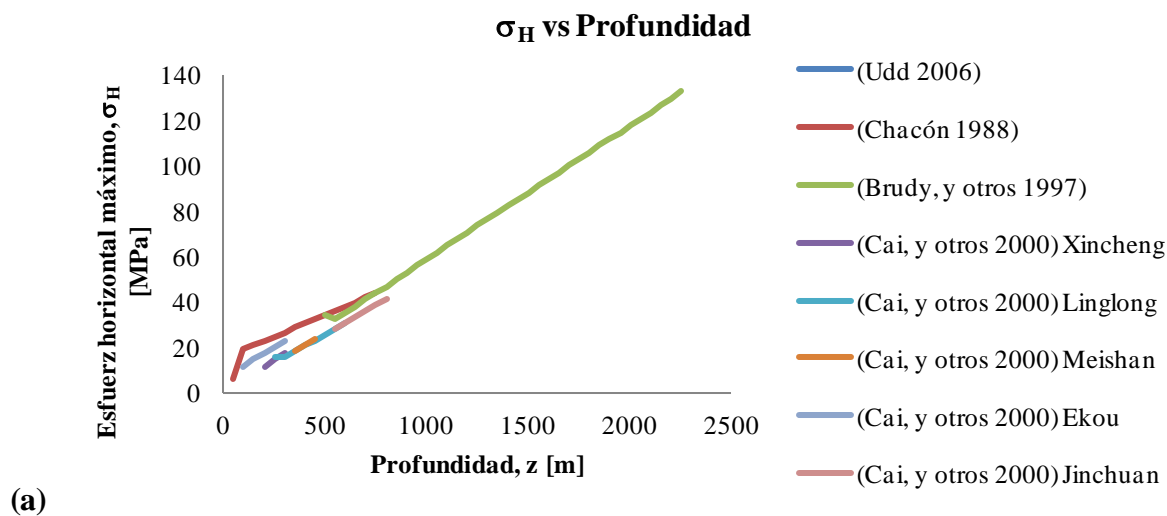


Figura 2-42. Es fuerzas principales (a) mayor, (b) intermedio y (c) menor.



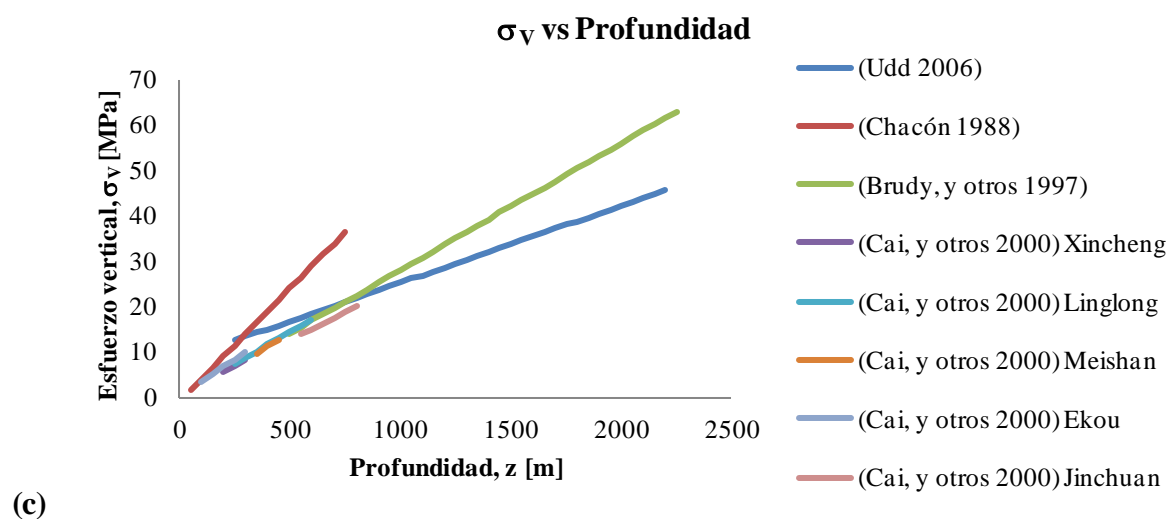
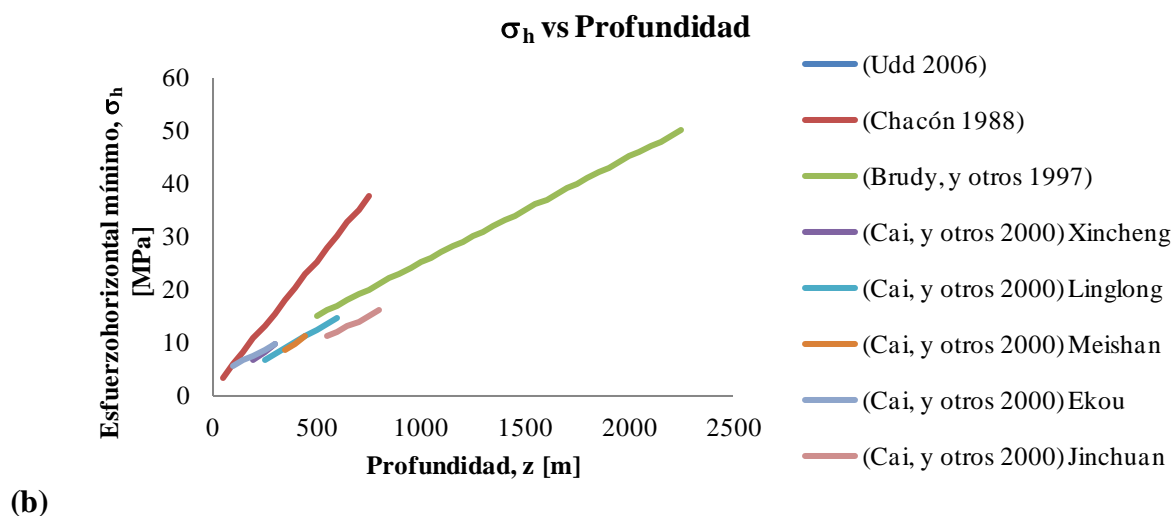


Figura 2-43. Esfuerzos (a) horizontal máximo, (b) horizontal mínimo y (c) vertical.

La mayoría de los modelos propuestos utilizan a los esfuerzos principales para establecer las regresiones. Esto es un error conceptual, ya que en realidad los esfuerzos principales cambian de dirección a lo largo de la profundidad por lo que al comparar estos no se puede obtener la visión completa del tensor. Es por esto que es mejor comparar los esfuerzos normales en una dirección particular ya que así se puede establecer de mejor manera el comportamiento del tensor en toda la profundidad.

3. METODOLOGÍA

El estudio se realiza en cuatro pasos generales que son:

1. Recopilación y análisis de la base de datos,
2. Proposición de una metodología de ajuste estadístico de un modelo de esfuerzos in-situ en función de la profundidad para distintas bases de datos ,
3. Comparar las tendencias establecidas con la metodología de ajuste propuesta y otros modelos de la literatura
4. Cuantificar el impacto de los esfuerzos in-situ en el diseño de pilares, caserones, excavaciones y tipo de soporte a utilizar en galerías.

3.1. Base de datos

La base de datos recolectadas contiene información de las mediciones realizadas en distintos yacimientos del país y cercanos a éste. La información que tiene cada medición es la siguiente:

Tabla 3-1. Información de cada medición en base de datos.

Información general	<ul style="list-style-type: none"> • Ubicación • Profundidad • Tipo de Medición • Módulo de Young y razón de Poisson
Esfuerzos Principales	<ul style="list-style-type: none"> • Magnitud • Azimut • Inclinación
Componentes de Esfuerzos	<ul style="list-style-type: none"> • Esfuerzos normales en NS, EW y Vertical • Esfuerzos de Corte en EW/NS, EW/V, NS/V

Es necesario unificar la convención de todos los datos para poder trabajar con ellos. La Figura 3-1 presenta la convención utilizada para el tensor de esfuerzos en el análisis. La compresión tiene valor positivo.

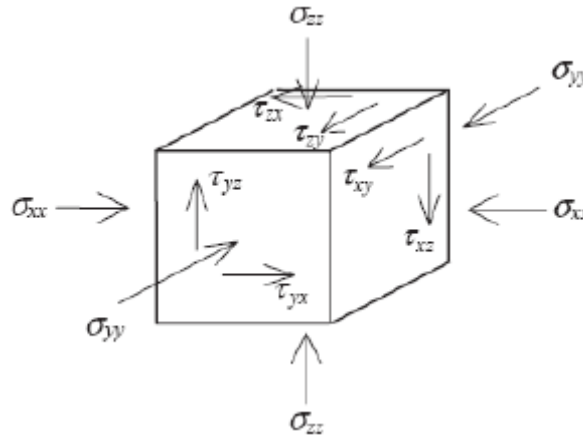


Figura 3-1. Convención para los esfuerzos.

3.1.2. Filtro de la base de datos

Luego de conformar la base de datos se realiza el filtro de la misma, eliminando datos que no contienen toda la información, los datos aberrantes y los anómalos. La mínima información necesaria para no eliminar la medición es: profundidad, componentes de esfuerzos y esfuerzos principales con su respectiva orientación.

Los datos aberrantes son aquellos que no cumplen la condición de que el esfuerzo principal 1 sea mayor que el esfuerzos principal 2 y que este último sea mayor que el esfuerzo principal 3.

En el caso de los datos anómalos estos se eliminan mediante dos filtros, el primero utiliza el criterio de Chauvenet (1863) en el que se analiza el gradiente de la carga litostática (42).

$$\gamma \left[\frac{MPa}{m} \right] = \frac{\sigma_v [MPa]}{z[m]} \quad (42)$$

Este criterio supone que la distribución de los datos es normal. Para utilizarlo se debe calcular la media y la desviación estándar de la muestra, usando la función de la distribución normal se calcula la probabilidad de que un dato tenga el valor de la medición dudosa, esta probabilidad se multiplica por la cantidad de datos en la muestra y sí el resultado es menor a 0.5 se puede eliminar la medición.

En una segunda instancia se realiza una regresión con un límite de confianza de 95% analizando el esfuerzo principal mayor en función del menor. La razón de esta relación se debe a que la condición de borde de las mediciones de esfuerzos in-situ corresponden a falla geológicas en la corteza terrestre, por lo que σ_1 y σ_3 deben estar limitados por la resistencia de las fallas que puede ser representada según el criterio de falla de Morh Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914). Una idea similar fue utilizada por McKinnon y otros (2006) para establecer un modelo de esfuerzos in-situ (Sección 6.2.1). El criterio relaciona estos esfuerzos mediante la ecuación (43):

$$\sigma_1 = \sigma_c + \tan\psi * \sigma_3 \quad (43)$$

$$\sigma_c = \frac{2c * \cos(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)} \quad (44)$$

$$\tan\psi = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)} \quad (45)$$

Donde c corresponde a la cohesión, una constante que representa la resistencia al corte para un esfuerzo normal igual a cero, y ϕ representa al ángulo de fricción.

Para efectuar el filtro se realiza la regresión obteniendo los residuos estandarizados, si éstos son mayores a 2.0 la medición es eliminada de la base de datos. Cabe destacar que los datos eliminados por el primer filtro no son considerados en este segundo filtro.

3.1.3. Análisis de la base de datos

Con la base de datos ya filtrada se realizan los estudios estadísticos de los esfuerzos y la profundidad para conocer cómo se distribuyen en la base de datos, además se analizan las orientaciones de los esfuerzos principales (azimut e inclinación) mediante el software Dips.

Por último, se procede con el análisis de correlación de las variables, donde se observa el comportamiento de los esfuerzos con respecto a la profundidad, buscando tendencias que den relaciones significativas entre estas variables. En esta parte del trabajo se utiliza Microsoft Excel.

3.2. Método propuesto para ajustar un modelo de esfuerzos in-situ en función de la profundidad

El objetivo es ajustar un modelo lineal de los esfuerzos in situ en función de la profundidad a partir de la base de datos. Es importante mencionar que se ajusta un modelo lineal por la suposición de que la roca tiene un comportamiento CHILE, es decir, la roca es Continua, Homogénea, Isótropa, Lineal y Elástica.

3.2.2. Análisis exploratorio de la base de datos

El primer análisis que se realiza consiste en conocer el comportamiento de las orientaciones de los esfuerzos principales en función de la profundidad y de la ubicación geográfica. Para esto se utiliza el software Dips y además Microsoft Excel para establecer las tendencias.

Otro factor importante a analizar es el comportamiento de los esfuerzos horizontales, para esto se realizan estimaciones de la razón de esfuerzos k tanto para la orientación EW como la NS. Adicionalmente, se analiza la tendencia de la razón entre los esfuerzos horizontales.

Parte importante del análisis se basa en relacionar los esfuerzos principales mayor y menor mediante el criterio de Mohr-Coulomb. Además, se estudia la dependencia de los invariantes con la profundidad, cuyas fórmulas utilizadas se muestran en la ecuaciones (46), (47) y (48).

$$I_1 = \sigma_{EW} + \sigma_{NS} + \sigma_V \quad (46)$$

$$I_2 = \sigma_{EW} * \sigma_{NS} + \sigma_{NS} * \sigma_V + \sigma_V * \sigma_{EW} - (\tau_{EW/NS}^2 * \tau_{EW/V}^2 * \tau_{NS/V}^2) \quad (47)$$

$$I_3 = \sigma_{EW} * \sigma_{NS} * \sigma_V + 2 * \left(\frac{\tau_{EW}}{NS} * \frac{\tau_{EW}}{V} * \frac{\tau_{NS}}{V} \right) - (\sigma_{EW} * \tau_{NS/V}^2 + \sigma_{NS} * \tau_{EW/V}^2 + \sigma_V * \tau_{EW/NS}^2) \quad (48)$$

Se estudia la dependencia del parámetro b (49), explicado en la sección 2.5, con la profundidad y la ubicación geográfica.

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (49)$$

Todos los análisis anteriores permiten comprender de una mejor manera la base de datos para establecer el ajuste del modelo. Sin embargo, para establecer el ajuste estadístico del modelo se consideran las tendencias del primer invariante, el criterio de Mohr-Coulomb y la razón de esfuerzos b.

3.2.3. Ajuste estadístico del modelo

Posterior a la etapa de análisis se propone el siguiente modelo para el tensor de esfuerzos:

$$\sigma_{EW} = a_1 * z + b_1 \quad (50)$$

$$\sigma_{NS} = a_2 * z + b_2 \quad (51)$$

$$\sigma_V = a_3 * z + b_3 \quad (52)$$

$$\sigma_{EW/NS} = a_4 * z + b_4 \quad (53)$$

$$\sigma_{EW/V} = a_5 * z + b_5 \quad (54)$$

$$\sigma_{NS/V} = a_6 * z + b_6 \quad (55)$$

Para el ajuste del modelo se define la función objetivo a partir de los errores cuadráticos de los esfuerzos principales, teniendo en cuenta el número de parámetros que tienen cada uno de los modelos.

El criterio de Akaike (AIC) (1973), presentado en la ecuación (56), incorpora en el mismo criterio tanto el número de parámetros como el error entre el modelo y los datos.

$$AIC = n * \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2 * K \quad (56)$$

Donde:

- n : número de observaciones.
- K : número de parámetros en el modelo.
- \ln : logaritmo natural.
- $RSS = \sum_{i=1}^n (Valor\ medido_i - Valor\ estimado_i)^2$

En este caso el valor de RSS del modelo se define como la suma de los RSS de cada esfuerzo principal (57).

$$RSS_{Modelo} = RSS_{\sigma_1} + RSS_{\sigma_2} + RSS_{\sigma_3} \quad (57)$$

Para optimizar la función objetivo se varían los parámetros del tensor de esfuerzos (50 - 55) de manera de minimizar el AIC definido anteriormente con el complemento de la planilla electrónica de Excel, Solver. Luego, el modelo que presenta el menor AIC es el de mejor ajuste a los datos. Adicionalmente, se inspeccionan visualmente las tendencias de las variables definidas en la sección 3.2.2

Como parte del procedimiento de optimización se establecen restricciones a las tendencias en profundidad del primer invariante, el criterio de Mohr-Coulomb y la razón de esfuerzos b. A continuación se explica cada una de ellas.

1. Criterio de Mohr-Coulomb (43; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**): Se restringen los valores de σ_c y $\tan\psi$ en un intervalo definido por la regresión entre s_1 y s_3 , con el 95% de confianza.
2. Primer Invariante (58): Se realiza una regresión lineal entre I_1 y z :

$$I_1 = a_7 * z + b_7 \tag{58}$$

De esta manera se obtienen los rangos superior e inferior, usando el intervalo con el 95% de confianza, para los parámetros a_7 y b_7 .

3. Razón de esfuerzos b: En este caso se utiliza el histograma de frecuencia de esta variable en la base de datos. Se escoge el rango que contiene el 50% (aproximadamente) de los datos, la media del parámetro debe pertenecer en este rango.

Se presenta la Figura 3-2 para mostrar la elección del rango de la media de la razón de esfuerzos b, la media de la muestra pertenece a la columna de color naranja y se elige el rango entre 0.2 y 0.5 que suma el 50% de los datos. Además esto está complementado con la información obtenida con la relación entre la razón de esfuerzo b y la profundidad.

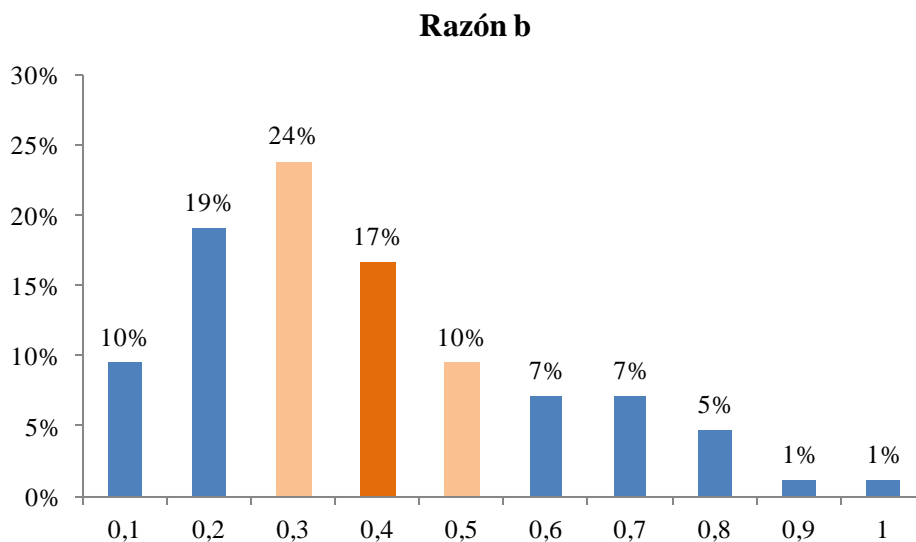


Figura 3-2. Explicación de la elección del rango para la razón de esfuerzos b.

En adición a estas restricciones, se definen tres tipos de análisis, donde la cantidad de parámetros a optimizar depende de cada alternativa.

1. Todos los parámetros sin restricciones: en este caso los parámetros de los esfuerzos de corte y normales (50 - 55) quedan sin restricciones y pueden variar al optimizar el modelo. Total de parámetros: 12.
2. Esfuerzo vertical con la intersección como valor nulo: Las constantes de los esfuerzo de corte y normales horizontales quedan sin restricciones, el esfuerzo vertical solo tiene el valor del gradiente libre. Total de parámetros: 11.
3. Esfuerzo vertical definido: En este caso los parámetros de los esfuerzos de corte y esfuerzos normales horizontales quedan sin restricciones. Total de parámetros: 10.

Con las restricciones y diferentes cantidades de parámetros definidos anteriormente, se forman las 6 alternativas presentadas en la Tabla 3-2, que serán comparadas para obtener el modelo final.

Tabla 3-2. Modelos alternativos con sus características y restricciones.

	Restricciones	Parámetros libres
Modelo 1	Si	12
Modelo 2	Si	11
Modelo 3	Si	10
Modelo 4	No	12
Modelo 5	No	11
Modelo 6	No	10

Las orientaciones se calculan con el complemento Solver del software Excel. Para esto se calculan los vectores propios de la matriz presentada en la sección 2.1 del capítulo de Antecedentes.

3.3. Ajuste del modelo en otras bases de datos

En este punto se procede a utilizar la misma metodología presentada en 2 bases distintas: 1. En la base de datos de la mina número 6, eliminada en la primera etapa del análisis de la base de datos, y también en 2. Una base de datos canadiense.

Cabe destacar que se realiza toda la metodología desde el filtro de la base de datos hasta la elección del modelo, realizando los principales análisis que entregan el modelo definitivo, que corresponden a: filtro de la base de datos, definición de las restricciones, variables y función objetivo, definición del mejor modelo y cálculo de las orientaciones asociadas.

3.4. Comparación con otros modelos

En esta sección se procede a comparar de manera cualitativa los modelos ajustados con la metodología propuesta con otros modelos disponibles en la literatura. Para esto se contrastan: los esfuerzos normales y/o principales, la razón de esfuerzos k , el primer invariante de esfuerzos, el criterio de Mohr - Coulomb y el parámetro b .

3.5. Impacto de los esfuerzos in situ en el diseño minero.

El objetivo de este estudio es ver la incidencia de los esfuerzos In Situ en el diseño de las estructuras relevantes en la minería subterránea. Para esto se analizan diferentes parámetros en función de la razón de esfuerzos k .

La Tabla 3-3 presenta los parámetros analizados para cada estructura minera.

Tabla 3-3. Parámetros a analizar en función de k para las diferentes estructuras mineras.

Es estructura	Parámetro a analizar
Pilares	Esfuerzo que actúa sobre el pilar normalizado por el esfuerzo vertical, σ_p/σ_v
Caserones	Sobre excavación de la pared colgante, ELOS
Túneles	Zona plástica, R_p , y tipo de soporte

A continuación se presenta la metodología utilizada para cada estructura minera.

3.5.2. Pilares

En este caso se utiliza la fórmula definida por Coates (1981) para pilares profundos (59).

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_v} = \frac{2r \left(1 + \frac{h}{L}\right) - k \frac{h}{L} \left(1 - \nu_{rm} + \bar{\nu}_p \frac{1 - \nu_p^2 E_{rm}}{1 - \nu_{rm}^2 E_p}\right)}{\frac{h}{L} \frac{1 - \nu_p^2 E_{rm}}{1 - \nu_{rm}^2 E_p} + 2 * (1 - r) \left(1 + \frac{h}{L}\right) + 2r \frac{W_o}{L} \frac{1 - \bar{\nu}_{rm}}{\pi}} \quad (59)$$

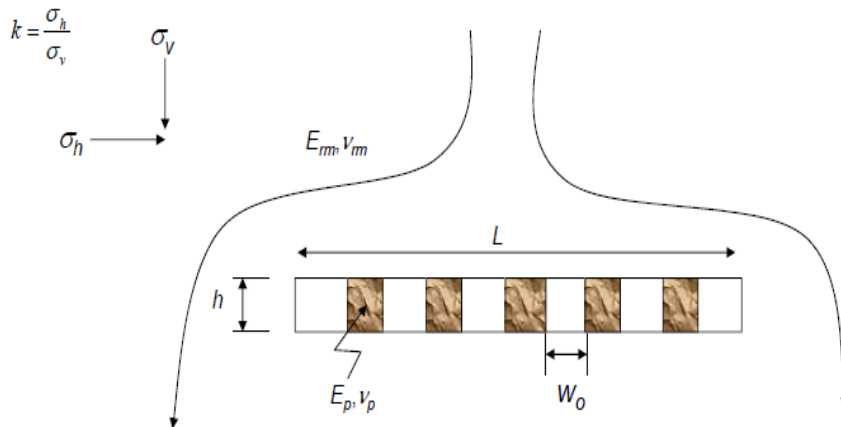


Figura 3-3. Representación de los parámetros para pilares profundos según la fórmula de Coates (1981).

Donde el parámetro $\bar{\nu}$ corresponde a (Coates 1981):

$$\bar{\nu} = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (60)$$

Siendo ν el coeficiente de Poisson.

Los valores que se utilizan se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Parámetros que se utilizan en el cálculo de la incidencia para los pilares.

Parámetro	Valor	Unidad
h	10	[m]
L	100	[m]
E_{rm}	75	[GPa]
E_p	50	[GPa]
ν_{rm}	0.25	

v_p	0.25	
W_o	10	[m]
W_p	3	[m]
R	0.77	
K	1.31	
\bar{v}_{rm}	0.33	
\bar{v}_p	0.33	

Se analizan para tres escenarios diferentes:

1. Diferentes h/L: Se analizan valores para esta razón que van desde el 0.2 hasta el 2 y se mantienen los otros parámetros fijos.
2. Diferentes r: Se analiza para valores de 0.1 al 0.9 y se mantienen los otros parámetros fijos.
3. Diferentes Erm/Epm: Se analizan valores para esta razón que van desde 0.5 a 8 y se mantiene el resto de los parámetros fijos.

3.5.3. Caserones

En el caso de los caserones se realiza un modelo elástico en el software Phase2 y se busca el área de sobre excavación de la pared colgante utilizando el criterio en el que esta área queda definida por el σ_3 menor a 0 [MPa].

Al obtener el área para cada k se puede calcular el ELOS definido por Clark y Pakalnis (1997) y por ende la tendencia asociada.

$$ELOS [m] = \frac{\text{Área de sobre excavación de la pared colgante [m}^2]}{\text{Largo de la pared colgante [m]}} \quad (61)$$

El parámetro ELOS cuantifica la sobre excavación de las paredes del caserón obteniendo así la profundidad de falla promedio (Figura 3-4).

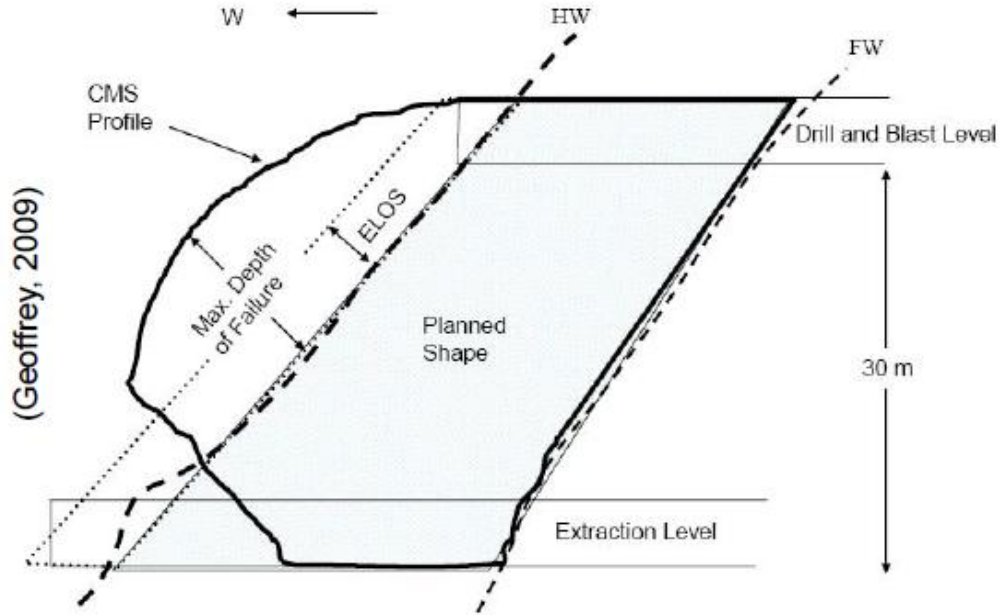


Figura 3-4. Representación de ELOS (Geoffrey, 2009).

Las dimensiones del caserón a utilizar son las que se presentan en la Tabla 3-5, cabe destacar que estas mediciones promedio de distintos caserones en Canadá:

Tabla 3-5. Dimisiones del caserón a utilizar.

	Dimensión	Unidad
Alto	32	[m]
Ancho	7,2	[m]
Largo	20,1	[m]
Largo Pared Colgante	36,6	[m]
Dip	60,9	[grados]
Profundidad	778,4	[m]

Las características del material que se utiliza se basan en el criterio generalizado de Hoek y Brown (1988) presentada en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Características del material utilizado en el modelo lineal, caserón.

	Valor	Unidad
Razón de Poisson	0,25	
Módulo de Young	10.400	[MPa]
UCS	160	[MPa]
mb	2,88	
a	0,50	
s	0,012	

3.5.4. Túneles

En este caso se analiza la zona fracturada en función del k , utilizando la ecuación (62):

$$R_p = R \left\{ \frac{2[p(\tan\psi_m - 1) + \sigma_{cm}]}{[p_i(\tan\psi_m - 1) + \sigma_{cm}](1 + \tan\psi_m)} \right\}^{\frac{1}{\tan\psi_m - 1}} \quad (62)$$

Donde:

- R : Radio del túnel
- R_p : Radio zona fracturada
- $\tan\psi_m$ y σ_{cm} : constantes del criterio de Mohr-Coulomb.

Uno de los supuestos relevantes en el análisis es definir el estado de esfuerzos p como sigue.

$$p = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v(1 + k)}{2} \quad (63)$$

Se muestra la definición de los parámetros utilizados en la fórmula anterior.

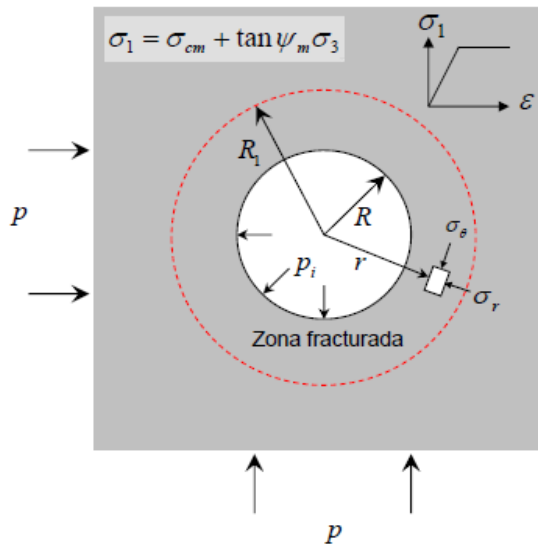


Figura 3-5. Representación de los parámetros de la función para la excavación circular. (J. Vallejos 2013)

En este caso se analizan dos escenarios para una profundidad de 700[m] y con una presión interna $p_i = 0$ estableciendo que no existe soporte en la excavación.

1. Diferentes macizos rocosos: se establecen diferentes parámetros para σ_{cm} y $\tan\psi_m$ correspondientes a macizos de buena, regular y mala calidad (Hoek y Brown 1997).

Tabla 3-7. Parámetros para los tres tipos de macizos rocosos (Hoek y Brown 1997).

Macizo	c [MPa]	σ_{cm} [MPa]	ϕ_m [°]	$\tan \psi_m$
Buena	13	64,35	46	6,13
Regular	3,5	12,89	33	3,39
Muy Mala	0,55	1,69	24	2,37

2. Diferentes razón σ_{cm}/σ_v : en este caso se tiene el valor de esfuerzo vertical a 700[m] y se multiplica por esta razón para obtener el valor de σ_{cm} . El valor del parámetro $\tan \psi_m$ queda definido por el encontrado en el modelo de esfuerzos para Chile.

Es importante mencionar que para realizar la comparación se utiliza como parámetro de zona fracturada al porcentaje relativo al radio del túnel R, es decir, el porcentaje presentado muestra la magnitud de la zona fracturada en función del radio del túnel.

$$\% \text{ relativo a } R = \frac{(R_p - R)}{R} \tag{64}$$

3.5.5. Soporte

El parámetro SRF está asociado al efecto que puede tener el tensor de esfuerzos en el macizo rocoso y su valor depende de las características de este.

(b) Macizos rocosos competentes, problemas asociados a concentraciones de esfuerzos				
Caso	Condición	UCS/ σ_1	σ_3/UCS	SRF
H	Estado de esfuerzos de magnitud baja, estructuras superficiales abiertas	> 200	< 0,01	2,5
I	Estado de esfuerzos moderados, condición de esfuerzos favorable	200 – 10	0,01 – 0,3	1,0
J	Estado de esfuerzos de magnitud alta, estructuras bien trabadas (usualmente favorable para la estabilidad, aunque puede presentar problemas en las cajas)	10 – 5	0,3 – 0,4	0,5 – 2,0
K	Macizo rocoso que presenta lajamientos moderados 1 hora después del desarrollo de la excavación subterránea	5 – 3	0,5 – 0,65	5 – 50
L	Macizo rocoso que presenta lajamientos e incluso estallidos de roca poco después del desarrollo de la excavación subterránea	3 – 2	0,65 - 1,0	50 – 200
M	Macizos rocosos que sufren notorios estallidos de roca y deformaciones inmediatas después del desarrollo de la excavación subterránea	< 2	> 1	200 - 400

Figura 3-6. Relación entre la condición de la roca y el SRF .

En este caso para obtener el SRF en función del k se utiliza la tabla establecida por (Barton 2002) interpretada en la Figura 3-7 por (J. Vallejos, Clasificación del macizo rocoso 2013), que relaciona el SRF con el UCS y el esfuerzo principal In situ. En este caso el UCS se toma igual a 160 [MPa], tomando este valor a partir de mediciones realizadas en caserones de una mina chilena, y el esfuerzo principal depende del k y del esfuerzo vertical.

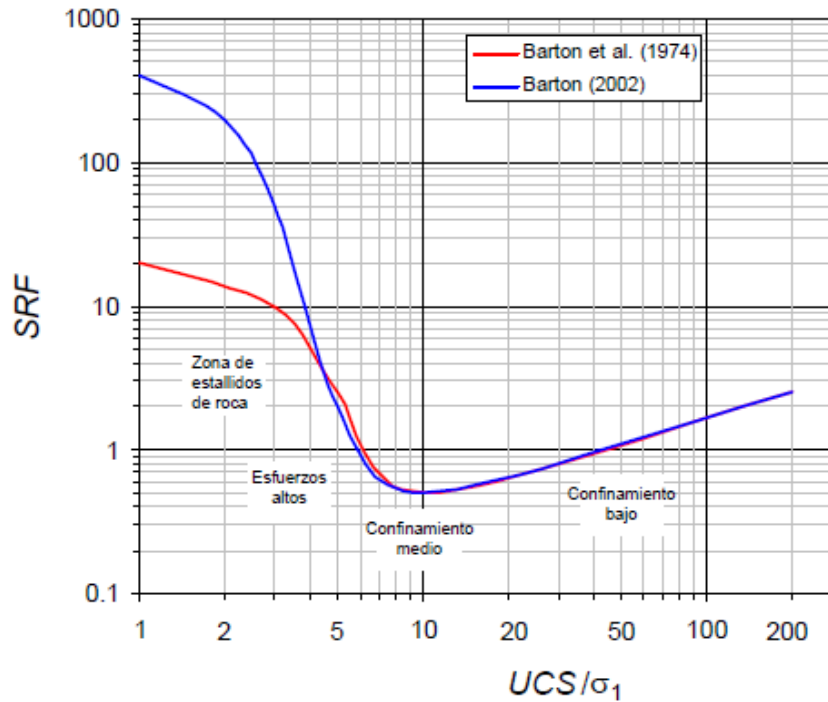


Figura 3-7. Relación entre SRF y el UCS/σ_1 (J. Vallejos 2013)

Tomando la línea azul como base se gráfica la razón entre el UCS y el Sigma 1 obteniendo el SRF respectivo.

En el caso del tipo de soporte se debe calcular el Q de Barton (1974) (1993). Este sistema de clasificación se calcula de la siguiente manera.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} = Q' * \frac{J_w}{SRF} \tag{65}$$

Donde:

- RQD: Calidad de la roca (%)
- J_n : Número de sistemas de discontinuidades
- J_r : Número de rugosidad de discontinuidades
- J_a : Número de alteración de discontinuidades
- J_w : Agua en discontinuidades
- SRF: Factor de reducción por esfuerzos

Se analizan tres tipos de rocas que se diferencian en el GSI (Hoek y Brown 1997) y por lo tanto en su calidad, este parámetro que entrega el valor de Q' con la siguiente relación y a partir se obtiene Q.

$$GSI = 9 * \ln(Q') + 44 \tag{66}$$

Los tipos de rocas son:

Tabla 3-8. Tipos de rocas utilizados en el diseño de soporte.

Tipo de roca	GSI
Buena	70
Regular	50
Mala	30

Estos datos fueron sacados de la Figura 3-8. Tipos de rocas dependiendo del valor del GSI.que describe el tipo de roca dependiendo del valor del GSI.

Descripción	GSI	ΔGSI
Roca muy buena	81 – 100	± 5
Roca buena	61 – 80	± 5
Roca regular	41 – 60	± 5
Roca mala	21 – 40	± 6
Roca muy mala	0 – 21	± 8

Figura 3-8. Tipos de rocas dependiendo del valor del GSI

Para cada tipo de roca y valor de k se establece el Q correspondiente que entrará en el siguiente gráfico entregando si es que se necesita pernos y/o shotcrete además del espaciamiento de los primeros y el grosor del segundo.

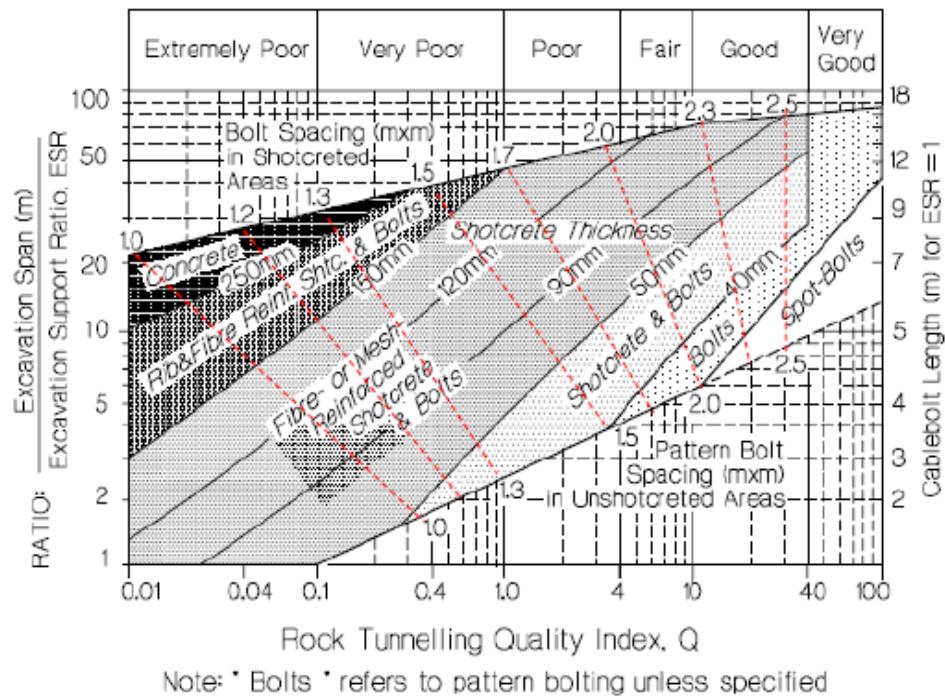


Figura 3-9. Tipo de soporte (Grimstad y Barton 1993).

Además, el gráfico depende de los valores del Span y el ESR . El valor del Span según Hoek depende del ancho de la galería o del espacio entre la frente del túnel y el soporte, cómo en este caso se analiza el valor del k que es perpendicular a la galería se utiliza el ancho de ésta.

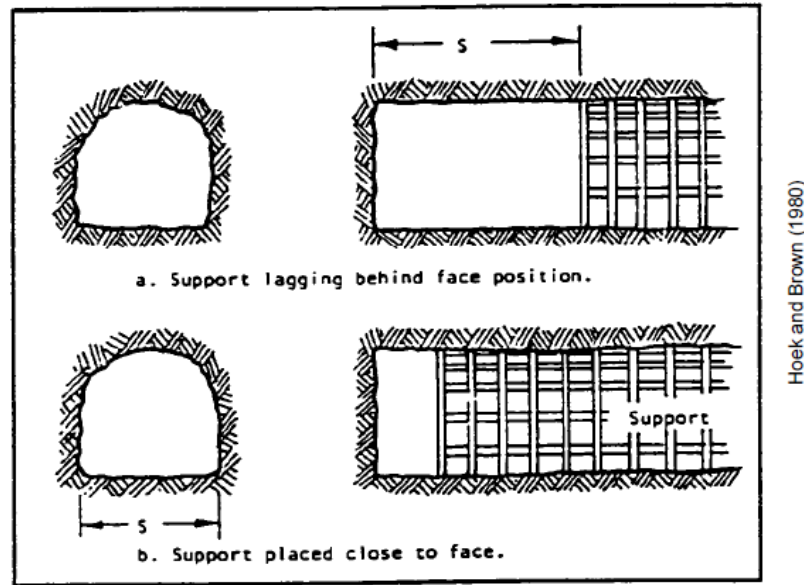


Figura 3-10. Definición del Span.

El valor del ESR dependerá de la función de la excavación y va de valores entre 1.0 (excavaciones con entrada de personal y definitivas) hasta 5.0 (excavaciones sin entrada de personal) (Barton, Lien y Lunde, Engineering clasification of rockmasses fot the design of tunnel support 1974) .

Con estos parámetros también se determina el largo del perno con la siguiente ecuación (67).

$$Largo Perno = 2 + \frac{(0.15 * Span)}{ESR} \quad (67)$$

3.6. Resumen

Se presenta un resumen de la metodología en el siguiente diagrama.

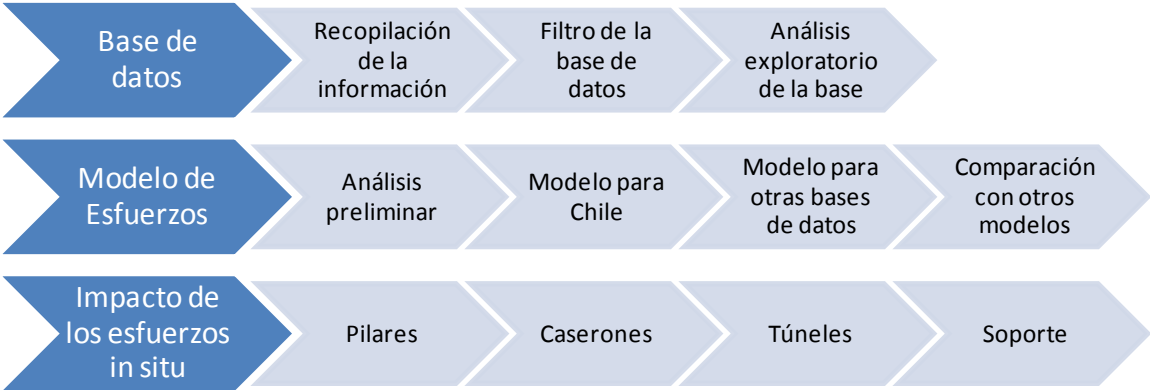


Figura 3-11. Diagrama de la metodología utilizada.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BASE DE DATOS

Establecida la metodología de trabajo para la base de datos en el capítulo 3.1 se procede a revisar todos los análisis y resultados que se realizan.

4.1. Filtro de la base de datos

La base de datos inicial cuenta con 343 datos repartidos en 12 minas de Chile, Perú y Argentina (Tabla 4-1).

Tabla 4-1. Número de datos base inicial.

	País	N° Datos
Mina 1	Perú	13
Mina 2	Argentina	1
Mina 3	Chile	21
Mina 4	Chile	49
Mina 5	Chile	3
Mina 6	Chile	153
Mina 7	Chile	2
Mina 8	Chile	4
Mina 9	Chile	47
Mina 10	Chile	37
Mina 11	Chile	3
Mina 12	Chile	4

4.1.2. Base de datos completa

Se muestra a continuación para la base de datos completa la cantidad de datos eliminados por los tres filtros (Tabla 4-2).

Tabla 4-2. Datos eliminados por los tres filtros, primer análisis.

	País	1° Filtro	2° Filtro	3° Filtro
Mina 1	Perú	-	-	-
Mina 2	Argentina	1	-	-
Mina 3	Chile	15	-	-
Mina 4	Chile	47	-	-
Mina 5	Chile	3	-	-
Mina 6	Chile	24	4	6
Mina 7	Chile	-	-	-
Mina 8	Chile	-	-	-
Mina 9	Chile	-	-	-
Mina 10	Chile	4	4	4
Mina 11	Chile	-	-	-
Mina 12	Chile	-	-	-

Al analizar la tendencia entre el sigma V y la profundidad (Figura 4-1) se logra una correlación muy baja y un valor para el peso específico muy alejado del 0,027 [MPa/m] que se espera como valor típico para este parámetro. Es por esto que se elimina la Mina 6, que representa casi el 50% de la base de datos total, para así conocer el comportamiento del resto de los datos.

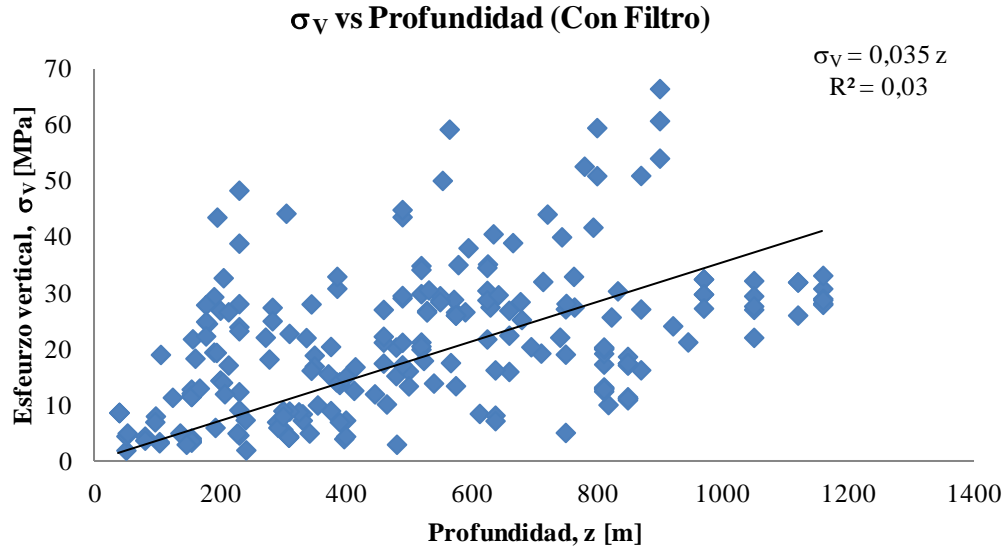


Figura 4-1. Regresión sigma V y profundidad, primer análisis.

4.1.3. Base de datos excluyendo la mina 6

El segundo análisis tiene los siguientes datos eliminados por los tres filtros (Tabla 4-3).

Tabla 4-3. Datos eliminados por los tres filtros, segundo análisis.

	País	1° Filtro	2° Filtro	3° Filtro
Mina 1	Perú	-	-	-
Mina 2	Argentina	1	-	-
Mina 3	Chile	15	-	-
Mina 4	Chile	47	-	-
Mina 5	Chile	3	-	-
Mina 7	Chile	-	-	-
Mina 8	Chile	-	1	-
Mina 9	Chile	-	7	-
Mina 10	Chile	-	-	7
Mina 11	Chile	-	-	-
Mina 12	Chile	-	-	-

En este escenario se obtienen mejores correlaciones que en el análisis anterior además de valores de peso específicos más cercanos al valor típico 0,027 [MPa/m] (Figura 4-2).

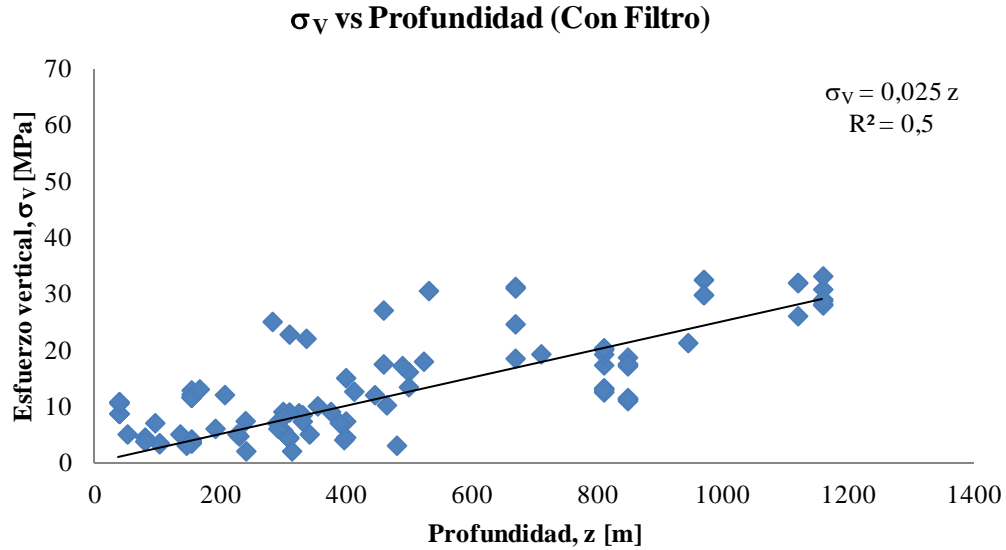


Figura 4-2. Regresión sigma V vs profundidad, segundo análisis.

Con respecto a los esfuerzos horizontales se aprecia que el esfuerzos Norte - Sur es menor hasta los 600 [m] y a mayores profundidades se observa que pasa por sobre el esfuerzo Este - Oeste. Se distingue que los valores entre estos esfuerzos son muy similares entre sí para toda profundidad (Figura 4-3).

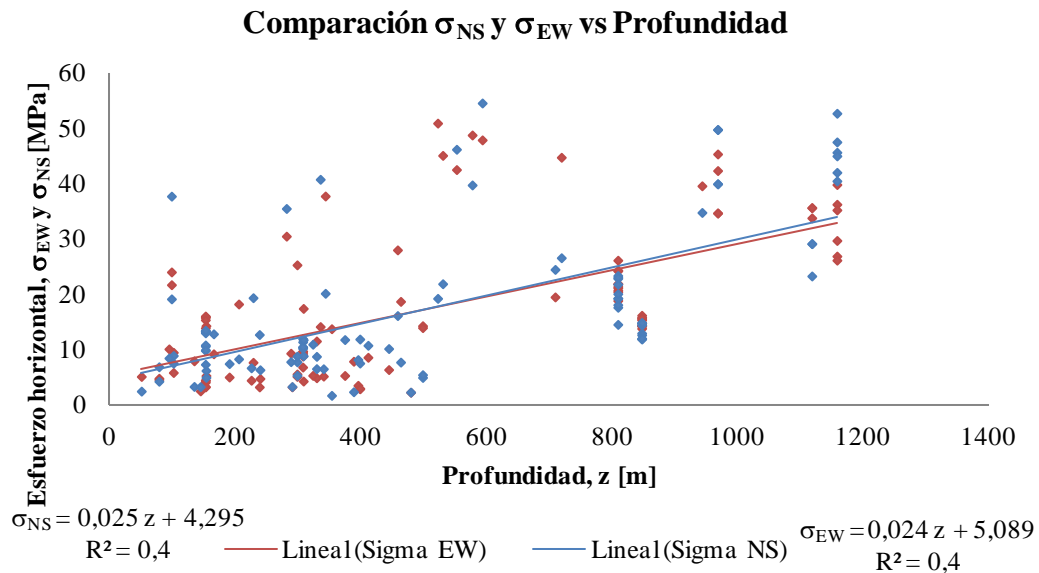


Figura 4-3. Regresión esfuerzos horizontales vs profundidad, segundo análisis.

Luego de conocer estos datos es importante evaluar el comportamiento de la mina 6 en la base de datos. Bajo este punto, se aprecia que los datos de esta mina entregan menores correlaciones y valores alejados a los típicos, por lo que se concluye que sus mediciones están contaminadas con esfuerzos inducidos o con la geología local lo que podría inducir a error en el ajuste del modelo, por lo que se eliminan de la base de datos.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BASE DE DATOS

También es necesario destacar que la mina 1 se encuentra ubicada en Perú por lo que también se excluye del análisis, ya que se encuentra geográficamente alejada de las minas chilenas.

4.1.4. Base de datos de minas chilenas excluyendo la mina 6

En este último análisis se eliminan los siguientes datos (Tabla 4-4).

Tabla 4-4. Datos eliminados por los tres filtro, tercer análisis.

	País	1° Filtro	2° Filtro	3° Filtro
Mina 3	Chile	15	-	-
Mina 4	Chile	47	-	-
Mina 5	Chile	3	-	-
Mina 7	Chile	-	-	-
Mina 8	Chile	-	-	-
Mina 9	Chile	-	7	-
Mina 10	Chile	-	-	8
Mina 11	Chile	-	-	-
Mina 12	Chile	-	-	-

Con todos los filtros realizados se aprecia que con respecto al esfuerzo vertical el valor del peso específico coincide con el valor típico de 0.027 [MPa/m] (Figura 4-4).

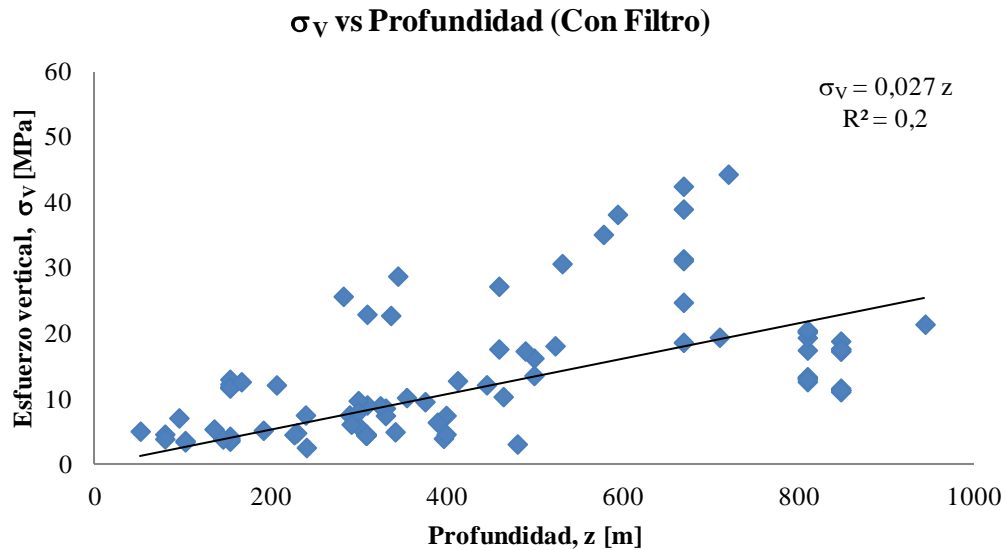


Figura 4-4. Regresión sigma V y profundidad con filtro, tercer análisis.

Con respecto a los esfuerzos horizontales, se tiene que en este caso el esfuerzo NS es mayor desde los 200 [m] aproximadamente, sin embargo (y como se nota también en la Figura 4-3), los valores para ambos son similares (Figura 4-5).

Comparación σ_{NS} y σ_{EW} vs Profundidad

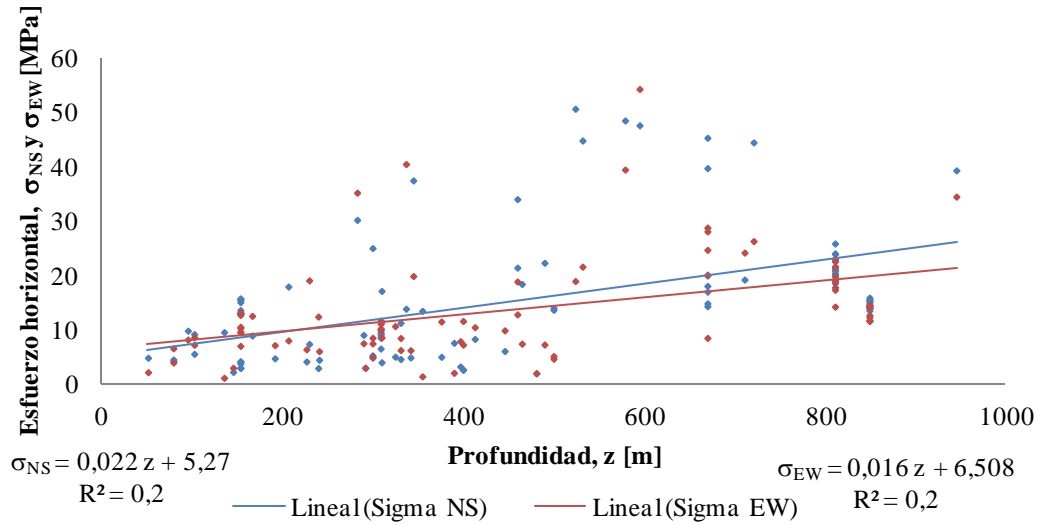


Figura 4-5. Regresión esfuerzos horizontales vs profundidad, tercer análisis.

Esta última base de datos es la que se utilizará para el resto del estudio.

4.2. Análisis de la base de datos

Teniendo filtrada la base de datos se pueden analizar las tendencias para el tensor de esfuerzos y los esfuerzos principales, además de las orientaciones de éstos últimos.

4.2.2. Información general

En primera instancia se analiza la profundidad de las mediciones y la distribución de la base de datos por mina.

Las profundidades de la base de datos se presentan en el siguiente histograma.

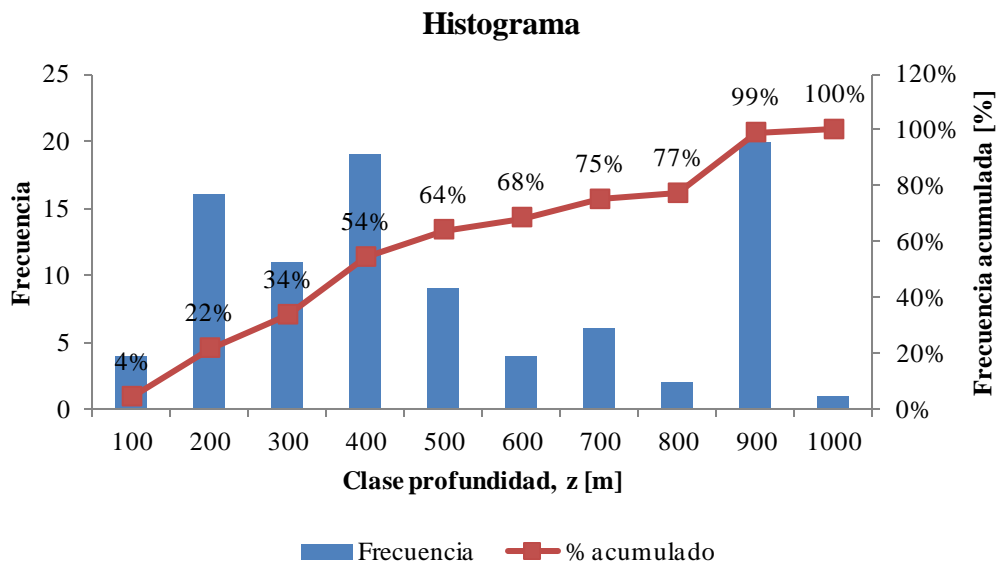


Figura 4-6. Histograma profundidad.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BASE DE DATOS

Se aprecia que la mayoría de los datos se encuentran entre los 0 y 400 [m], luego la cantidad de datos baja. No obstante, se presenta una cantidad importante de datos entre los 800 y 900 [m] (Figura 4-6).

Como muestra la Tabla 4-5 la variación de los datos va desde zonas superficiales hasta llegar casi al kilómetro de profundidad. La mediana muestra, al igual que el histograma, que los datos están concentrados en la mitad más cercana a superficie.

Tabla 4-5. Estadística de la profundidad.

Profundidad [m]	
Media	452
Mediana	383
Moda	849
Mínimo	52
Máximo	945

Además de la distribución de los datos con respecto a la profundidad, es necesario analizar la representación de cada mina en la base de datos.

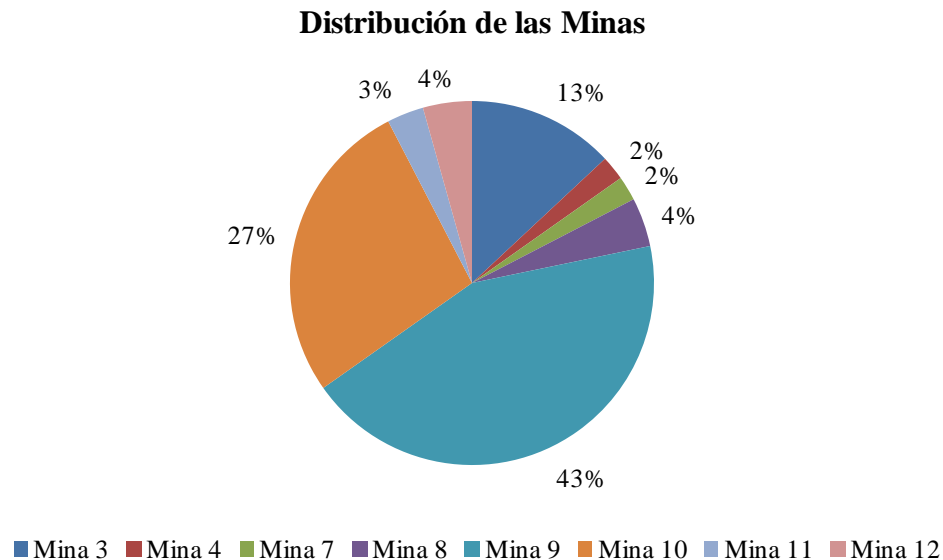


Figura 4-7. Distribución de minas en la base de datos.

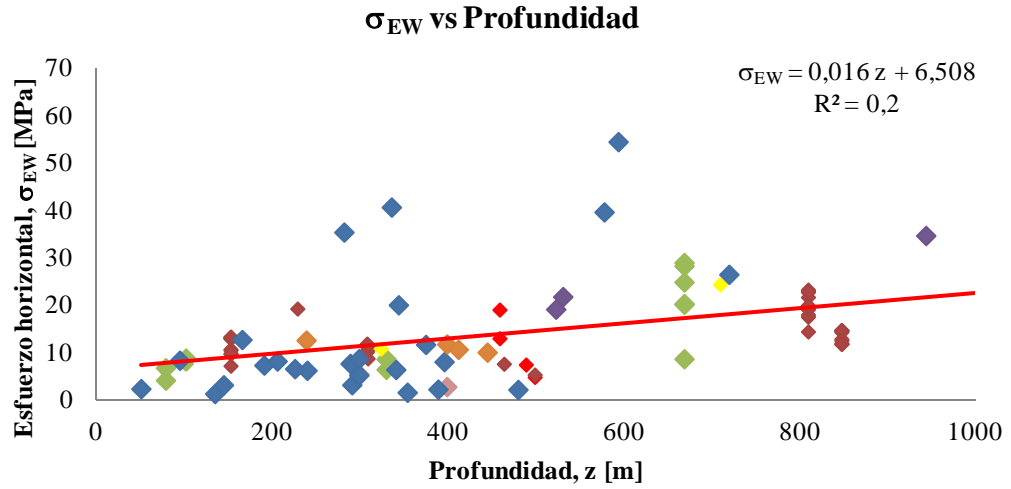
Se aprecia en la Figura 4-7 que casi la mitad de la base de datos pertenece a la mina 9, las minas con menor representación son la 4 y 5.

4.2.3. Tensor de esfuerzos

El tensor de esfuerzos se compone por los esfuerzos de corte y normales en las direcciones EW, NS y V. Se muestran a continuación las tendencias obtenidas a partir de la base de datos.

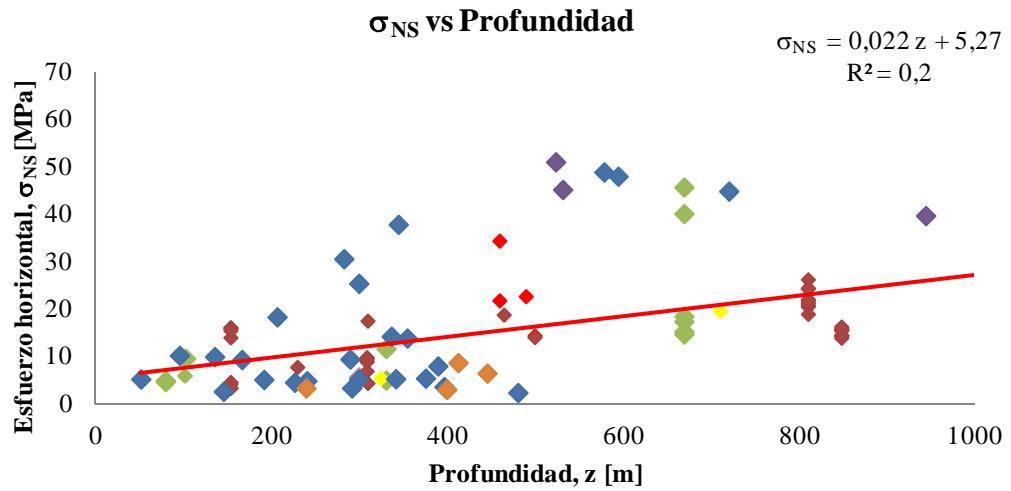
Esfuerzos normales:

Se muestran las tendencias de los esfuerzos normales versus la profundidad.



◆ Mina 3 ◆ Mina 4 ◆ Mina 7 ◆ Mina 8 ◆ Mina 9 ◆ Mina 10 ◆ Mina 11 ◆ Mina 12

(a)



◆ Mina 3 ◆ Mina 4 ◆ Mina 7 ◆ Mina 8 ◆ Mina 9 ◆ Mina 10 ◆ Mina 11 ◆ Mina 12

(b)

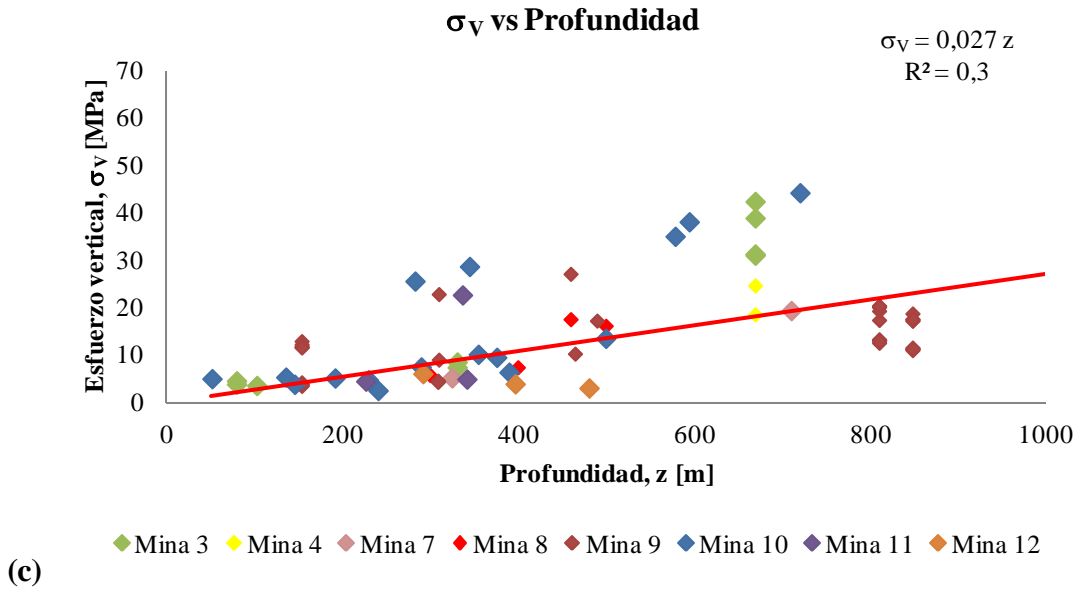
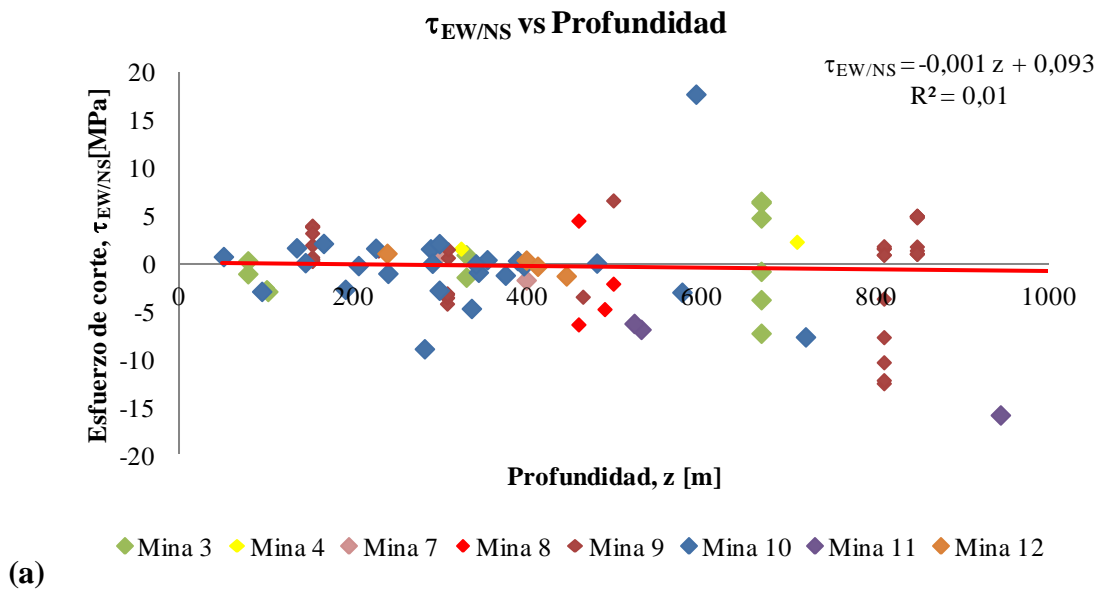


Figura 4-8. Regresión lineal entre esfuerzos normales y profundidad. (a) esfuerzo horizontal EW, (b) esfuerzos horizontal NS y (c) esfuerzo vertical V.

Se aprecian bajas correlaciones en todas las tendencias presentadas en la Figura 4-8. Junto a lo anterior, como se mostraba en el análisis de los filtros, el esfuerzo horizontal NS es mayor al EW, esto se debe a que el primero empieza con un valor más alto para la constante de intersección.

Esfuerzos de corte:

Se analizan los esfuerzos de corte en todas las direcciones y sus tendencias se muestran en las siguientes figuras.



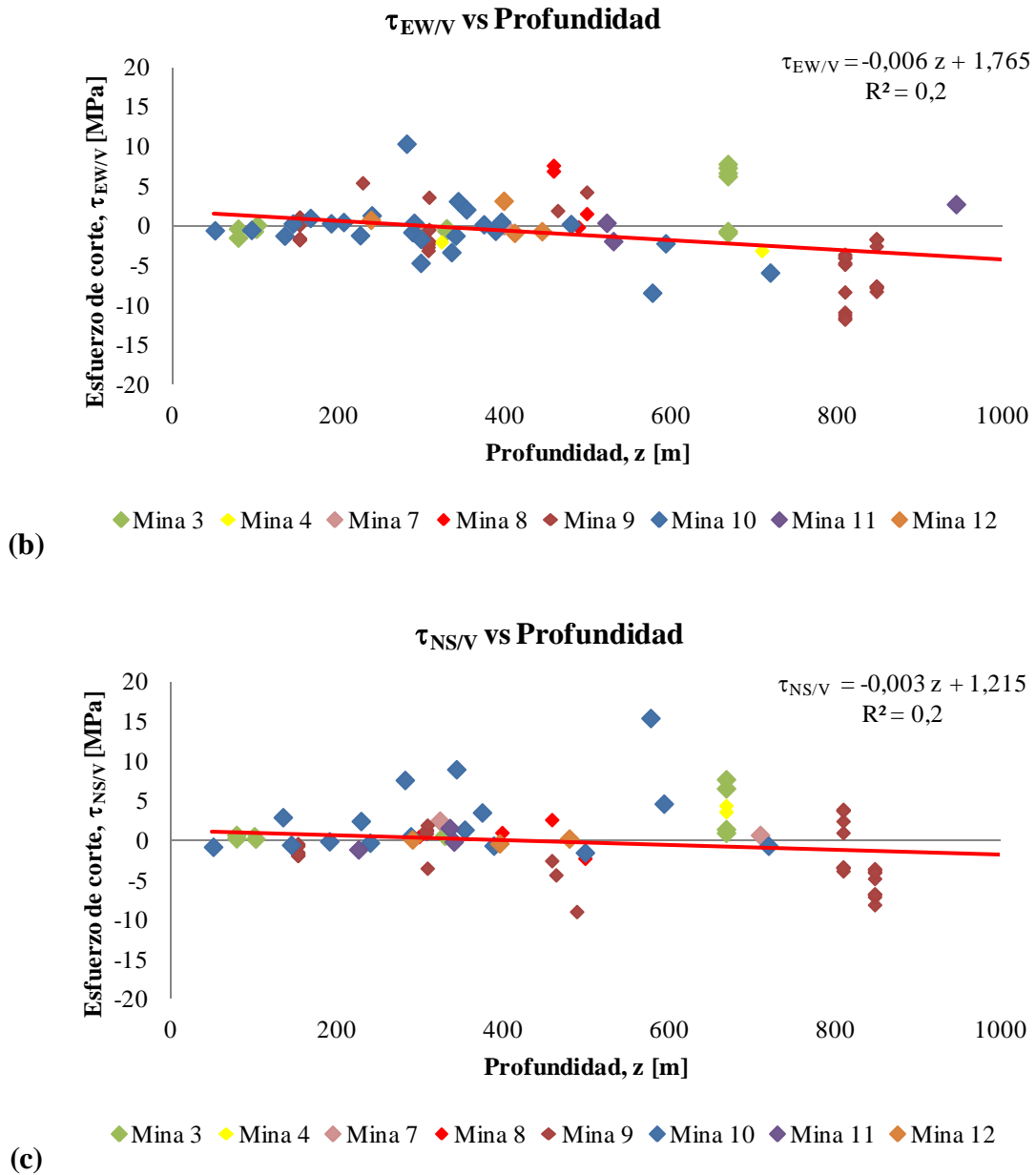


Figura 4-9. Regresión lineal entre esfuerzos de corte y profundidad. (a) EW/NS, (b) EW/V y (c) NS/V.

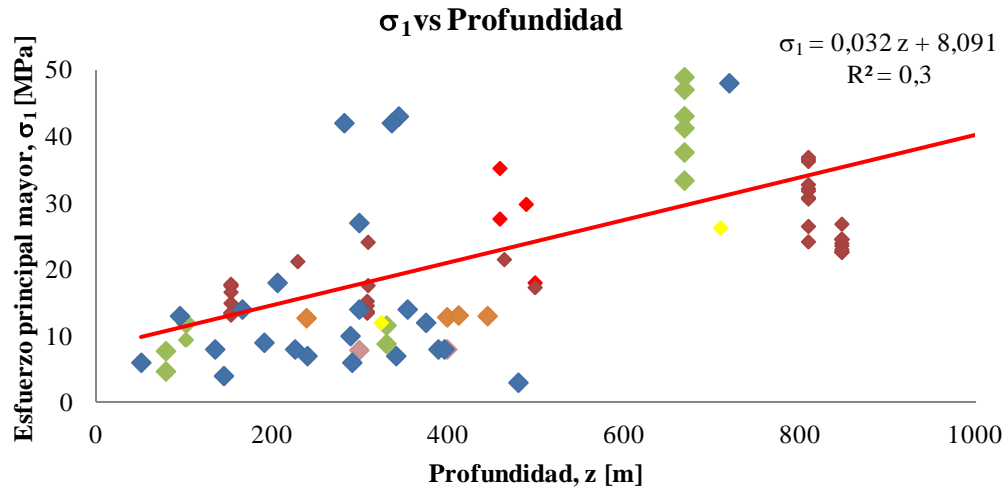
Los datos indican bajas correlaciones en el esfuerzo de corte que relaciona las direcciones EW y NS, mientras que las que se relacionan con el esfuerzo vertical tienen correlaciones superiores (Figura 4-9). A pesar de lo anterior, éstas correlaciones son las más bajas al analizar el resto de los esfuerzos. Examinando las tendencias en la Figura 4-9, éstas muestran que los esfuerzos de corte son constantes en la profundidad lo que indica que los esfuerzos principales deben tener direcciones constantes en la profundidad.

4.2.4. Esfuerzos principales

El análisis de los esfuerzos principales busca las tendencias de éstos con respecto a la profundidad, pero además estudia sus direcciones.

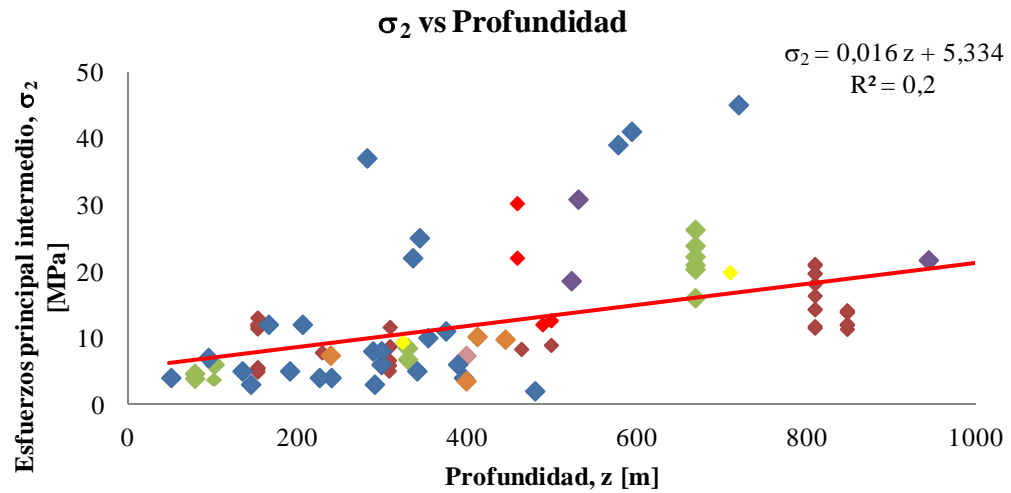
Tendencias con respecto a la profundidad:

Se muestran las tendencias de las regresiones de los esfuerzos principales y la profundidad.



◆ Mina 3 ◆ Mina 4 ◆ Mina 7 ◆ Mina 8 ◆ Mina 9 ◆ Mina 10 ◆ Mina 11 ◆ Mina 12

(a)



◆ Mina 3 ◆ Mina 4 ◆ Mina 7 ◆ Mina 8 ◆ Mina 9 ◆ Mina 10 ◆ Mina 11 ◆ Mina 12

(b)

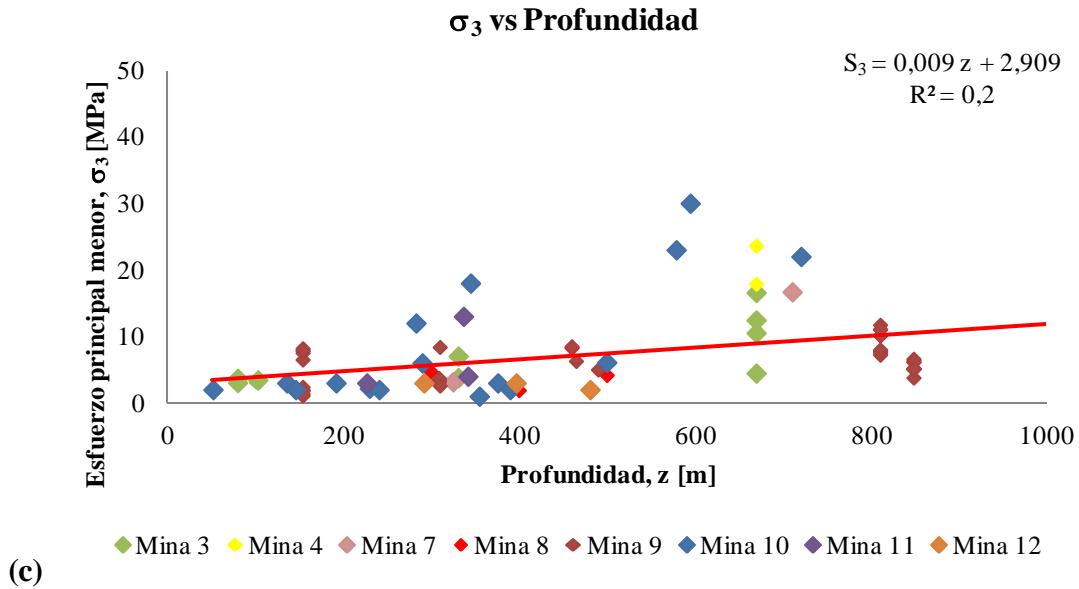


Figura 4-10. Regresión lineal entre esfuerzos principales y profundidad (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.

De las tendencias en la Figura 4-10 se tiene que el esfuerzo principal mayor σ_1 es mayor al esfuerzo principal intermedio σ_2 y este mayor al esfuerzo principal menor σ_3 , que coincide con lo esperado.

Orientaciones:

Para graficar las orientaciones de los esfuerzos principales se utiliza el software Dips, tal como se indica en la siguiente figura:

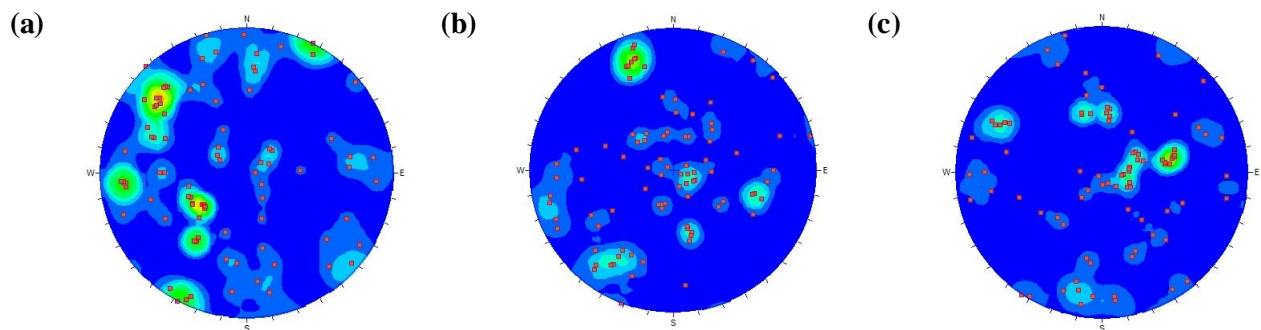


Figura 4-11. Orientación esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.

Además, se analizan las frecuencias de los azimut obteniendo los siguientes resultados.

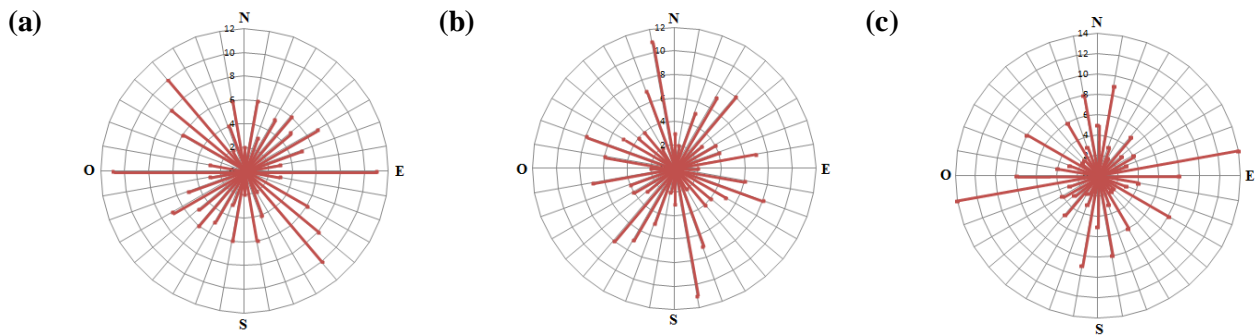


Figura 4-12. Frecuencia de los azimut esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.

Es posible notar en la Figura 4-12 que el esfuerzo principal mayor tiende a una orientación EW con una componente NW-SE y el esfuerzo principal medio muestra una orientación NS con componentes EW e inclinaciones horizontales. En el caso del esfuerzo principal menor, éste muestran inclinaciones verticales y una orientación EW.

4.3. Comentarios Finales

Luego de explorar las diferentes variables de la base de datos se tiene que el esfuerzo vertical muestra un comportamiento típico, presentando un valor para la carga listostática similar a $0,027[\text{MPa/m}]$.

Con respecto a los esfuerzos normales horizontales, éstos tienen valores bajos para el coeficiente de determinación y por lo tanto gran dispersión. Si bien se aprecia que el esfuerzo mayor es EW, no se puede asegurar tajantemente, debido a las razones explicadas en el ANEXO C y a que en general las tendencias son muy similares.

Los esfuerzos de corte muestran tendencias con bajos gradientes lo que implica en que las orientaciones de los esfuerzos principales no varían significativamente con respecto a la profundidad.

Por último, los esfuerzos principales muestran las mejores correlaciones, donde además las orientaciones obtenidas coinciden con lo esperado, ya que mantienen similitudes a lo expresado en los antecedentes.

5. MODELO DE ESFUERZOS IN SITU

Luego de conocer el comportamiento de los esfuerzos se puede establecer el modelo de los esfuerzos In Situ a partir de las tendencias mostradas en el capítulo 4, sin embargo, como se explicó, éstas no son concluyentes, por lo que es necesario analizar otras variables que indiquen las tendencias de los esfuerzos, tanto los normales, como los principales.

5.1. Análisis preliminar

Los primeros análisis realizados en esta etapa, que corresponden al estudio de las orientaciones y de los esfuerzos horizontales (razón k y razón entre estos), se encuentran en el ANEXO B. Los análisis muestran indicios de que el esfuerzos mayor es el esfuerzos horizontal EW, además de existir correlaciones entre las orientaciones de los esfuerzos y el lugar donde se ubica la mina. Los yacimientos ubicados cercanos a la cordillera muestran orientaciones EW para el esfuerzo principal mayor, mientras que al acercarse a la costa se presentan componentes de esfuerzos NS.

Se muestran a continuación los análisis realizados en las restricciones del modelo.

5.1.1. Criterio de Mohr-Coulomb:

La primera restricción corresponde al criterio de Mohr-Coulomb (ecuación 43) que relaciona el esfuerzo principal mayor y menor. Se muestra en la Figura 5-1 la regresión lineal entre estos dos esfuerzos.

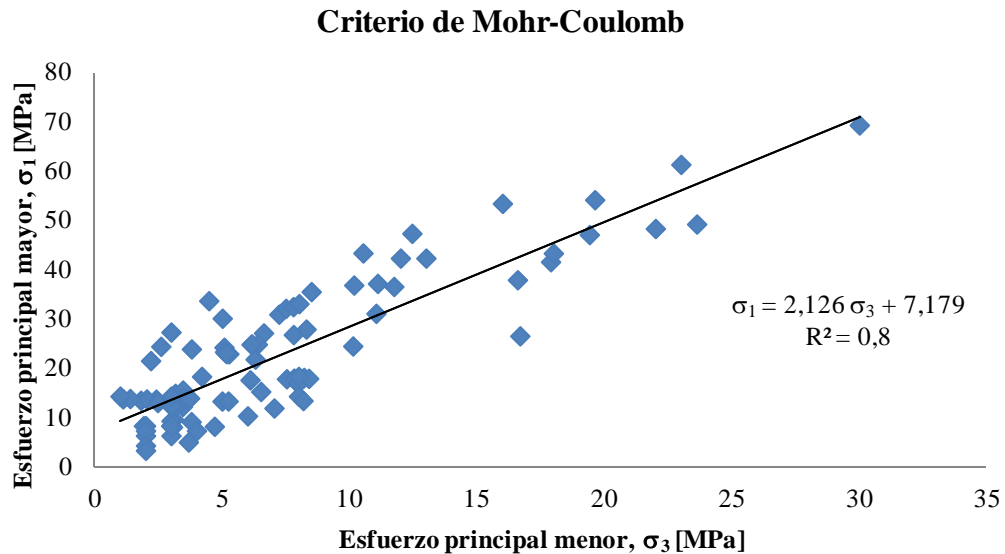
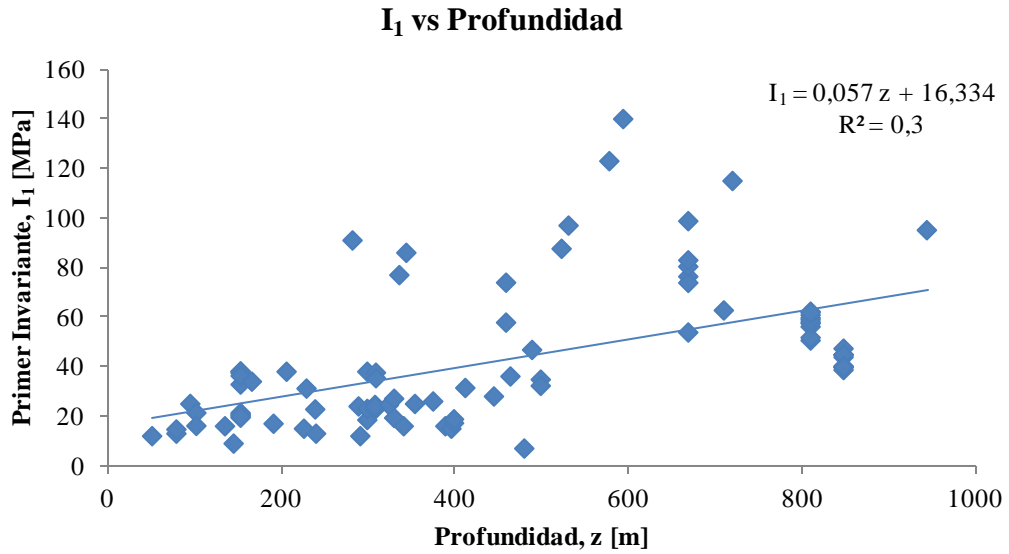


Figura 5-1. Relación de Morh-Coulomb, esfuerzos principales.

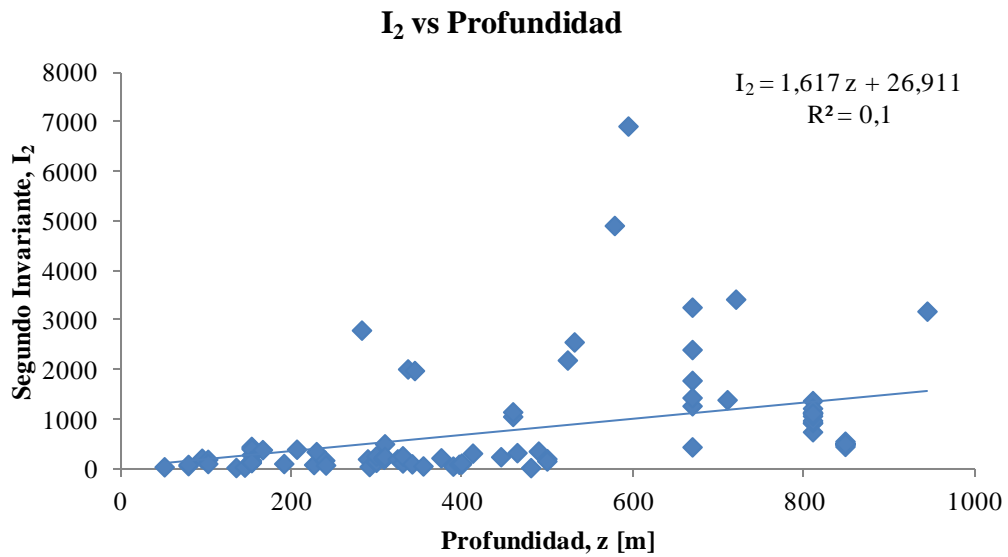
En la Figura 5-1 se distingue una relación importante entre los esfuerzos mencionados, donde el coeficiente de determinación muestra un alto valor, sobretodo comparado con el resto de las regresiones.

5.1.2. Primer Invariante:

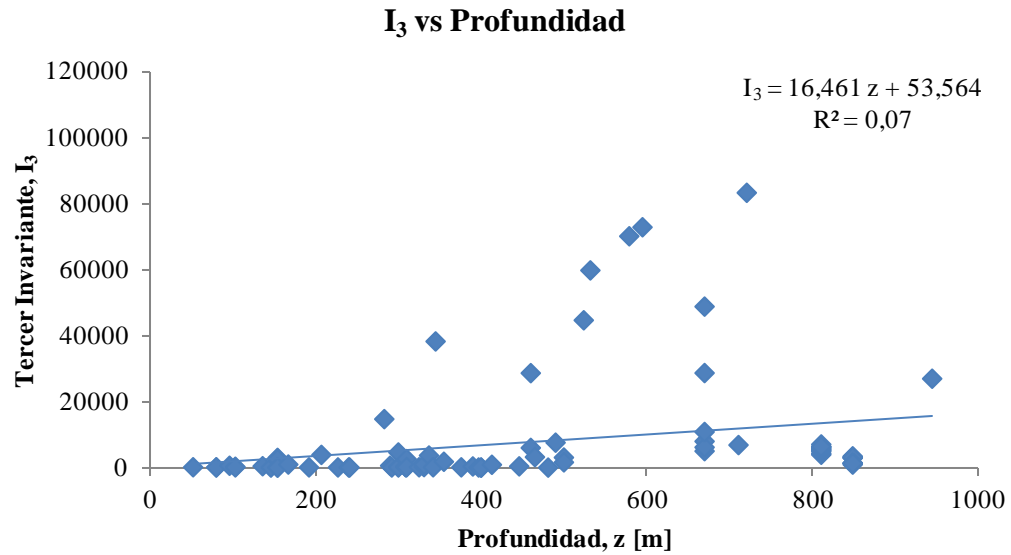
En el caso de la restricción del primer invariante de esfuerzos, se analizaron las tres invariantes con el fin de estudiar las tres tendencias, calculándolos a partir de las ecuaciones (7), (8) y (9) obteniendo lo siguiente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-2. Regresión lineal (a) primer invariante, (b) segundo invariante y (c) tercer invariante de esfuerzo.

Se observa en la Figura 5-2 la baja correlación que existe en cada uno de los invariantes, principalmente en el segundo y tercer invariante de esfuerzo. Por esta razón, en el análisis se utiliza el primer invariante, además de ser el único que relaciona los esfuerzos principales que son los que determinan el modelo final.

5.1.3. Razón de esfuerzos b

Para el parámetro b además de evaluar su comportamiento con respecto a la profundidad se realiza un gráfico de frecuencia que muestra características con respecto a modo de falla que puede influir en el comportamiento de los esfuerzos.

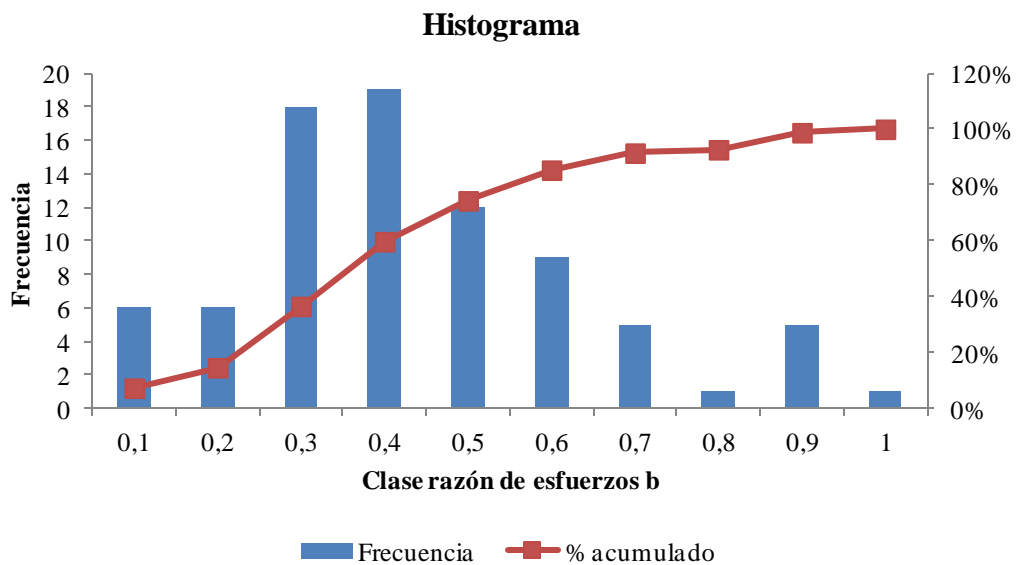


Figura 5-3. Histograma de la razón de esfuerzos b.

Se aprecia en la Figura 5-3 que la mayoría de los datos están entre el rango $]0.2 - 0.5]$, mientras que la media es de 0,38. Esto se puede comparar con la base de datos de World Stress Map (Heidbach, y otros 2008), explicada en los antecedentes **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para obtener información del régimen tectónico que tiene la base de datos.

Los regímenes que más se asemejan a la de la base de datos son:

- SS: Falla de rumbo
- TF: Falla inversa
- TS: Predomina la falla inversa sin embargo tiene componentes de falla de rumbo.

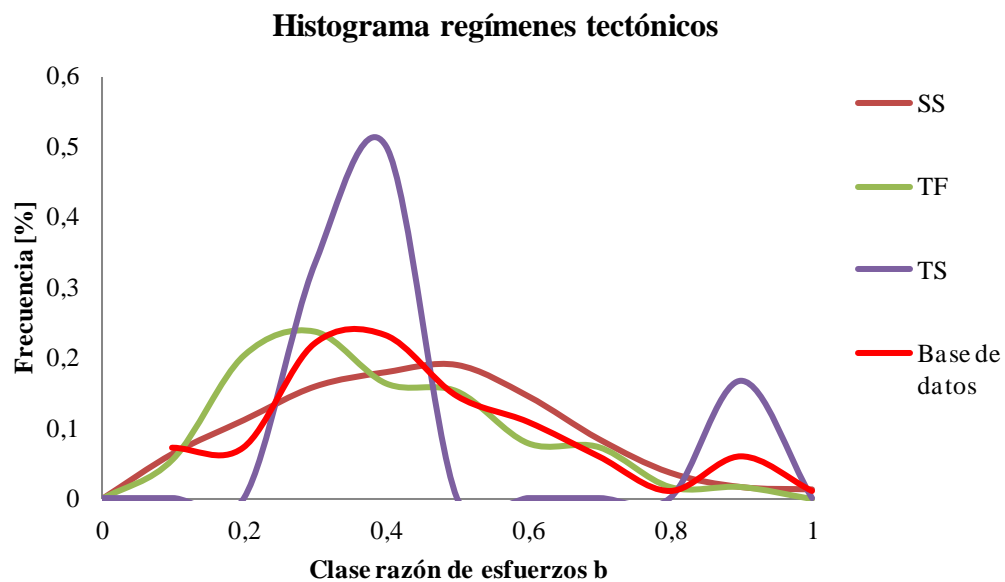


Figura 5-4. Histograma que compara los regímenes tectónicos (SS, TF y TS) (Heidbach, y otros 2008) y la base de datos.

Se aprecia que la base de datos tiene un régimen parecido al TS en que predomina la falla inversa lo que coincide con la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana, pero además existen componentes de falla de rumbo (Figura 5-4).

Además de sacar la frecuencia del parámetro b se analiza el comportamiento en función de la profundidad.

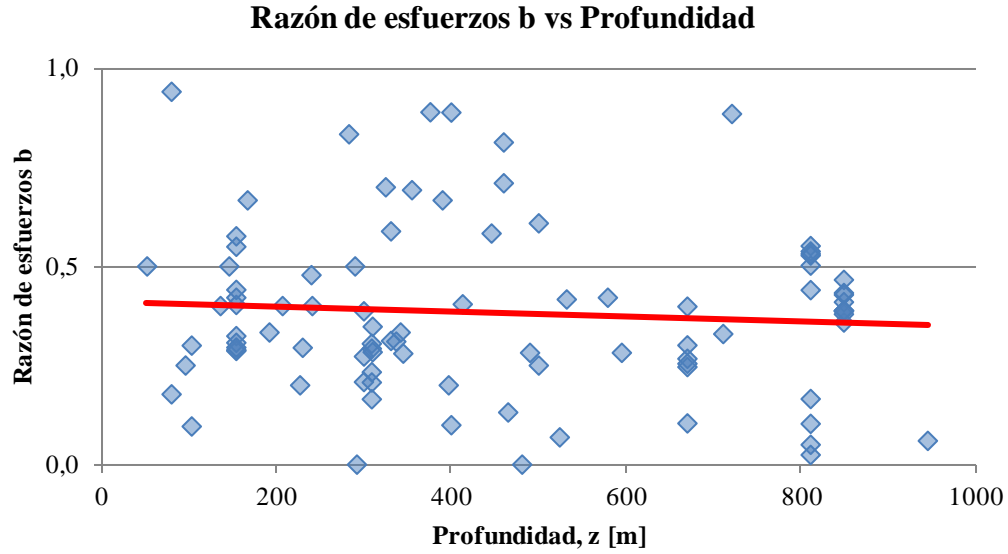


Figura 5-5. Tendencia lineal del parámetro b en función de la profundidad.

Se observa en la Figura 5-5 que existe una tendencia decreciente desde valores más cercanos al 0.4 hasta valores que se acercan al 0,3 a medida que aumenta la profundidad.

5.2. Modelo

Con el análisis exhibido en la sección anterior se procede a establecer los rangos que conforman las restricciones y así establecer los seis modelos que se evalúan.

5.2.1. Definición de los modelos

Para establecer las restricciones se realiza la regresión lineal entre las variables y con esto se obtiene el rango inferior y superior de las constantes de la ecuación.

1. Criterio de Mohr - Coulomb: Se muestra a continuación los rangos que mantienen el 95% de los datos, además de las constantes de la tendencia lineal (Tabla 5-1).

Tabla 5-1. Rangos superior e inferior, restricción criterio de Mohr - Coulomb.

	Inferior 95%	Tendencia lineal	Superior 95%
Intersección	4,882	7,179	9,476
Pendiente	1,876	2,126	2,377

2. Primer invariante de esfuerzos: Al igual que en la restricción anterior se presentan los rangos superior e inferior, además de las constantes de la tendencia lineal (Tabla 5-2).

Tabla 5-2. Rangos superior e inferior, restricción primer invariante de esfuerzos.

	Inferior 95%	Tendencia lineal	Superior 95%
Intersección	6,700	16,334	25,968
Pendiente	0,039	0,057	0,076

3. Parámetro b: En este caso el rango viene dado por la frecuencia de la base de datos y se compara la media del parámetro b entre estos rangos (Tabla 5-3).

Tabla 5-3. Rangos superior e inferior, restricción parámetro b.

	Inferior	Media	Superior
Media	0,2	0,38	0,5

Con estas restricciones se pueden conformar los modelos de la manera explicada en la sección 3.2.3.

5.2.2. Resultados para las alternativas

Se muestran los resultados obtenidos de los seis modelos.

Tabla 5-4. Resultados de los diferentes modelos.

Modelo	AIC	Restricciones	Sigma V
1	518.8	Si	Sin restricciones
2	517.0	Si	Intersección = 0
3	515.1	Si	0,027*z
4	518.4	No	Sin restricciones
5	516.9	No	Intersección = 0
6	514.9	No	0,027*z

Se aprecia en la Tabla 5-4 que el modelo con menor AIC corresponde al modelo 6, que no toma las restricciones y utiliza la tendencia del Sigma V.

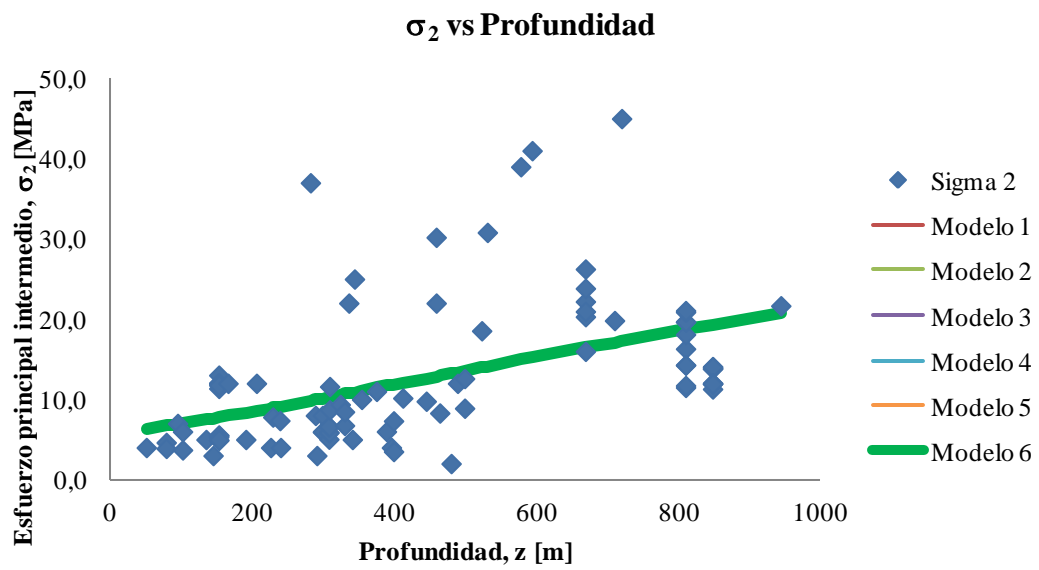
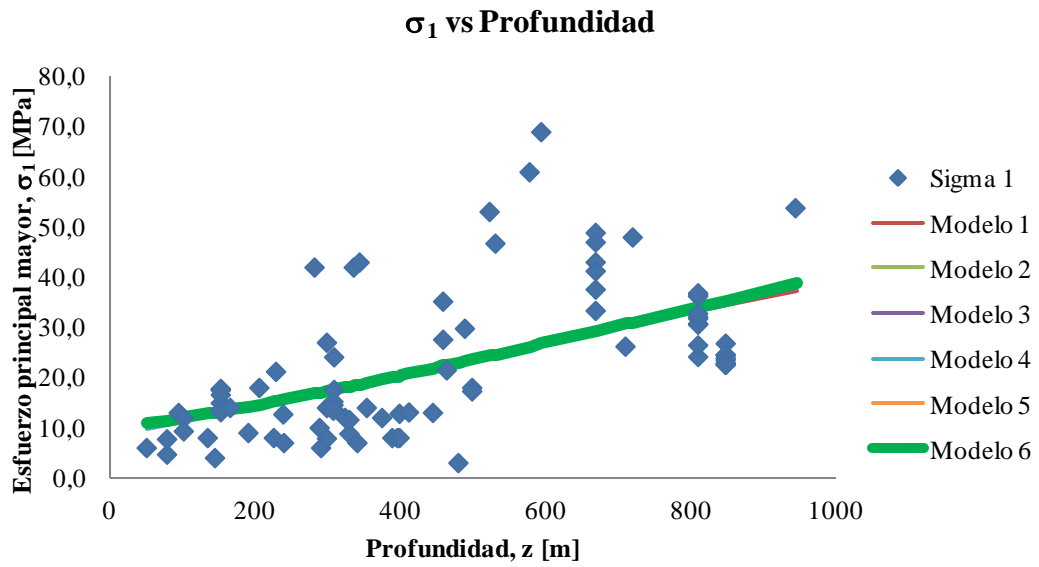
Las tendencias de los esfuerzos de corte, razones k y restricciones relacionadas al ajuste están presentadas en el ANEXO C. En general las tendencias muestran que los modelos tienen comportamientos similares y que se mantienen dentro del rango donde se establecen los datos, sin embargo, el modelo 6 reúne los mejores elementos que al final conforman el mejor tensor de esfuerzos principales comparado con los datos de la base y por ende obtiene el menor AIC.

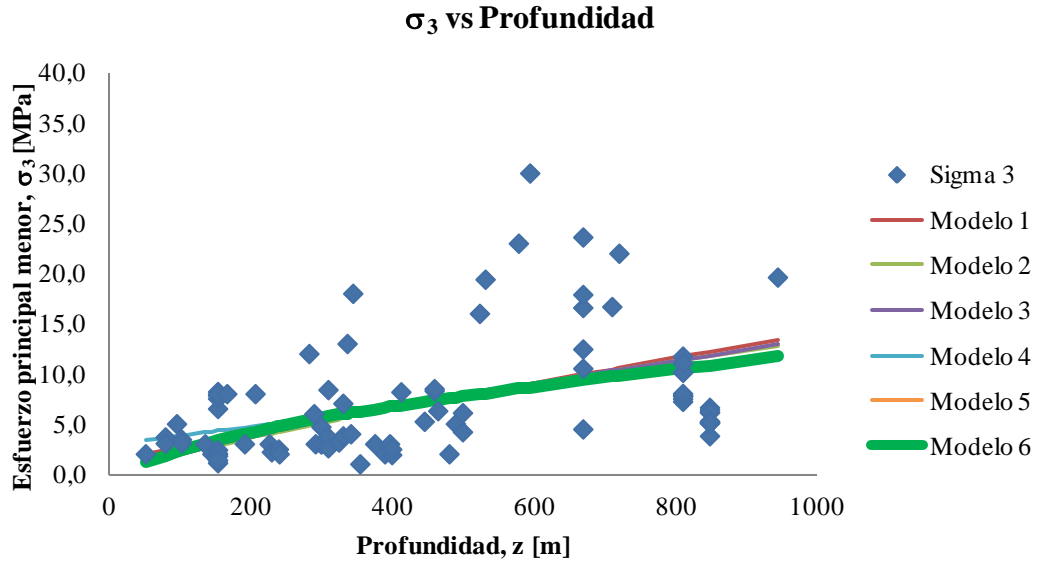
El tensor de esfuerzos queda de la siguiente forma:

Tabla 5-5. Tensor de Esfuerzo resultante del modelo optimizado con menor AIC.

	Grad. [MPa/m]	Inter. [MPa]
τ_{EN}	0,002	0,000
τ_{EV}	0,010	0,309
τ_{NV}	0,007	0,235
σ_{EW}	0,021	9,462
σ_{NS}	0,011	5,648
σ_V	0,027	0,000

Se presentan las tendencias de los esfuerzos principales:





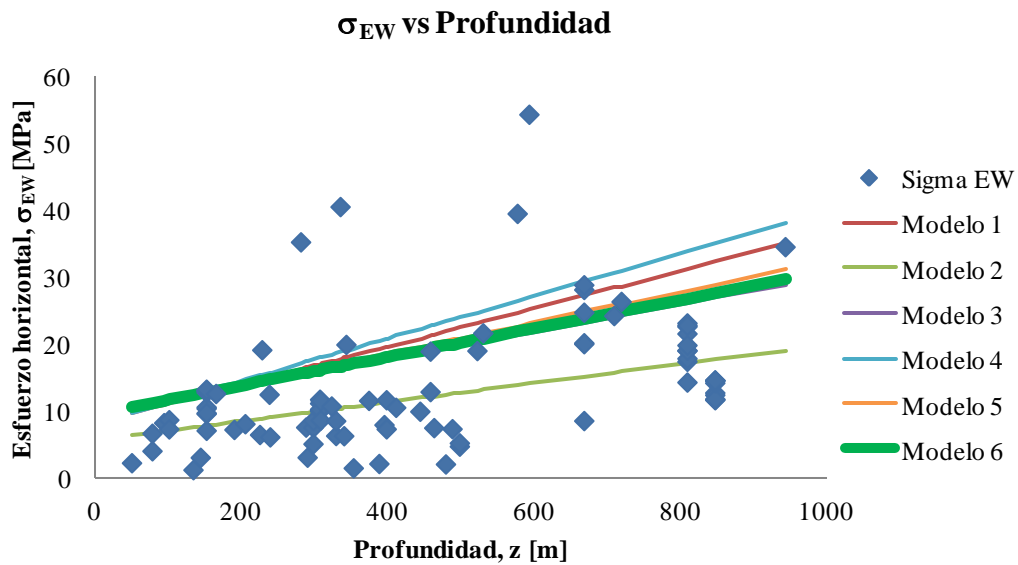
(c)

Figura 5-6. Tendencia del esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor versus profundidad, seis modelos.

Se observa en la Figura 5-6 que en general las tendencias son muy parecidas entre todos los modelos, esto también muestra que independiente de que se usen o no las restricciones, los modelos tienden a ecuaciones similares con respecto a los esfuerzos principales.

En todos los modelos se cumple la restricción de la primera invariante y del parámetro b , sin embargo, los modelos 4, 5 y 6 no cumplen la restricción del criterio de Mohr - Coulomb.

Se muestran los gráficos para los esfuerzos horizontales y el esfuerzo vertical.



(a)

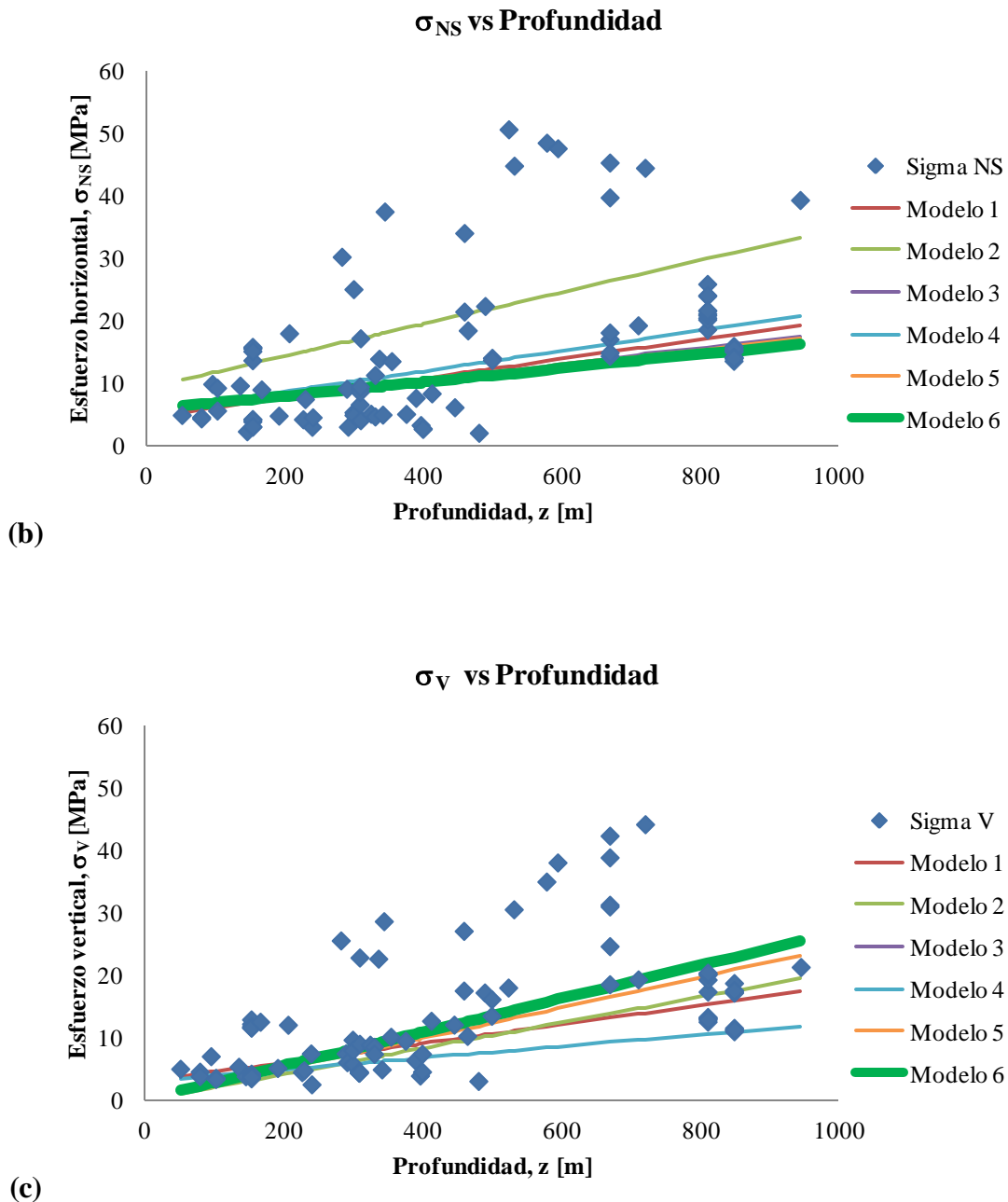


Figura 5-7. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos.

En general el esfuerzo EW es el de mayor valor en toda la profundidad, no obstante, cuando se analiza el modelo 2 se aprecia que el esfuerzo con orientación NS es mayor y muestra una clara diferencia con el resto de los modelos (Figura 5-7a y b).

Al observar el gráfico del esfuerzo vertical (Figura 5-7c) se aprecia que hasta aproximadamente los 600 [m] de profundidad este valor siempre es menor a los esfuerzos horizontales, mientras que al aumentar la profundidad este comportamiento cambia y el esfuerzo horizontal menor (que en su mayoría es con orientación NS) empieza a ser superado por el vertical.

Las orientaciones encontradas a partir del tensor de esfuerzos son las siguientes

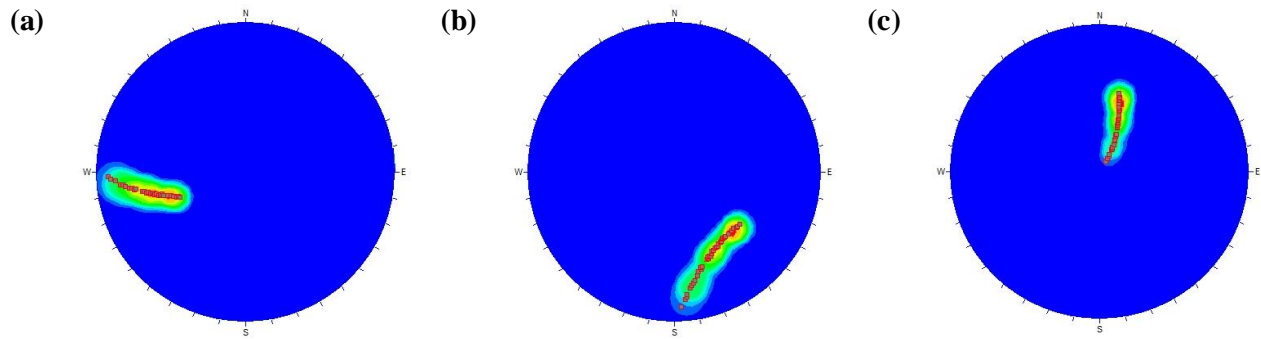


Figura 5-8. Orientación esfuerzos (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor, modelo elegido.

Al analizar la Figura 5-8 se nota un cambio en la inclinación de los esfuerzos. Los esfuerzos principales mayor y intermedio tienen una inclinación horizontal a bajas profundidades, mientras que cuando se profundiza la inclinación llega a valores cercanos a los 30° para el esfuerzo principal intermedio y de 40° en el caso del esfuerzo principal mayor, que representan una inclinación sub-vertical.

El esfuerzo principal menor (Figura 5-8c) tiene inclinaciones verticales a bajas profundidades, llegando a valores de 30° cuando aumenta la profundidad.

En el caso de los azimut, los esfuerzos principal mayor y menor muestran una tendencia más estable en toda la profundidad, teniendo un cambio de aproximadamente 20° . En el caso del esfuerzo principal intermedio, éste tiene un cambio mayor de aproximadamente 50° (Figura 5-8).

5.3. Ajuste del modelo en otras bases de datos

La misma metodología utilizada para la base de datos de minas chilenas se aplica a otras bases con la finalidad de poder comparar los modelos con otros obtenidos por diferentes autores.

5.3.1. Mina 6

Recordando la primera parte del filtro de los datos, la mina número 6 fue eliminada por su gran dispersión y por el valor de la carga litostática alejado del valor típico. Se aplica la misma metodología que al resto de las bases de datos para encontrar su tensor de esfuerzos.

Filtros:

De una recopilación de 129 datos con el primer filtro donde se utiliza el criterio de (Chauvenet 1863) para analizar la carga litostática (42), se eliminaron 2 datos. El segundo filtro que utiliza una regresión lineal en base al criterio de Mohr - Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914) elimina 5 datos.

Modelo:

Las restricciones que se usan en la construcción del modelo son las siguientes:

Tabla 5-6. Restricciones para el modelo, mina 6.

	Criterio de Mohr-Coulomb		b	Primer Invariante	
	Grad. [MPa/m]	Inter. [MPa]		Grad. [MPa/m]	Inter. [MPa]
Superior	1,404	30,956	0,20	0,053	85,879
Inferior	0,912	21,855	0,50	0,011	61,944
Tendencia y/o media	1,158	26,406	0,41	0,032	73,911

Parte importante de la construcción del modelo utiliza la tendencia del esfuerzo vertical que se muestra a continuación.

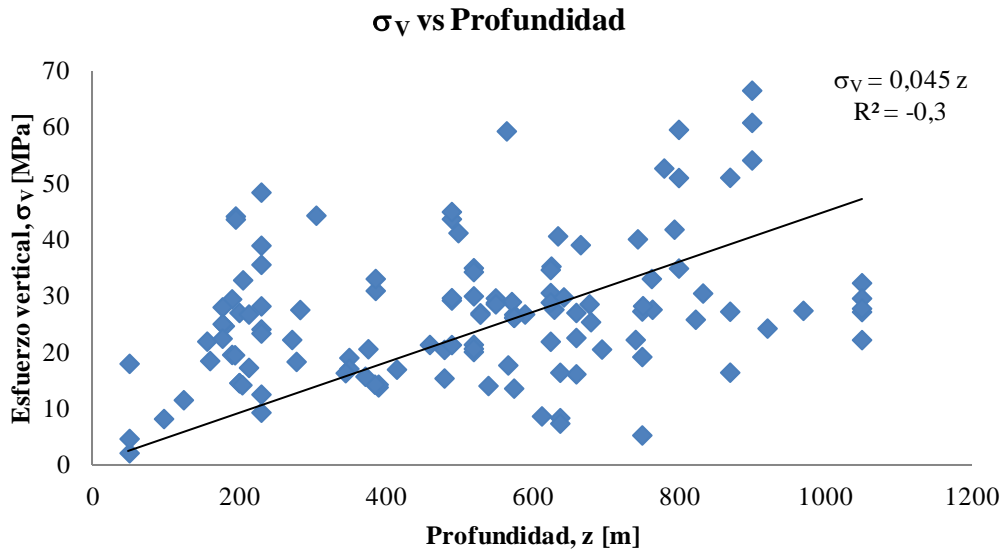


Figura 5-9. Regresión lineal del esfuerzo vertical y la profundidad, mina 6.

Se observa que existe un coeficiente de determinación bajo, que justifica la alta dispersión de datos en la Figura 5-9. La carga litostática obtenida es muy superior a la utilizada típicamente y también a la encontrada en la base de datos del modelo de minas chilenas.

Se presentan los resultados para la optimización de los modelos.

Tabla 5-7. Resultados de la optimización de los modelos para la mina 6.

Modelo	AIC	Restricciones	Sigma V
1	595,70	Si	Libre
2	613,49	Si	Intersección = 0
3	612,17	Si	0,045* z
4	595,70	No	Libre
5	599,83	No	Intersección = 0
6	603,59	No	0,045* z

La Tabla 5-7 indica valores cercanos para los modelos 1 y 4, pero al analizar los demás decimales se observa que el modelo 4 es el que tiene menor valor. Según lo anterior, se obtiene el siguiente modelo para el tensor de esfuerzos.

Tabla 5-8. Modelo de esfuerzo para el modelo 4, mina 6.

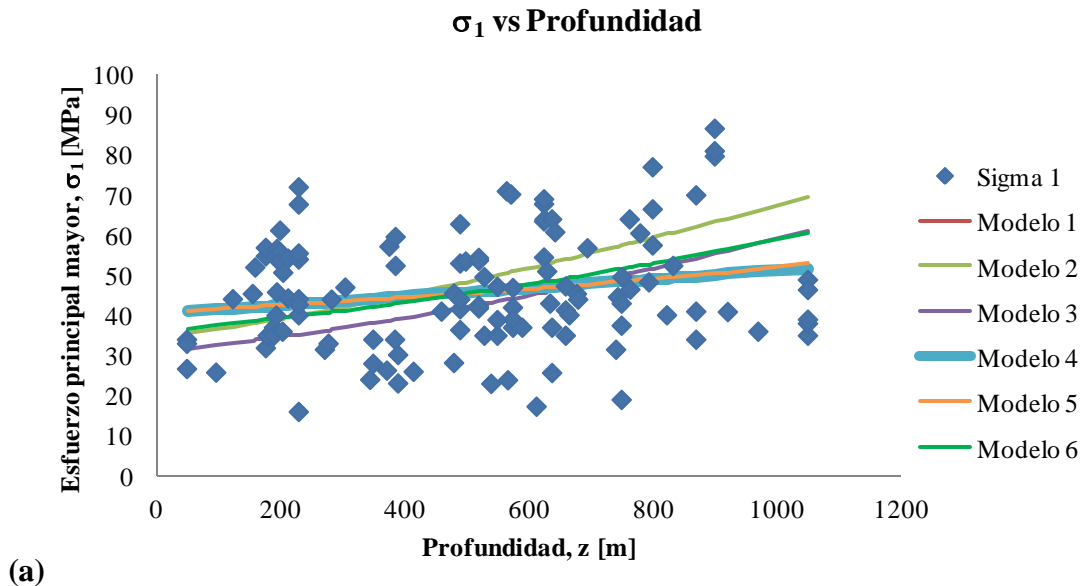
	Modelo 4	
	Grad. [MPa/m]	Inter. [MPa]
τ_{EN}	0,000	0,000
τ_{EV}	0,006	0,000
τ_{NV}	0,000	0,000
σ_{EW}	0,010	21,648
σ_{NS}	0,011	40,215
σ_V	0,012	12,008

Se aprecia en la Tabla 5-8 que los esfuerzos de corte son nulos para dos de los tres casos, además el esfuerzo horizontal EW muestra una tendencia con valores menores al esfuerzo NS.

Para esta mina en particular funcionan mejor los modelos que dejan las constantes libres para el esfuerzo vertical, ya que su gradiente es muy alto y produce mayores distorsiones en el resto de los esfuerzos normales y de corte.

Es importante mencionar que en este ejemplo se debió aplicar una restricción extra que analiza la linealidad de los esfuerzos principales. Como se explica en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los esfuerzos principales se calculan a partir de una ecuación de tercer grado por lo que no está asegurada la linealidad de la tendencia para éstos, por esta razón y por la alta dispersión de los datos fue necesario restringir un coeficiente de determinación para cada esfuerzos principal que fuera mayor a 0,98 obteniendo así modelos lineales.

Se presentan los esfuerzos principales y normales para todos los modelos.



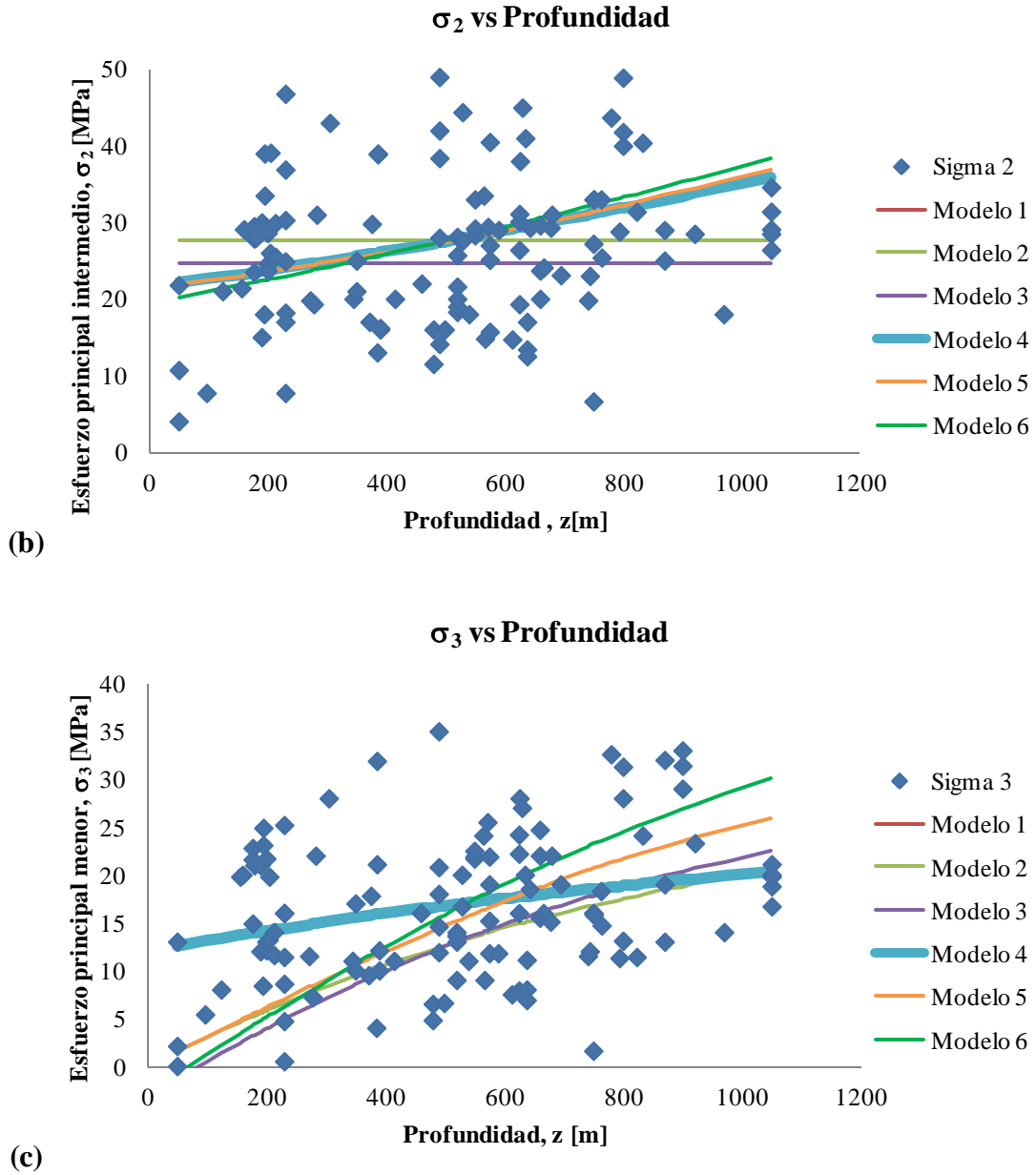
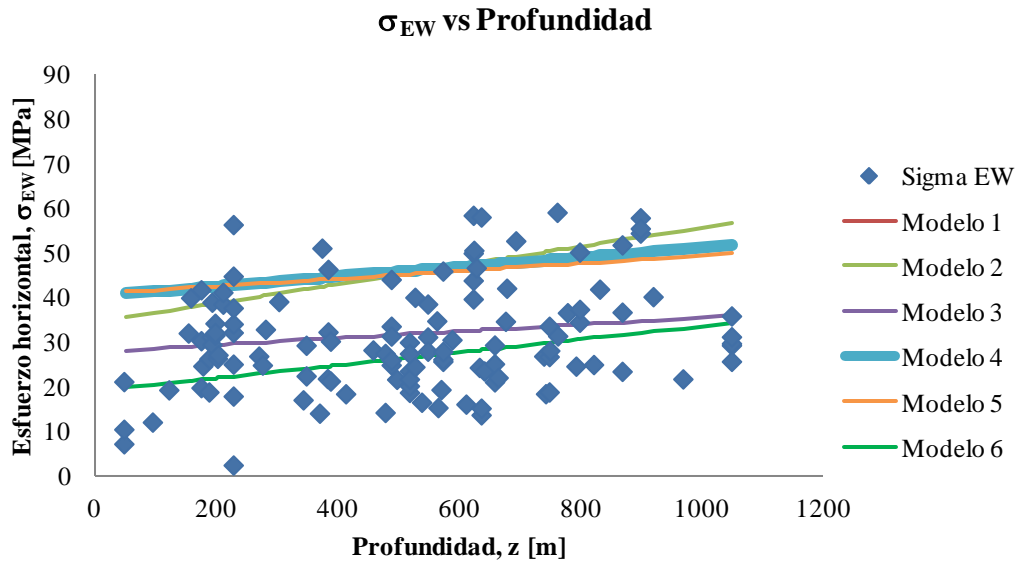


Figura 5-10. Tendencia para el esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor para los 6 modelos, mina 6.

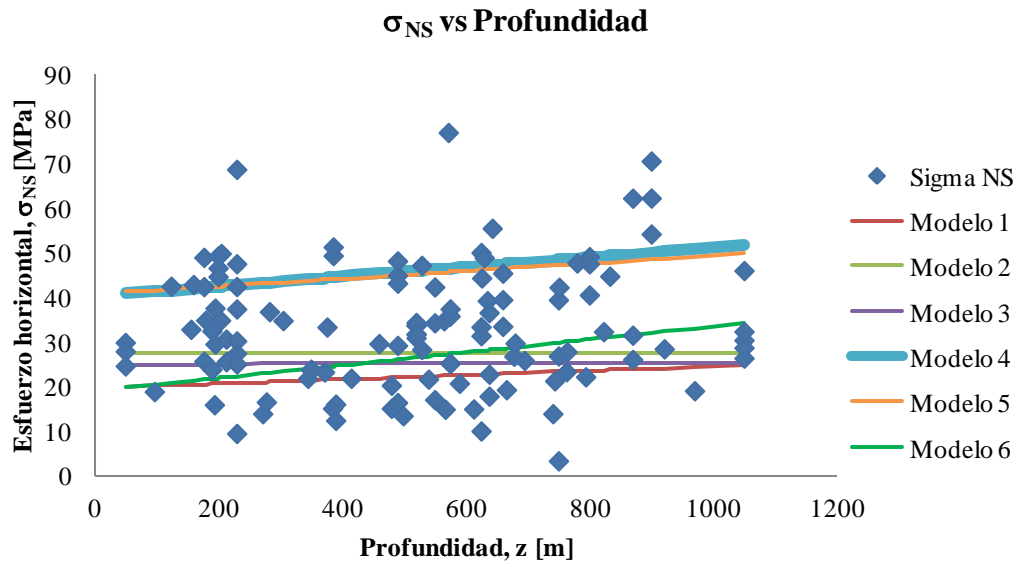
De la Figura 5-10 se observa que los modelos 2 y 3 muestran tendencias casi lineales para el esfuerzo principal intermedio, lo que sería aberrante si es que se profundizara más, ya que el esfuerzo principal menor sobrepasaría a este.

Para esta base de datos las tendencias obtenidas no son similares como en el caso del modelo de esfuerzos para Chile. Esto muestra que la alta dispersión que existe en los datos hace que la optimización no sea tan clara como en el otro caso.

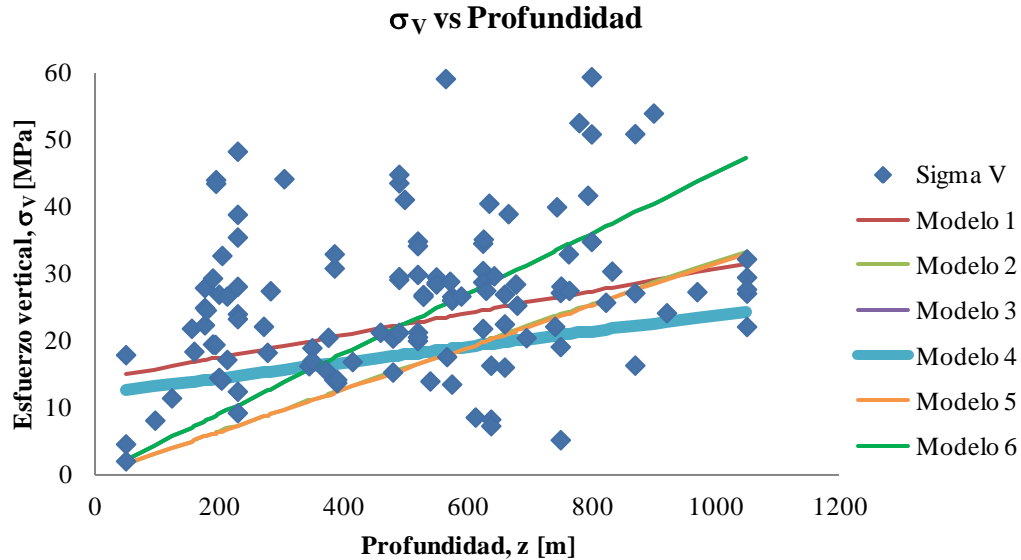
El siguiente gráfico muestra las tendencias para los esfuerzos normales.



(a)



(b)



(c)

Figura 5-11. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos, mina 6.

Se muestra en la Figura 5-11 que las tendencias son diferentes en todos los modelos y que los esfuerzos horizontales muestran gradientes con bajo valor y constantes de intersección de alto valor, lo que no se condice con lo obtenido para el modelo para minas chilenas.

El resto de las tendencias se muestran en el ANEXO C. De éstas se concluye que presentan comportamientos disimiles entre un modelo y otro, por lo que hace más difícil concluir sobre el comportamiento del macizo en la mina 6. Sin embargo, todas las tendencias están en el rango de los datos.

Orientaciones

Se muestran las orientaciones de los esfuerzos principales.

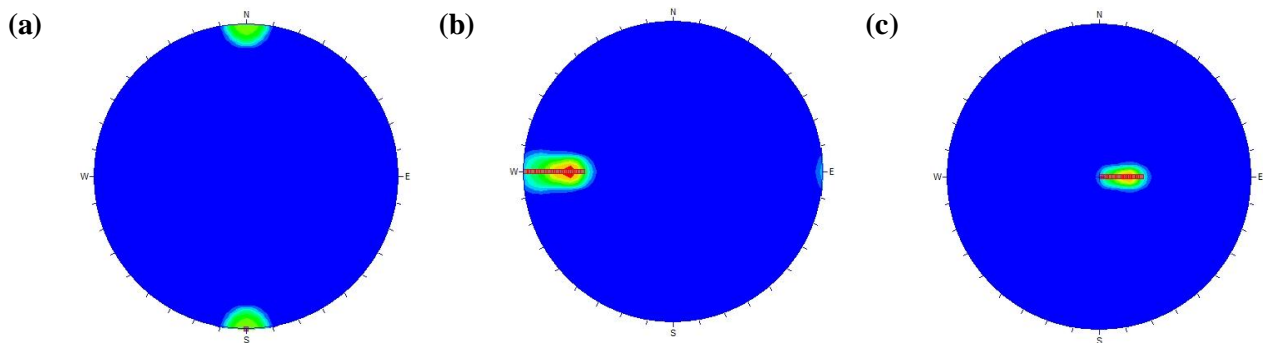


Figura 5-12. Orientación esfuerzos principales Mina 6. (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor.

Los esfuerzos principales intermedio y mayor (Figura 5-12a y b) cambian sus orientaciones con respecto a lo obtenidos para las minas chilenas en general. En el caso del esfuerzo principal menor (Figura 5-12c) los dos modelos muestran orientaciones similares.

5.3.2. Minas Canadienses

Otra base de datos utilizada es de minas canadienses a la que se aplica la metodología para obtener el tensor de esfuerzos y compararlo con otros autores.

Filtros

De una base de datos de 189 mediciones de diferentes minas en Canadá, el primer filtro relacionado al criterio de (Chauvenet 1863) elimina 6 datos y el segundo filtro en base al criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914) elimina 8 datos.

Modelo

Las restricciones que se utilizan para la construcción del modelo son las siguientes.

Tabla 5-9. Restricciones para los modelos, minas canadienses.

	Criterio Mohr-Coulomb		b	Primer Invariante	
	Grad.[MPa/m]	Inter.[MPa]		Grad.[MPa/m]	Inter.[MPa]
Superior	1,706	16,548	0,20	0,080	37,921
Inferior	1,446	10,744	0,50	0,065	23,120
Tendencia y/o media	1,567	13,646	0,40	0,072	30,520

Como se ha explicado con las otras bases de datos la tendencia del esfuerzo vertical es indispensable para conformar los modelos a optimizar.

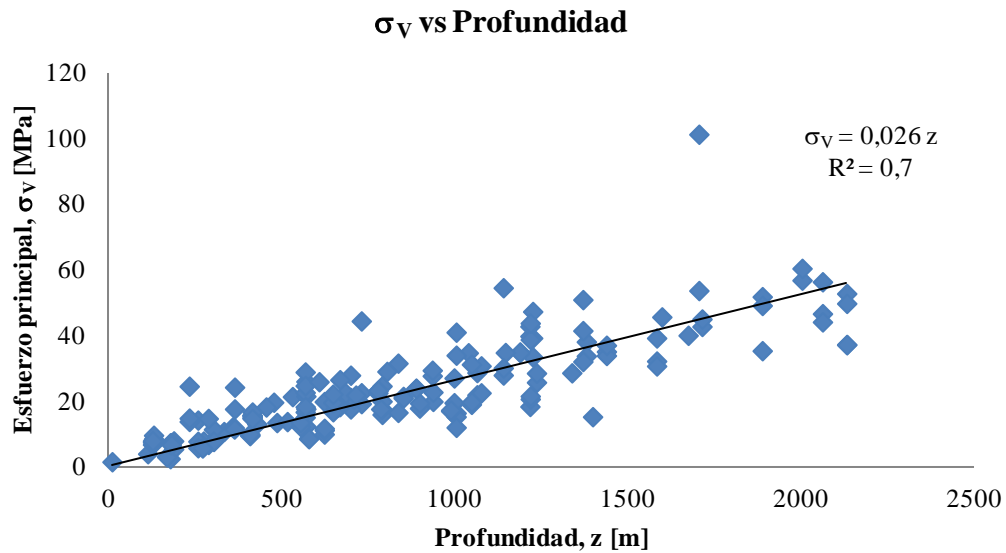


Figura 5-13. Tendencia esfuerzo vertical para los 6 modelos, minas canadienses.

En la Figura 5-13 se aprecia que la tendencia del esfuerzo muestra un valor típico para la carga listostática, además de tener un coeficiente de determinación alto.

Los resultados de la optimización para los 6 modelos son los siguientes.

Tabla 5-10. Resultados de la optimización de los modelos, minas canadienses.

Modelo	AIC	Restricciones	Sigma V
1	602,0	Si	Sin restricciones
2	600,9	Si	Intersección = 0
3	599,9	Si	0,026*z
4	602,0	No	Sin restricciones
5	600,8	No	Intersección = 0
6	598,8	No	0,026*z

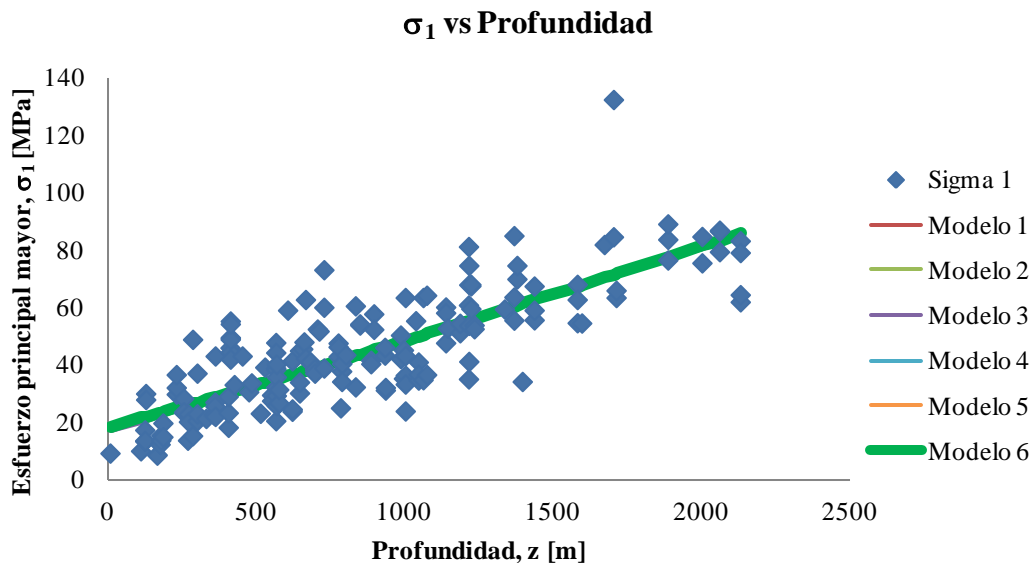
Se aprecia en la Tabla 5-9 que el uso de la tendencia para el esfuerzo vertical entrega los mejores resultados, por lo que se establece como el modelo final al modelo 6. Como en los ejemplos anteriores, los modelos que no tienen las restricciones son los que obtienen el menor AIC, aunque las restricciones en general no son cumplidas por un bajo margen de error.

Se presenta el modelo 6 en la Tabla 5-11, los esfuerzos de corte muestran gradientes e intersecciones bajos y en el caso de los esfuerzos normales se aprecia que el esfuerzo NS es el mayor.

Tabla 5-11. Tensor de esfuerzos para el modelo 6, minas canadienses.

	Modelo 6	
	Grad. [MPa/m]	Inter. [MPa]
τ_{EN}	0,002	0,121
τ_{EV}	0,005	0,000
τ_{NV}	0,006	0,000
σ_{EW}	0,020	10,387
σ_{NS}	0,028	18,200
σ_V	0,026	0,000

Se muestran las tendencias para los esfuerzos principales.



(a)

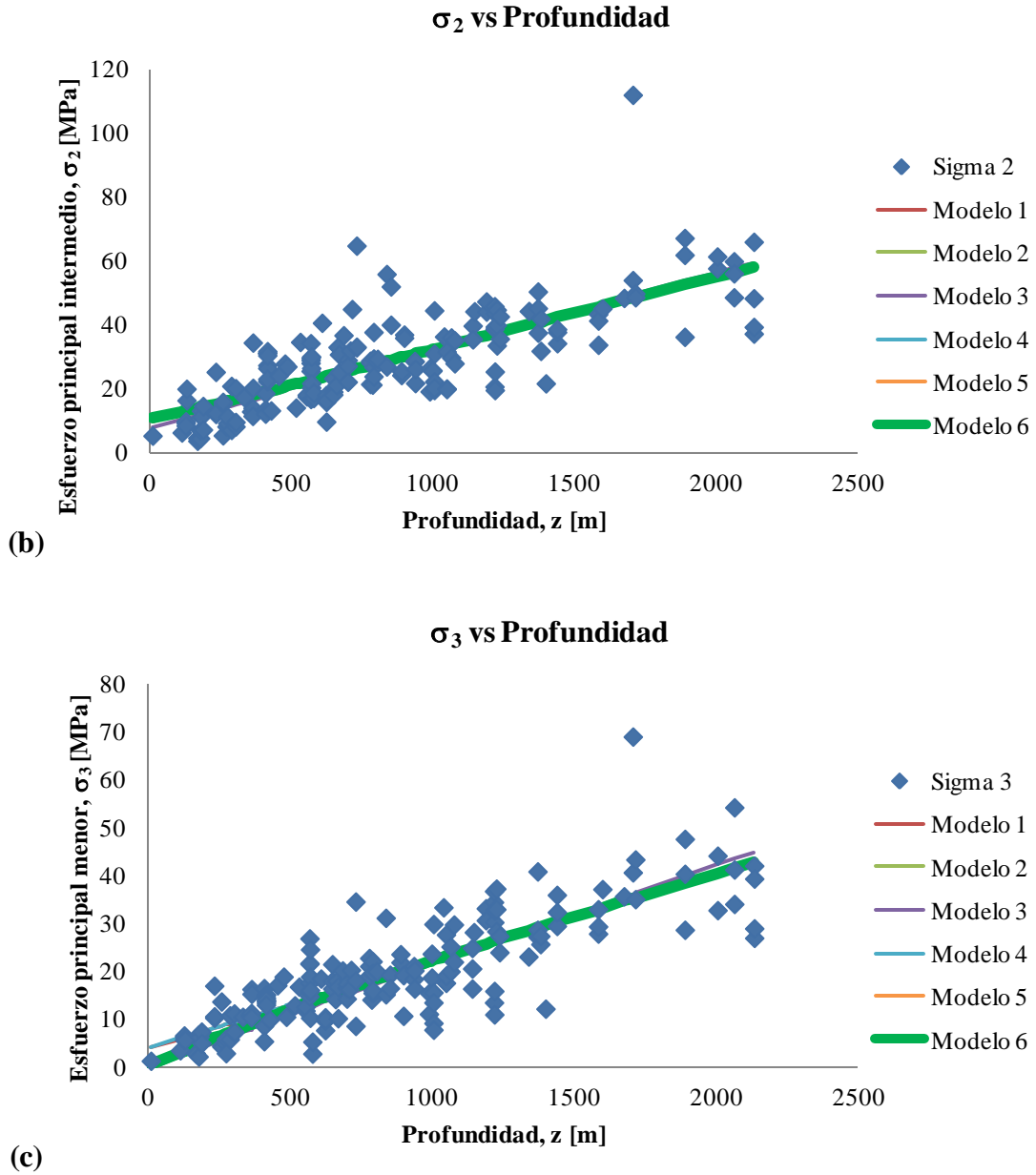


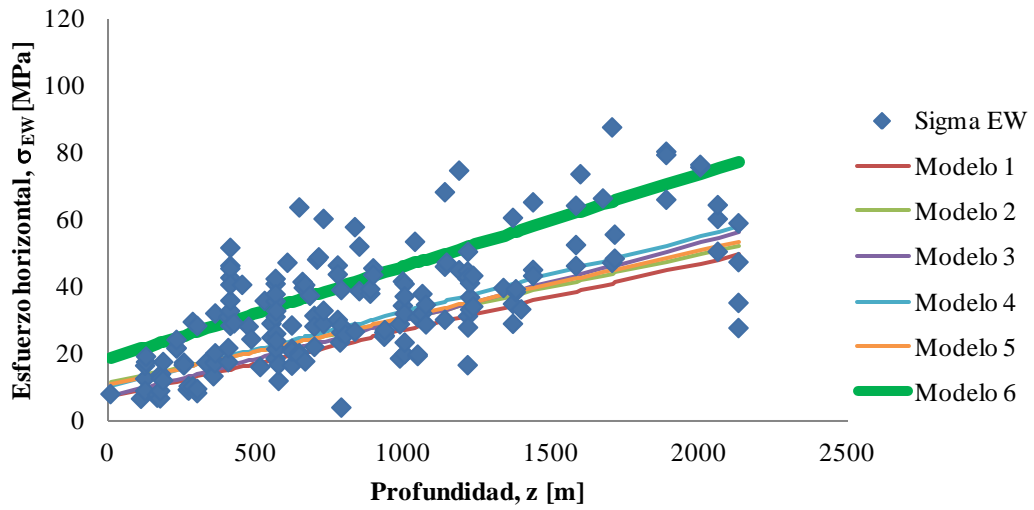
Figura 5-14. Tendencia para el esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor para los 6 modelos, minas canadienses.

Se aprecia en la Figura 5-14 que las tendencias para la mayoría de los modelos son muy similares. En el caso del esfuerzo principal menor (Figura 5-14c) los modelos 1 y 4 muestran trayectorias un poco alejadas en profundidades altas y superficiales.

Al igual que en el caso de la base de datos de minas chilenas los datos muestran tendencias más estables y por lo tanto todos los modelos optimizados tienen similares trayectorias para los esfuerzos principales.

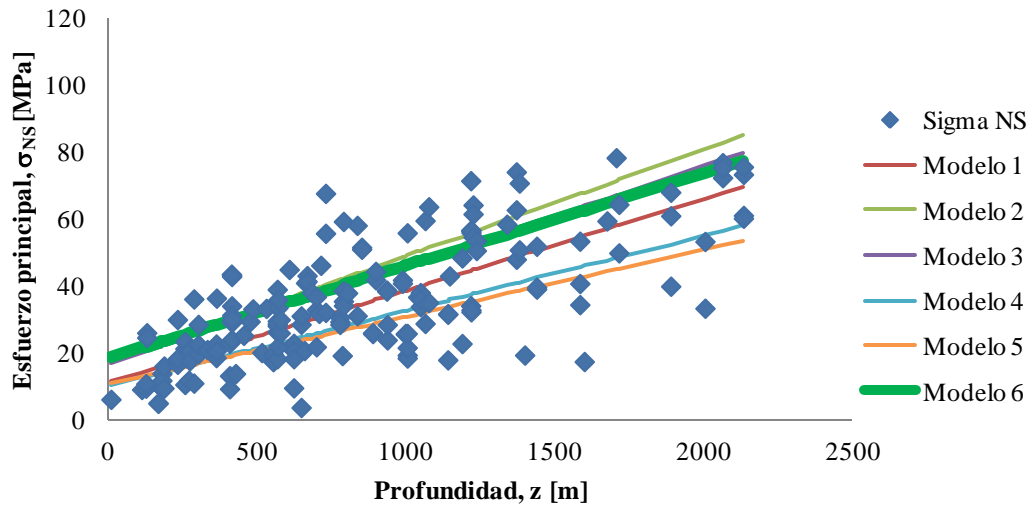
Se muestran las tendencias para los esfuerzos normales.

σ_{EW} vs Profundidad

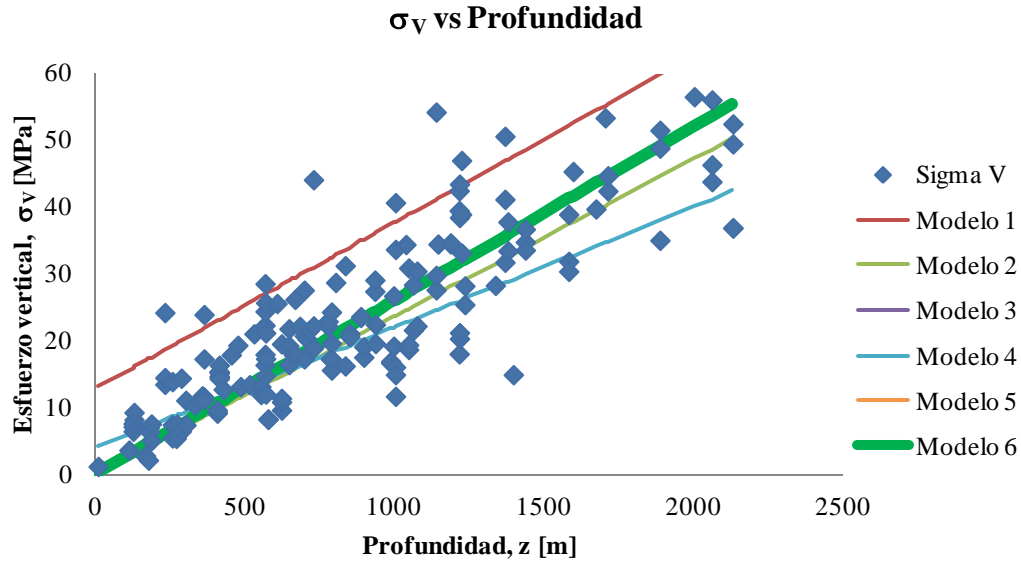


(a)

σ_{NS} vs Profundidad



(b)



(c)

Figura 5-15. Tendencia para el esfuerzo (a) horizontal EW, (b) horizontal NS y (c) vertical para los 6 modelos, minas canadienses.

De las figuras anteriores (Figura 5-15) se tiene que las tendencias para todos los modelos son similares, las diferencias tienen que ver con el valor de la intersección de la recta más que con el gradiente obtenido.

Los esfuerzos horizontales (Figura 5-15a y b) muestran tendencias similares, sin embargo, en el caso de esfuerzo EW la mayoría de los modelos muestran trayectorias con valores menores comparados con el modelo 6. En el caso del esfuerzo vertical (Figura 5-15c), se tienen trayectorias heterogéneas, presentando valores muy altos en el caso del modelo 1.

El resto de las tendencias se presentan en el ANEXO C, donde se observa que todas poseen comportamientos similares gracias a la poca dispersión de los datos y los altos coeficientes de correlación.

Orientaciones

Se muestran las orientaciones de los esfuerzos principales.

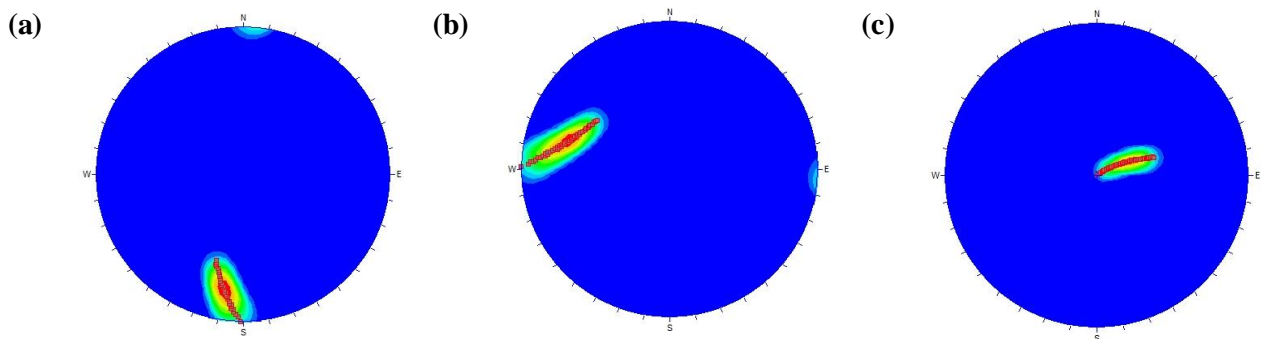


Figura 5-16. Orientación esfuerzo (a) principal mayor, (b) principal intermedio y (c) principal menor, minas canadienses.

Las orientaciones en la Figura 5-16 muestran un pronunciado cambio en la inclinación para todos los esfuerzos y un cambio importante en el azimut para el esfuerzo principal intermedio. Estas orientaciones se comparan en la siguiente sección 5.4.3.

5.4. Comparación con otros modelos

Se comparan todos los modelos optimizados con modelos establecidos por diferentes autores, comparando esfuerzos principales y/o normales, primer invariante, criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914), parámetro b y razones de esfuerzos k.

5.4.1. Minas Chilenas

En este caso se compara con el modelo entregado por Chacón (1988) que entrega las siguientes ecuaciones lineales y exponenciales.

$$\text{Sigma } V = 0.050 * z - 1.110 \quad (68)$$

$$\text{Sigma } H_{m\acute{a}x} = 4.320 \exp^{0.007} \quad (69)$$

$$\text{Sigma } H_{m\acute{i}n} = 1.190 \exp^{0.005} \quad (70)$$

$$\text{Sigma } H_{m\acute{a}x} = 1.110 * z + 3.940 \quad (71)$$

$$\text{Sigma } H_{m\acute{i}n} = 0.977 * z + 1.890 \quad (72)$$

El esfuerzo horizontal máximo se define como el mayor valor entre el esfuerzo con orientación EW y NS, mientras que el esfuerzo horizontal mínimo se define como el esfuerzo EW o NS que tenga el menor valor.

Como se aprecia en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** existe dos ecuaciones ara el esfuerzo horizontal máximo y mínimo que dependen de la profundidad (ecuación exponencial) y del esfuerzo vertical (ecuación lineal). Se utilizaran las dos ecuaciones para compararlas con el modelo obtenido.

Para mantener el mismo criterio se define el esfuerzo horizontal máximo del modelo como el mayor valor entre los esfuerzos horizontales, que en este caso siempre es el esfuerzo con orientación EW y por lo tanto el esfuerzo horizontal mínimo corresponde al esfuerzo NS.

Habiendo unificado los criterios, se presentan a continuación los gráficos de los esfuerzos normales. Cabe destacar que el modelo propuesto por Chacón (1988) solo llega hasta los 700 [m].

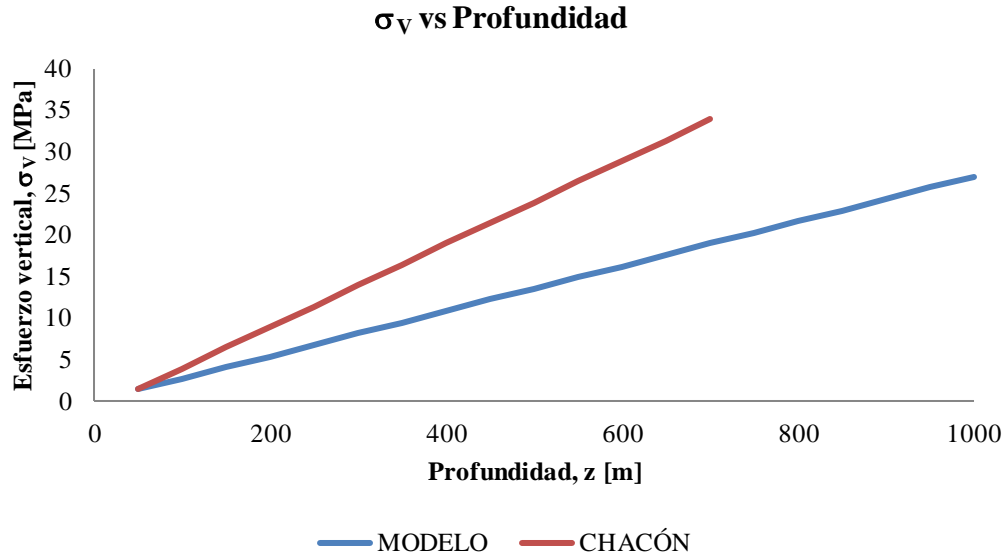


Figura 5-17. Comparación para el esfuerzo vertical, minas chilenas.

Se aprecia en la Figura 5-17 valores más altos para el modelo entregado por Chacón llegando a valores de cerca de 42 [MPa] comparados con los 19 [MPa] del modelo obtenido a 700 [m].

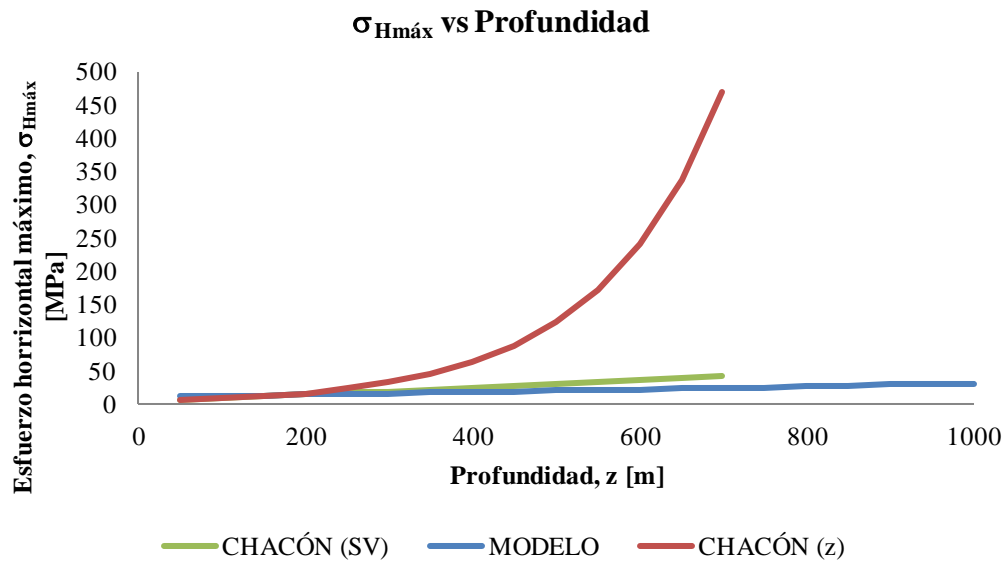


Figura 5-18. Comparación para el esfuerzo horizontal máximo, minas chilenas.

En la Figura 5-18 se muestran las dos ecuaciones que entrega el modelo de Chacón (1988) para el esfuerzo horizontal máximo, de las cuales se aprecia que la ecuación que depende de la profundidad llega a valores que superan en un orden de magnitud a lo obtenido por las otras ecuaciones. Por esto se analizan solo las ecuaciones lineales para apreciar de mejor manera las diferencias entre éstas.

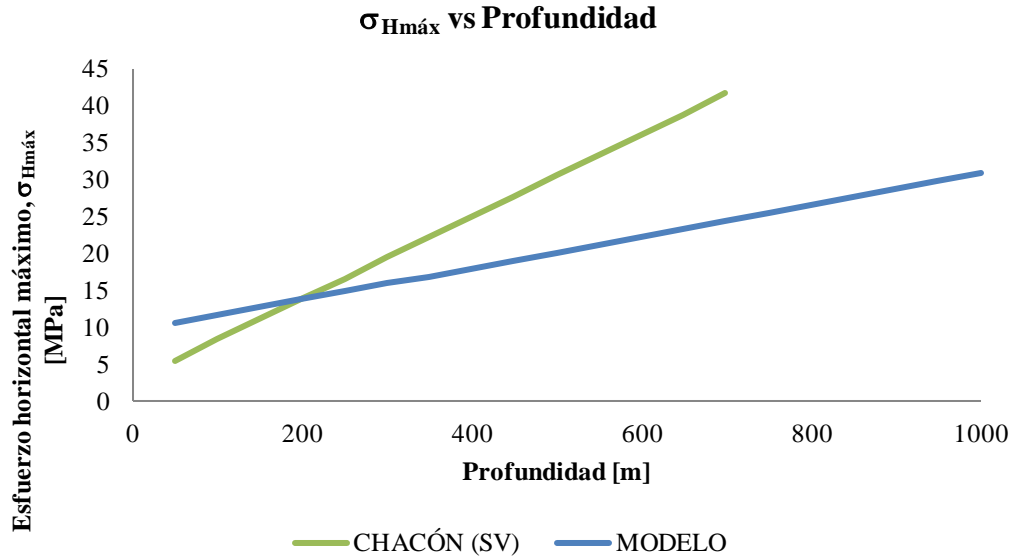


Figura 5-19. Comparación para el esfuerzo horizontal máximo solo ecuaciones lineales, minas chilenas.

Se observa con mayor claridad en la Figura 5-19 que el esfuerzo máximo obtenido por Chacón (1988) muestra valores más altos desde los 200 [m] en adelante y llega a valores cercanos a 40 [MPa] a los 700 [m], mientras que el modelo obtenido llega solo a 24 [MPa] a la misma profundidad.

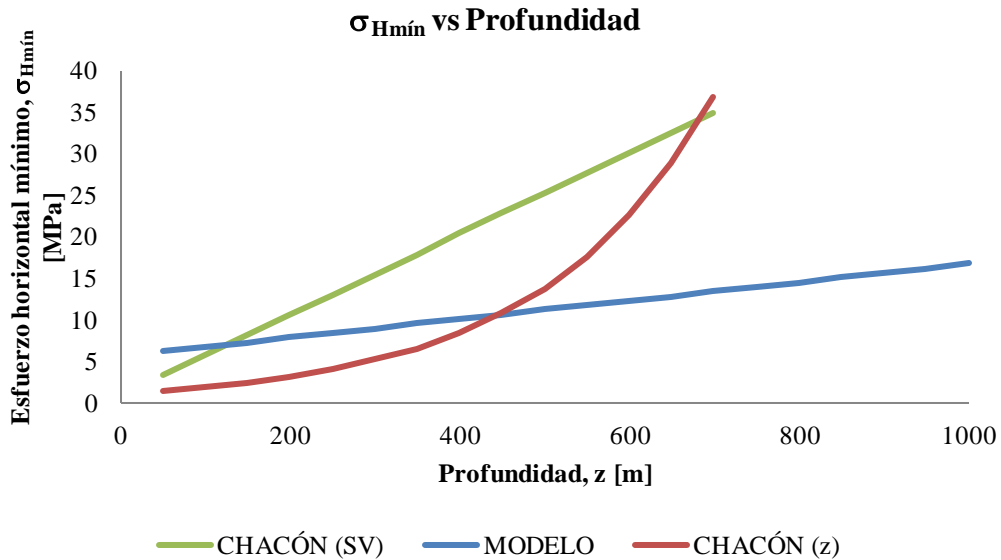


Figura 5-20. Comparación esfuerzo horizontal mínimo, minas chilenas.

En la Figura 5-20 el esfuerzo horizontal mínimo del modelo obtenido es menor luego de los 450[m] y el modelo de Chacón (1988) presenta valores por sobre el doble a los 700 [m].

Se analiza la razón de esfuerzos k para los modelos, teniendo en cuenta que no se realiza por orientación, sino que por esfuerzo horizontal máximo y mínimo.

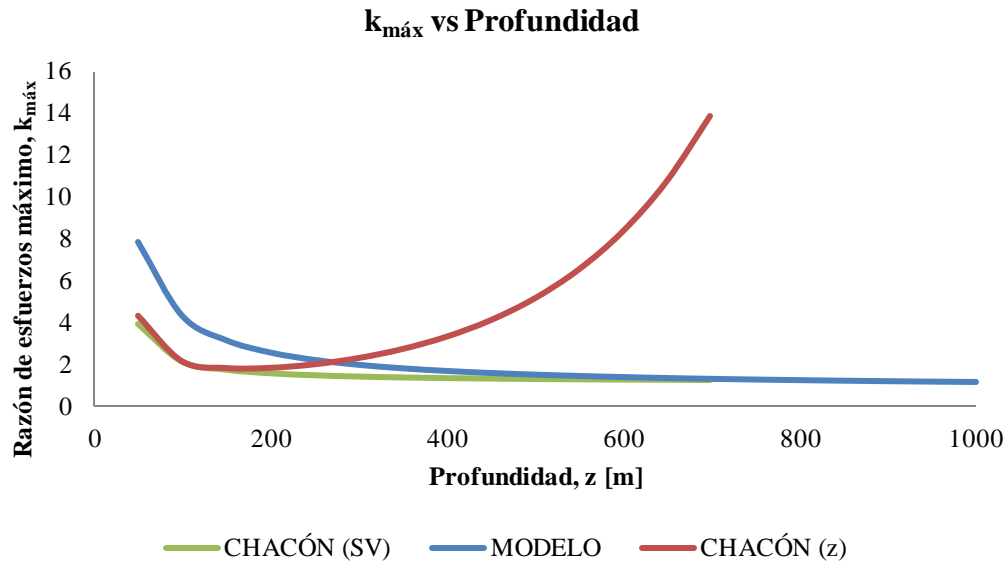


Figura 5-21. Comparación razón $k_{m\acute{a}x}$, minas chilenas.

Se aprecia que la tendencia de la razón $k_{m\acute{a}x}$ (Figura 5-21) de la ecuación en función de la profundidad tiene una forma totalmente atípica ya que luego de los 150[m] aumentan hasta valores cercanos a 14. Este comportamiento muestra que los valores van diferenciándose cada vez más del valor del esfuerzo vertical, lo que en realidad ocurre de manera inversa. Al comparar las otras dos tendencias, se observa que los valores de k son muy similares cuando se llega a los 500 [m] de profundidad, sin embargo, a profundidades superficiales el valor de k del modelo obtenido supera en casi el doble al de Chacón (1988).

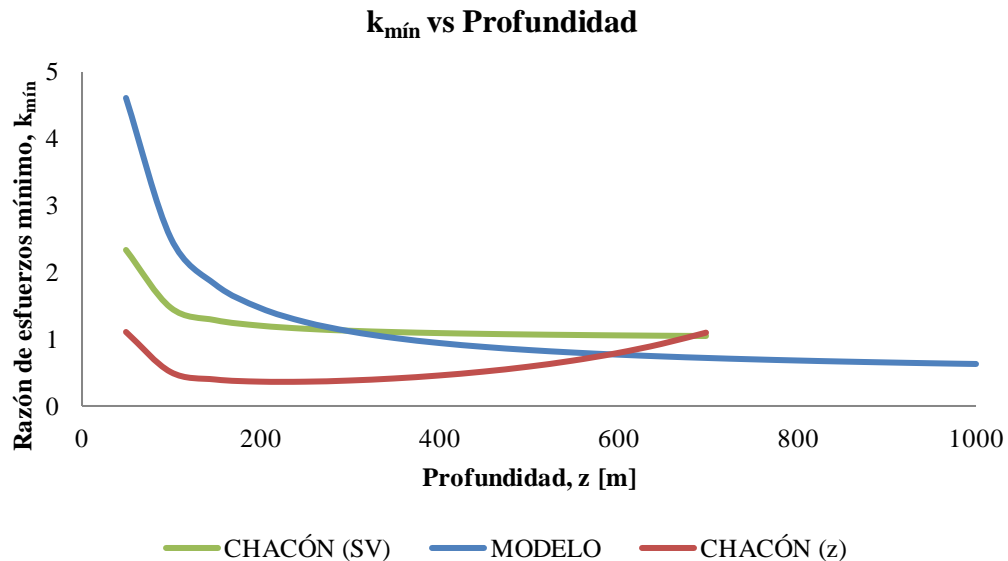


Figura 5-22. Comparación razón $k_{m\acute{i}n}$, minas chilenas.

En el caso del esfuerzo horizontal mínimo (Figura 5-22) también se aprecia que la ecuación que depende de la profundidad (ecuación exponencial) tiene valores que aumentan con la profundidad desde los 150 [m].

En el caso de las otras dos ecuaciones, se observa que tiene la tendencia típica de este parámetro, luego de los 300 [m], muestra valores menores a 1, mientras que la ecuación lineal presentada por Chacón (1988) presenta valores mayores a 1, por lo que se puede concluir que en el caso del modelo propuesto por este último el esfuerzo vertical siempre es el esfuerzo de menor valor, mientras que en el caso del modelo obtenido el esfuerzo mínimo y vertical son similares al profundizar, pero con este último levemente de mayor valor.

Para poder cotejar los valores de la razón de esfuerzos b se calcula este valor mediante la siguiente ecuación.

$$b = \frac{(\text{Esfuerzo Horizontal mínimo} - \text{Esfuerzo Vertical})}{(\text{Esfuerzo horizontal máximo} - \text{Esfuerzo Vertical})} \quad (73)$$

Es decir, se toma como el esfuerzo principal mayor al esfuerzo horizontal máximo, al esfuerzo principal intermedio como el esfuerzo horizontal mínimo y al esfuerzo principal menor como el esfuerzo vertical.

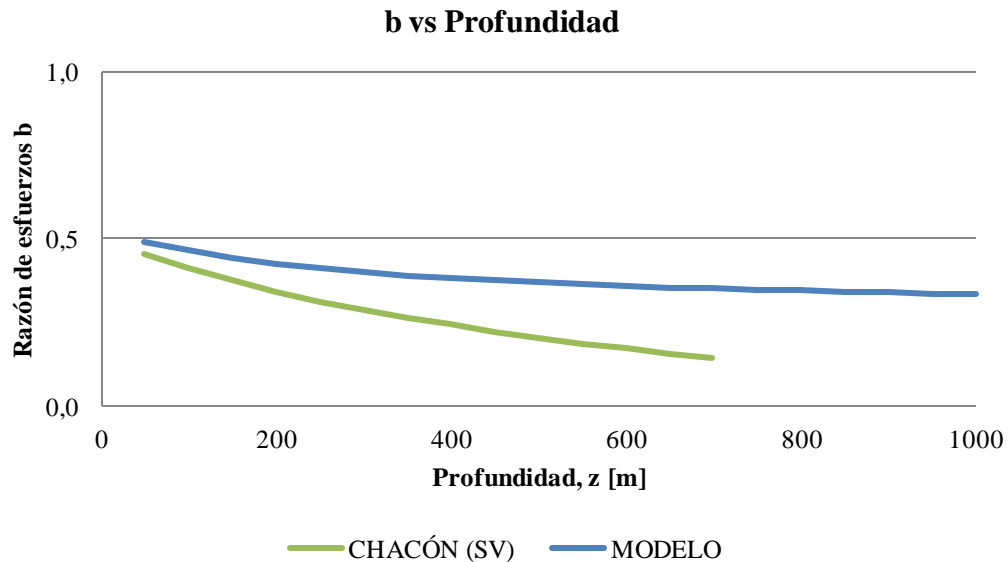


Figura 5-23. Comparación del parámetro b , minas chilenas.

En este caso el modelo presentado por Chacón (1988) muestra una disminución más pronunciada del parámetro b llegando a valores de 0,1 a los 700[m] comparado con el 0,4 del modelo obtenido a la misma profundidad (Figura 5-23).

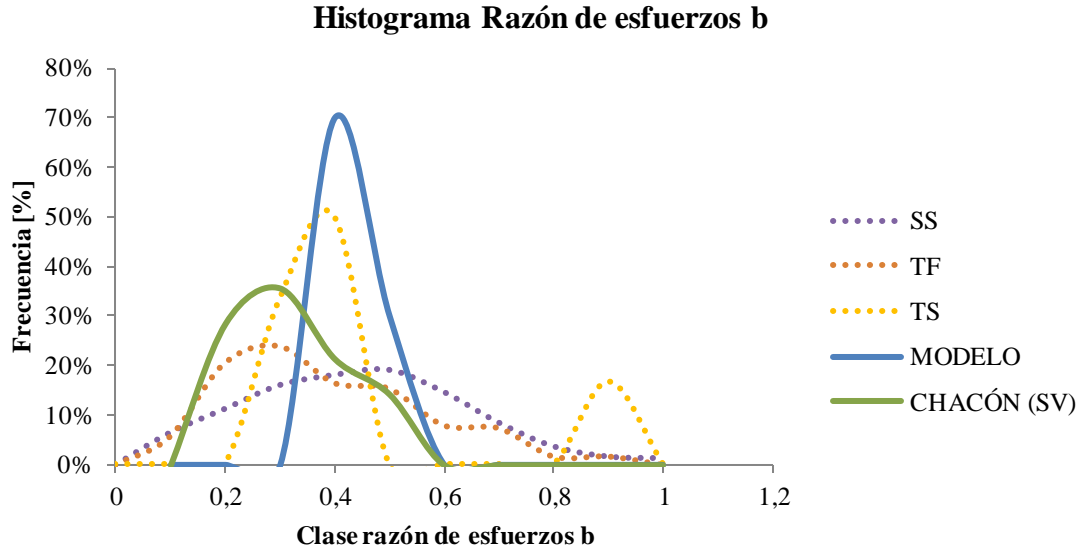


Figura 5-24. Comparación parámetro b y mecanismos focales, minas chilenas.

Se presentan en la Figura 5-24 las diferencias en el mecanismo focal encontrado para los dos modelos. El modelo establecido por Chacón (1988) muestra un mecanismo puro de falla inversa, mientras que en el modelo obtenido se aprecia una componente de falla de rumbo, aun cuando predomina la falla inversa.

Utilizando el mismo criterio que para la razón de esfuerzos b se puede obtener un criterio de Mohr-Coulomb con el cual comparar los modelos.

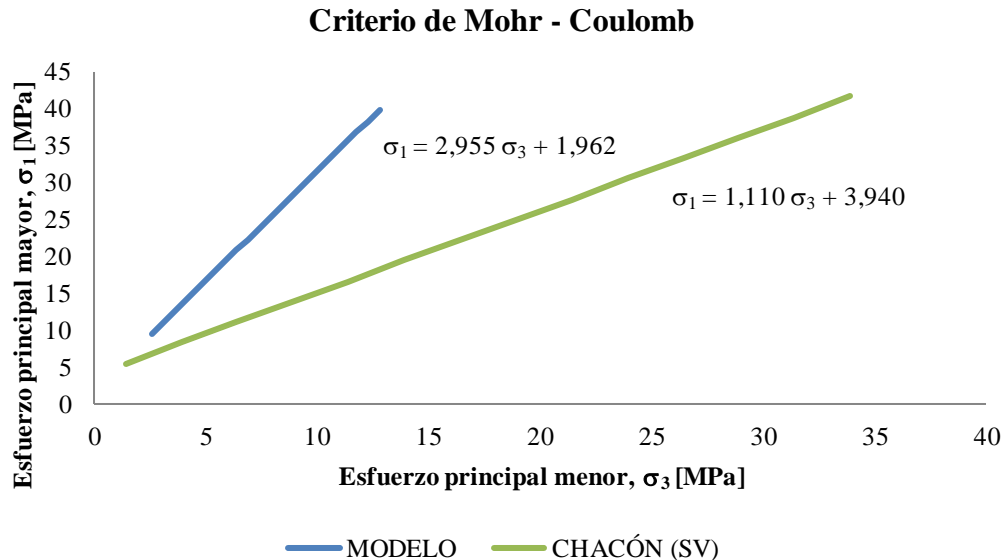


Figura 5-25. Comparación de los criterios de Mohr - Coulomb, minas chilenas.

Se aprecian en la Figura 5-25 tendencias diferentes, obteniendo valores diferentes para la constante de cohesión y de fricción. En el primer caso (cohesión), tanto para el modelo como

para Chacón (1988), se tienen valores que se asocian a rocas de mala calidad. En el caso de la fricción para el modelo, el valor representa a una roca de mala calidad, mientras que en el caso de Chacón (1988) la calidad es regular.

En el caso del primer invariante de esfuerzo se muestra a continuación la comparación.

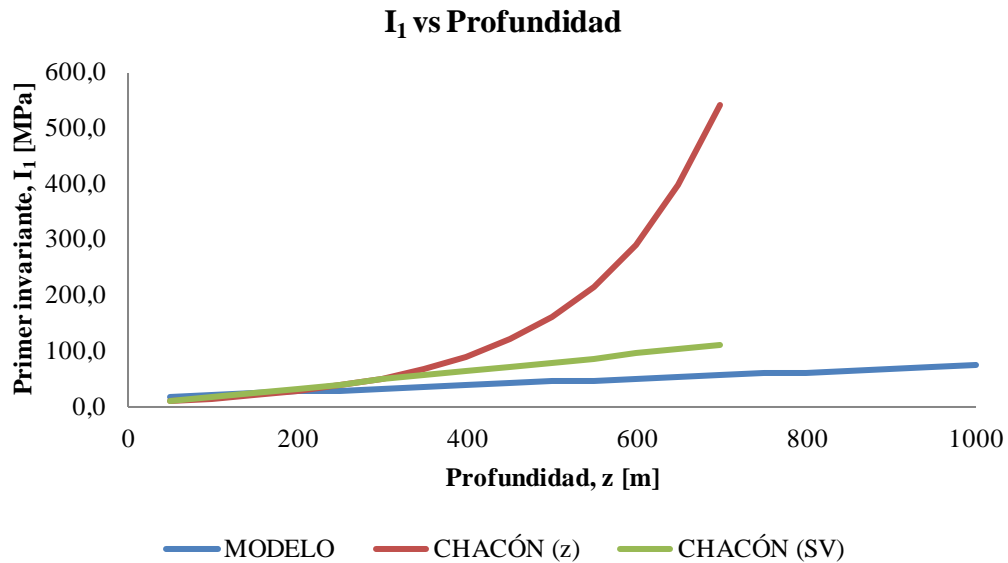


Figura 5-26. Comparación del primer invariante de esfuerzos, minas chilenas.

Se observa en la Figura 5-26 la misma tendencia que cuando se analizan los esfuerzos horizontales máximos, pues el modelo que está en función de la profundidad muestra valores que superan en un orden de magnitud a los modelos lineales. En el caso de las ecuaciones lineales el modelo obtenido es mayor hasta los 200 [m].

5.4.2. Mina 6

Para la comparación de la mina 6 se utiliza un modelo asociado a esta mina en particular, utilizando en particular los esfuerzos principales y el vertical.

En el caso del esfuerzo vertical, el modelo con el cual se realiza la comparación muestra tendencias para diferentes lugares de la mina 6, mientras que en el caso de los esfuerzos principales se muestra una tendencia global.

Se muestra a continuación las tendencias para los esfuerzos principales.

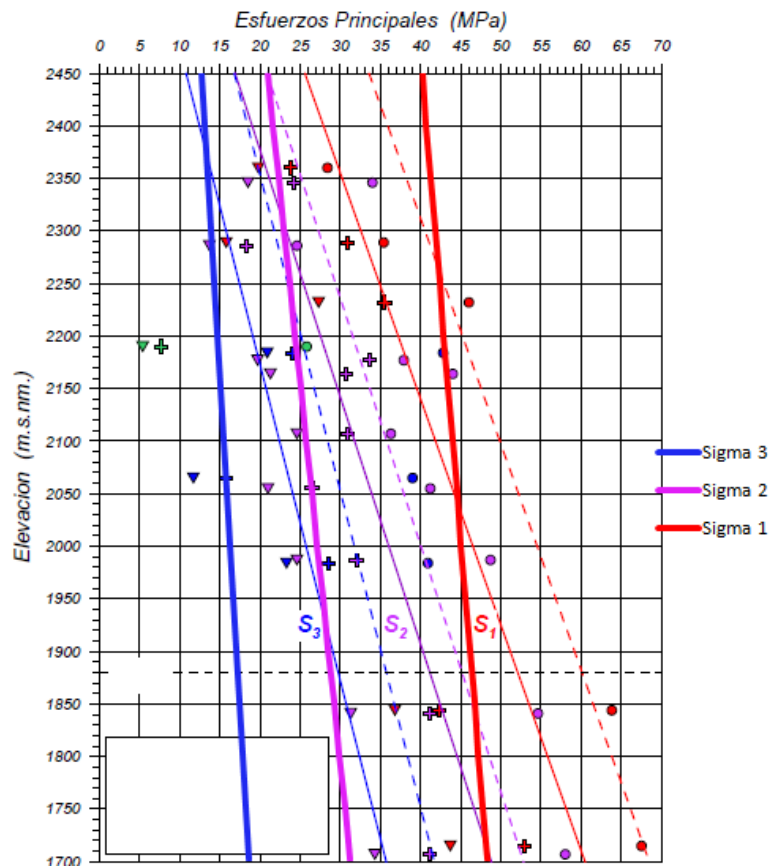


Figura 5-27. Comparación esfuerzos principales, mina 6.

Se observa que las tendencias muestran trayectorias diferentes a las propuestas por el modelo obtenido con la metodología planteada en este informe. Los gradientes del modelo propio son menores al modelo externo, para las intersecciones el esfuerzo menor y intermedio tienen valores similares, al contrario del esfuerzo principal mayor.

Se muestra la comparación del esfuerzo vertical.

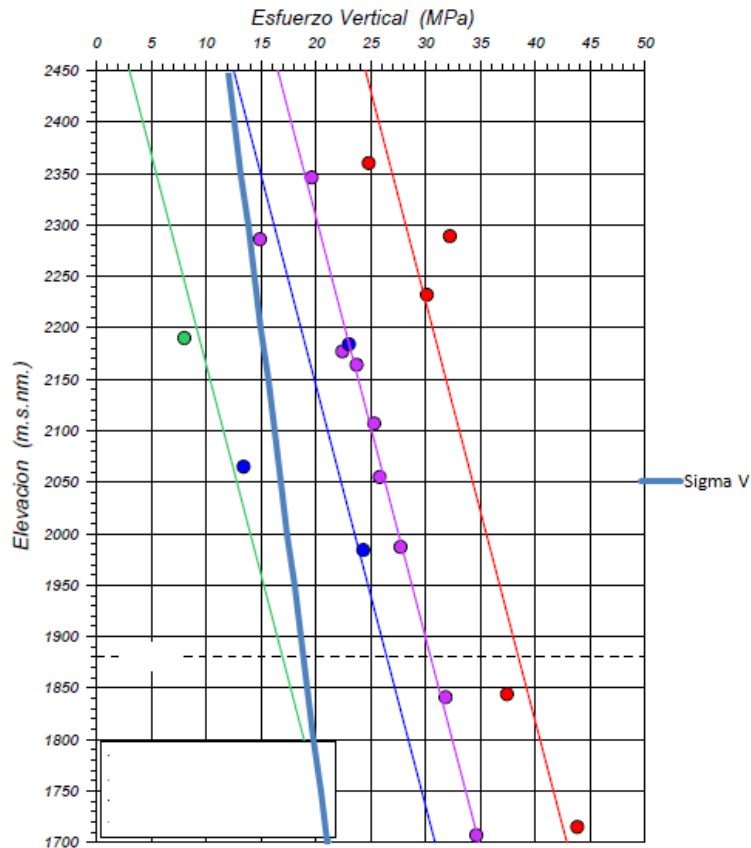


Figura 5-28. Comparación esfuerzo vertical, mina 6.

Se interpreta de la Figura 5-28 que el esfuerzo vertical coincide al inicio con una de las tendencias propuesta por el autor del modelo externo, pero al profundizar la tendencia coincide con otra de las trayectorias. El gradiente del modelo presentado en este trabajo es menor a todas las ecuaciones propuestas por el autor del modelo externo.

Con respecto a las orientaciones propuestas por el modelo obtenido (Figura 5-12) el esfuerzo principal mayor tiene orientación NS y en modelo externo muestra que la orientación depende mucho del lugar donde se realiza la medición, pero existen grandes indicios de que también sea NS.

El esfuerzo principal menor muestra orientaciones verticales que coinciden con lo obtenido con el modelo externo.

5.4.3. Minas canadienses

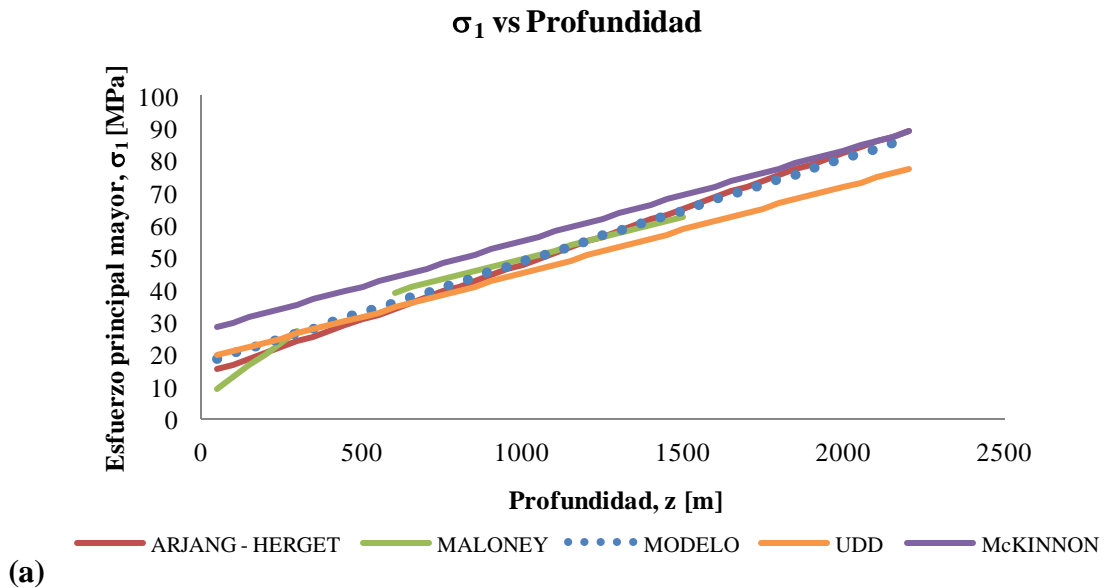
En el caso de las minas canadienses existe una mayor cantidad de autores con modelos propuestos, donde en general las ecuaciones entregadas son las que corresponden a los esfuerzos principales.

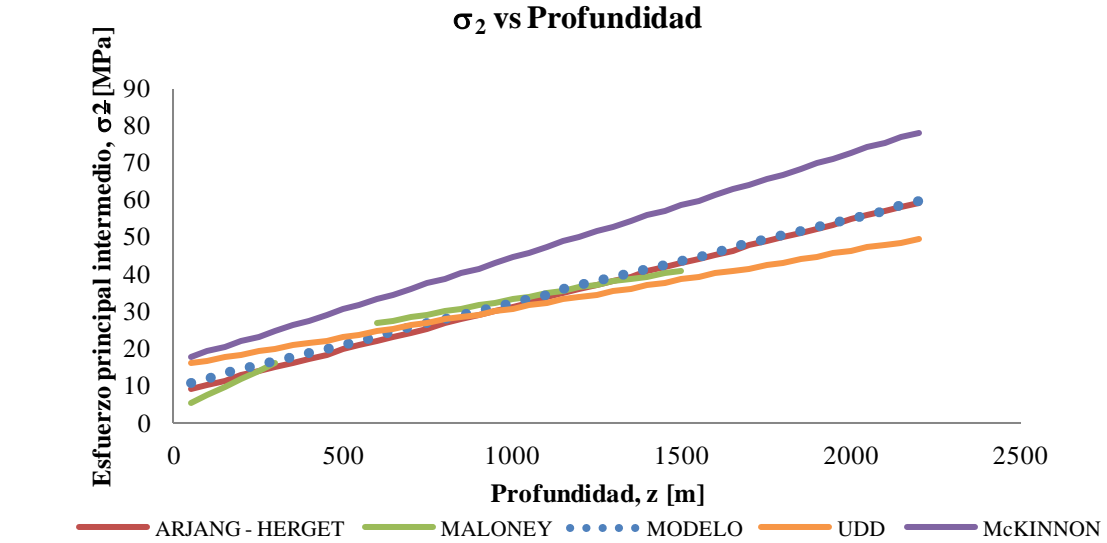
Tabla 5-12. Modelos utilizados para la comparación del modelo de minas canadienses (McKinnon y Labrie 2006) (Udd 2006) (Arjang y Herget 1997) (Maloney, Kaiser y Vorauer 2006).

País, Región	Prof [m]	σ_1 [MPa]		σ_2 [MPa]		σ_3 [MPa]		σ_v [MPa]		Autor
		Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	Inter [MPa]	Grad [MPa/m]	
Canadá	0-300	5,768	0,071	3,287	0,043	0,000	0,034	-	-	(Maloney, Kaiser y Vorauer 2006)
Canadá	600-1.500	23,636	0,026	17,104	0,016	1,066	0,020	-	-	(Maloney, Kaiser y Vorauer 2006)
Canadá	0-2.250	13,500	0,034	8,000	0,023	3,000	0,018	-	-	(Arjang y Herget 1997)
Canadá	0-2.190	27,010	0,028	16,350	0,028	0,000	0,028	-	-	(McKinnon y Labrie 2006)
Canadá	250-2200	18,288	0,027	15,293	0,015	7,468	0,013	8,189	0,017	(Udd 2006)

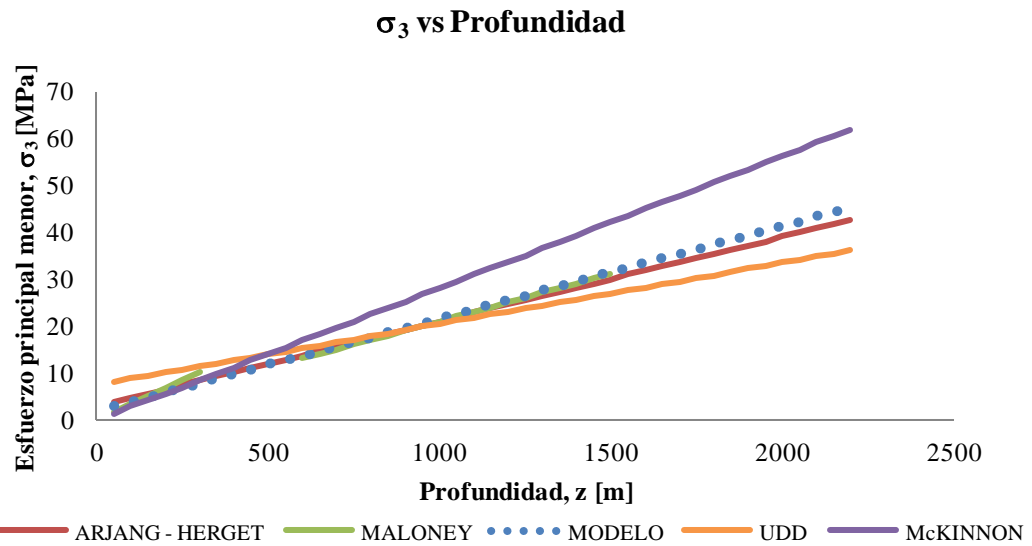
El modelo de Maloney y otros (2006) entrega diferentes tendencias para dos tramos de profundidades. Se comparan los esfuerzos principales, el esfuerzo vertical, 1° Invariante, criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914) y el parámetro b.

Se presentan las tendencias de los esfuerzos principales.





(b)



(c)

Figura 5-29. Comparación esfuerzo principal menor, minas canadienses.

Se distingue en la Figura 5-29 que las tendencias en general son muy similares para todos los esfuerzos, sin embargo, para el caso del esfuerzo principal intermedio y menor el modelo de McKinnon y otros (2006) se eleva por el resto de las tendencias. Es indispensable recordar que este autor analiza un lugar en particular de Canadá y que dentro de sus conclusiones distingue que su modelo es diferente al obtenido por otros autores que analizan minas de todo el país (Sección 2.6.1).

Se expone a continuación la comparación del esfuerzo vertical.

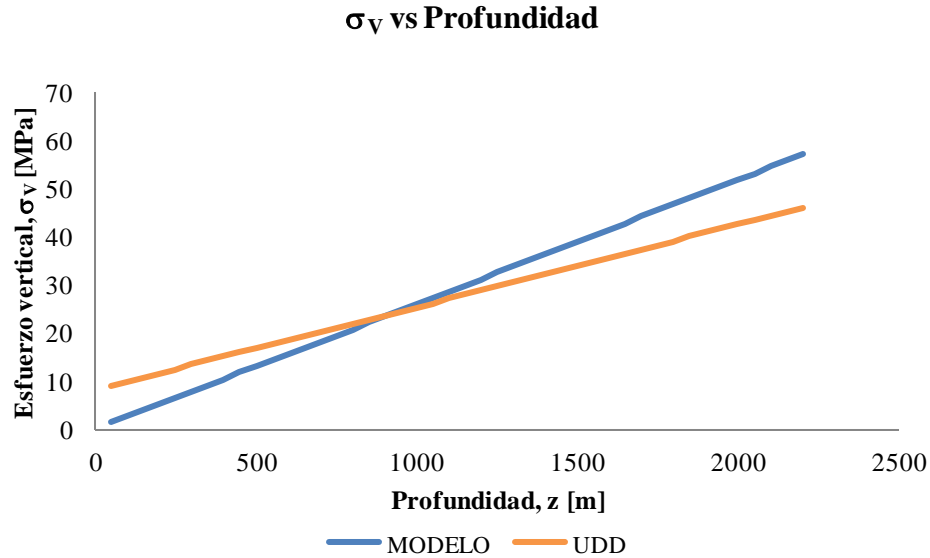


Figura 5-30. Comparación esfuerzo vertical, minas canadienses.

En la Figura 5-30 los esfuerzos muestran tendencias similares, no obstante, en el modelo de Udd (2006) la intersección tiene un valor positivo y el gradiente es menor al del modelo obtenido. A los 2200 [m] el modelo obtenidos muestra un valor de 57[MPa] comparados con los 46[MPa] en el modelo de Udd (2006).

La comparación del 1° Invariante de esfuerzos se muestra a continuación.

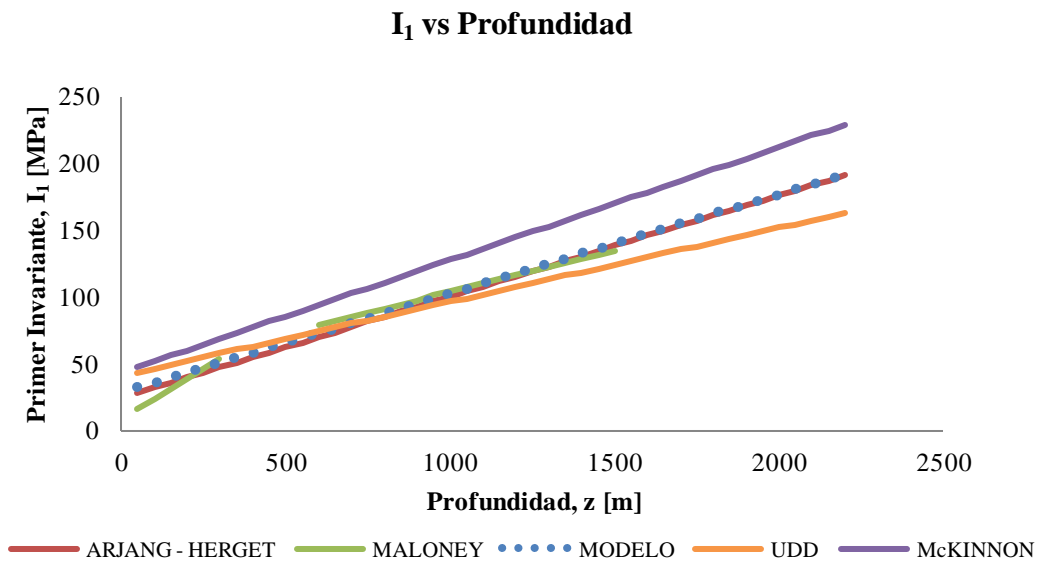


Figura 5-31. Comparación de la primera invariante de esfuerzos, minas canadienses.

La tendencia de McKinnon y otros (2006) y de Udd (2006) se aleja por poco del resto de los modelos. El modelo obtenido muestra una tendencia promedio comparados a todos los autores.

La comparación del criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914).

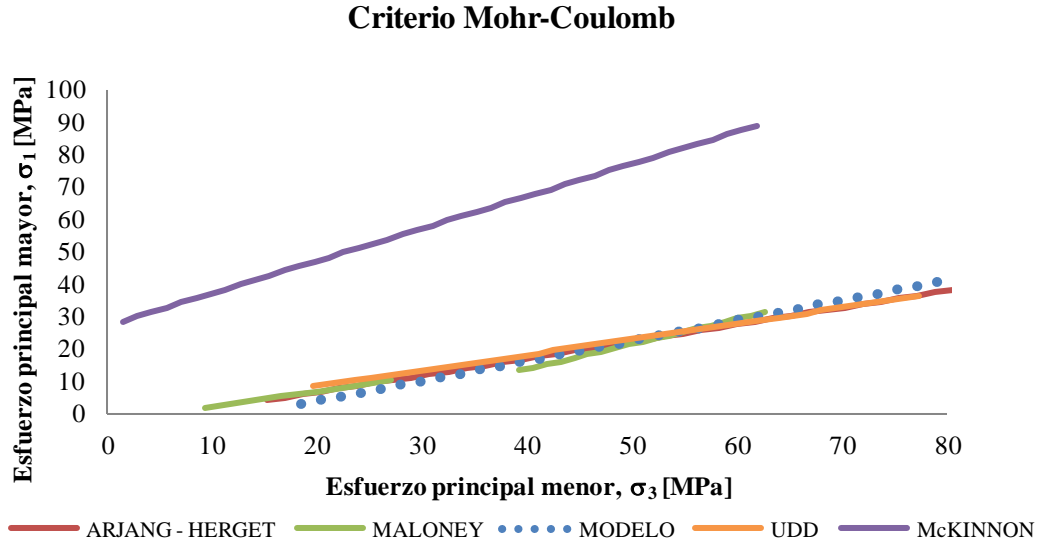


Figura 5-32. Comparación del criterio de Mohr-Coulomb, minas canadienses.

En este caso la diferencia del modelo de McKinnon y otros (2006) es notable y muestra por lo tanto un macizo de una calidad diferente que el resto de los modelos (Figura 5-32). Como se dijo anteriormente en este último modelo las mediciones analizadas son de un lugar en particular, por ende pueden tener diferentes constantes para la cohesión y la fricción

La razón de esfuerzos b es comparado en la siguiente Figura 5-33.

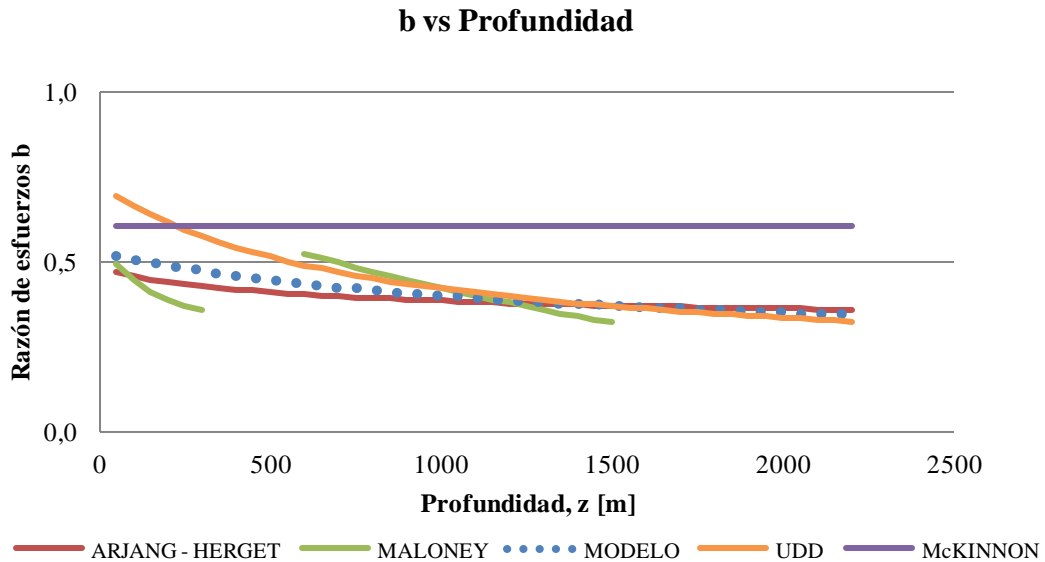


Figura 5-33. Comparación parámetro b, minas canadienses.

Por último la comparación del parámetro b muestra tendencias similares para todos los modelos, excepto para el de McKinnon y otros (2006).

En el caso de las orientaciones, el modelo obtenido (Figura 5-12) muestra para el esfuerzo principal mayor orientaciones que van desde NS al NE-SW, esto coincide con lo obtenido por los autores con los cuales se realiza la comparación, ya que ellos muestran tendencias que van desde orientaciones NNE-SSW hasta orientaciones NE-SW concluyendo que la orientación calza con el comportamiento tectónico de la región.

En el caso del esfuerzo vertical todos los modelos presentan orientaciones casi verticales con una orientación EW.

5.5. Comentarios Finales

Se presenta el modelo para Chile, mina 6 y Canadá (Tabla 5-13):

Tabla 5-13. Resumen de los modelos obtenidos.

	<i>Chile</i>		<i>Mina 6</i>		<i>Canadá</i>	
	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>
τ_{EN}	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,121
τ_{EV}	0,010	0,309	0,006	0,000	0,005	0,000
τ_{NV}	0,007	0,235	0,000	0,000	0,006	0,000
σ_{EW}	0,021	9,462	0,010	21,648	0,020	10,387
σ_{NS}	0,011	5,648	0,011	40,215	0,028	18,200
σ_V	0,027	0,000	0,012	12,008	0,026	0,000

El uso de las restricciones aumenta los valores del AIC, sin embargo, estas no se cumplen por un bajo margen. Esto muestra que los modelos optimizados, para todas las alternativas, siempre se asemejan al comportamiento inicial de la base de datos.

El uso de las constantes que definen el esfuerzo vertical son muy importantes sobre todo cuando se tiene una baja dispersión y un alto coeficiente de determinación ya que entregan las mejores estimaciones para el modelo, según lo visto en los ejemplos de minas chilenas y canadienses. En el caso de la mina 6, la alta dispersión produce el efecto contrario y se define como mejor modelo el que deja las constantes libres para este esfuerzo.

La metodología muestra modelos similares a los obtenidos por otros autores sobre todo en el caso de minas canadienses. Esta comparación es la que mejor establece el comportamiento de la metodología utilizada por la cantidad de autores que son comparados.

En el caso de la mina 6 la alta dispersión produce que puedan definirse diferentes interpretaciones de los datos y por lo tanto que los modelos no coincidan.

Se observa que las orientaciones obtenidas muestran grandes similitudes con lo obtenido por otros autores.

6. IMPACTO DE LOS ESFUERZOS IN SITU EN EL DISEÑO MINERO SUBTERRÁNEO

Como se explica en la sección 3.5 se analizan tres estructuras que son: pilares, túneles y caserones además del tipo de soporte, todo esto dependiendo de la razón k . Se muestran a continuación los resultados.

6.1. Pilares

Utilizando la fórmula de Coates (1981) se calcula la razón entre el esfuerzo sobre el pilar y el esfuerzo vertical en función de la razón de esfuerzos k en tres escenarios diferentes.

Distintos h/L

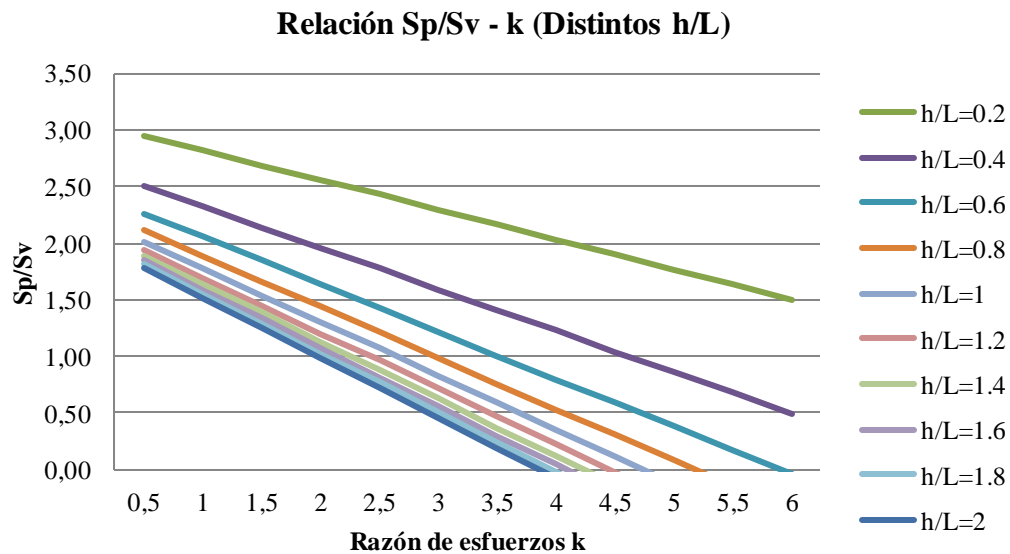


Figura 6-1. Relación entre S_p/S_v y la razón k para diferentes h/L , pilares.

Se observa en la Figura 6-1 que cuando el k aumenta la carga sobre el pilar disminuye, esto ya que al aumentar el esfuerzo horizontal los esfuerzos sobre el pilar se relajan y por lo tanto la carga es menor. Este comportamiento se produce a bajas profundidades, donde la diferencia entre el esfuerzo horizontal y el vertical es grande.

Al comparar las diferentes razones h/L se tiene que cuando la altura aumenta la carga sobre el pilar disminuye, teniendo la misma explicación que para cuando aumenta el k , ya que la distribución de esfuerzos hace que cuando el pilar es de mayor altura exista una mayor relajación de los esfuerzos.

Variación de r

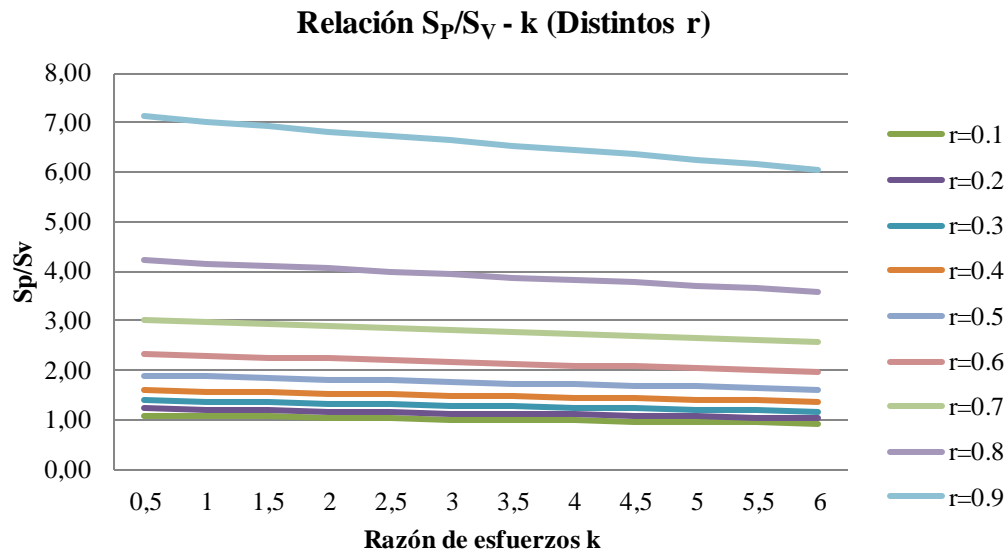


Figura 6-2. Relación entre el S_p/S_v y la razón k para distintos r, pilares.

Se muestra en la Figura 6-2 que cuando aumenta la razón de esfuerzos k la carga sobre el pilar disminuye, sin embargo, el valor sigue siendo mayor al esfuerzo vertical, esto ocurre por la relajación de esfuerzos sobre el pilar.

Al analizar la razón r que relaciona el ancho del pilar con el ancho de la galería o caserón se observa que al aumentar este valor, lo que implica que el ancho del pilar es menor a un mismo ancho de galería, la carga del pilar aumenta y de manera exponencial, lo que significa que al aumentar el valor de r la carga del pilar aumenta rápidamente.

Distintos E_{rm}/E_{pm}

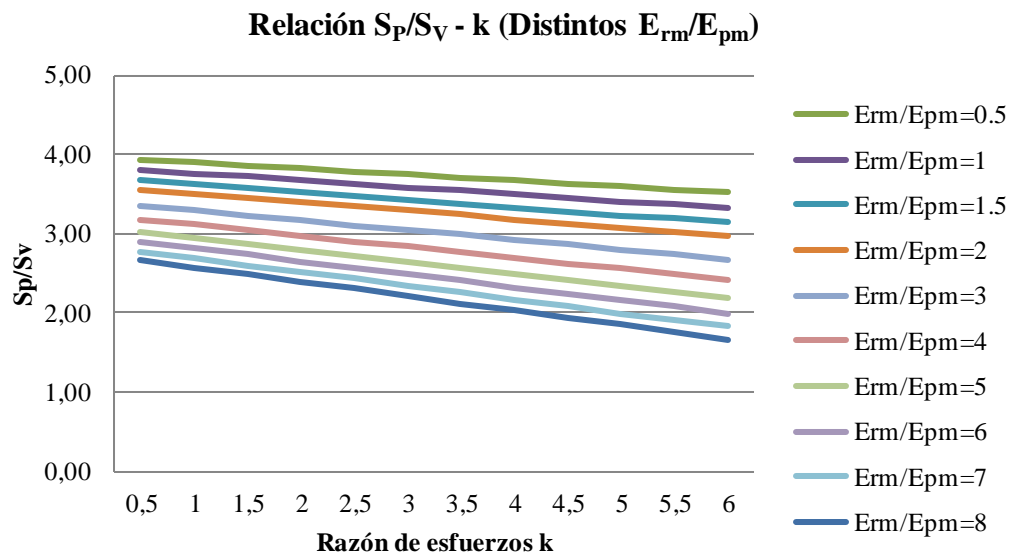


Figura 6-3. Relación entre el S_p/S_v y la razón k para distintos E_{rm}/E_{pm} , minas chilenas.

CAPÍTULO 6 IMPACTO DE LOS ESFUERZOS IN-SITU EN EL DISEÑO MINERO

Al analizar la Figura 6-3, como en todas las figuras anteriores, que al aumentar la razón k , la carga del pilar disminuye por lo explicitado en el resto de las figuras.

Cuando se aumenta la razón E_{rm}/E_{pm} la carga del pilar disminuye, debido a que la roca caja es más rígida, por lo que se necesita un esfuerzo mayor para deformarla.

6.2. Caserones

Para analizar el comportamiento del ELOS en función del k se realiza un modelo en el software Phase2. Se muestra a continuación el modelo utilizado.

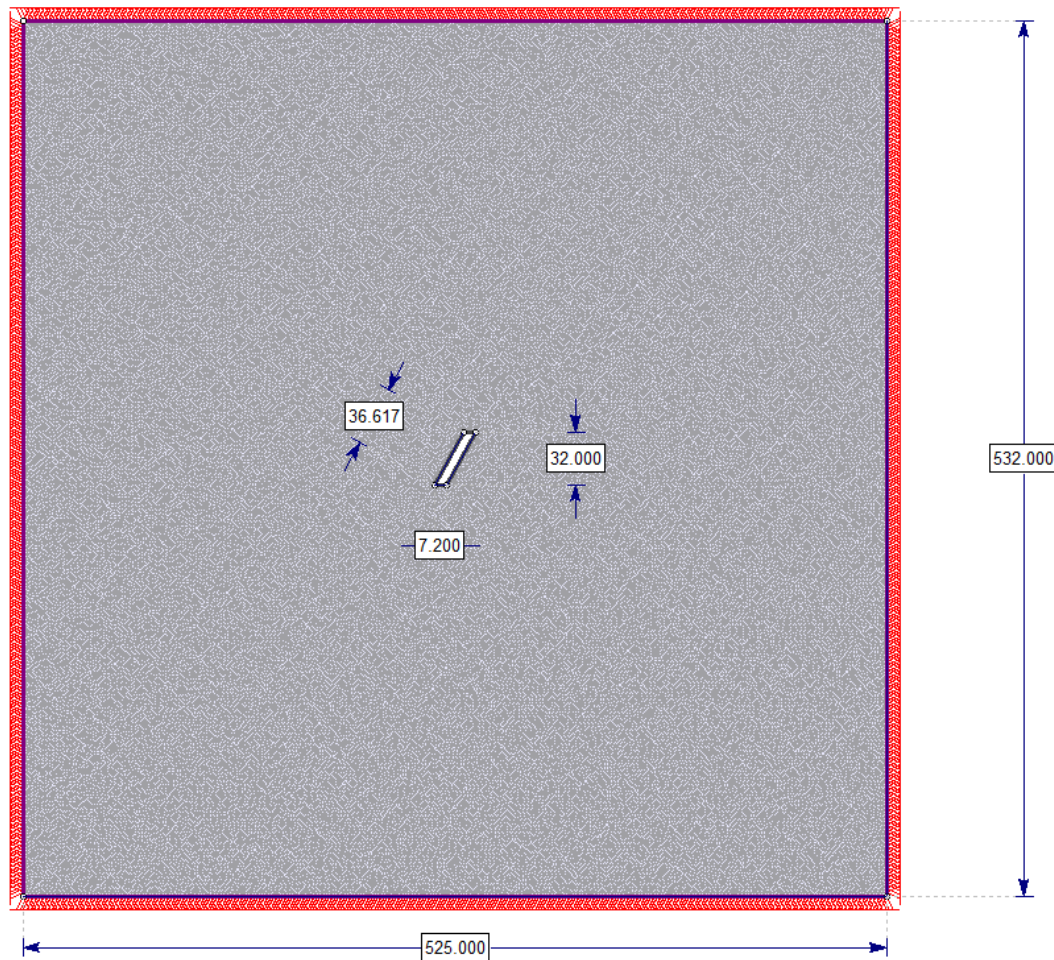


Figura 6-4. Modelo Phase2, caserones.

Se distinguen las dimensiones mencionadas en la sección 3.5.3 para el caserón y se aplican las propiedades al material y se utiliza el esfuerzo vertical como sigue (Figura 6-4).

$$\sigma_v = 0.027 * z \quad (73)$$

Se utiliza el criterio descrito en la metodología para estimar el ELOS de la pared colgante, y el gráfico a continuación muestra los resultados.

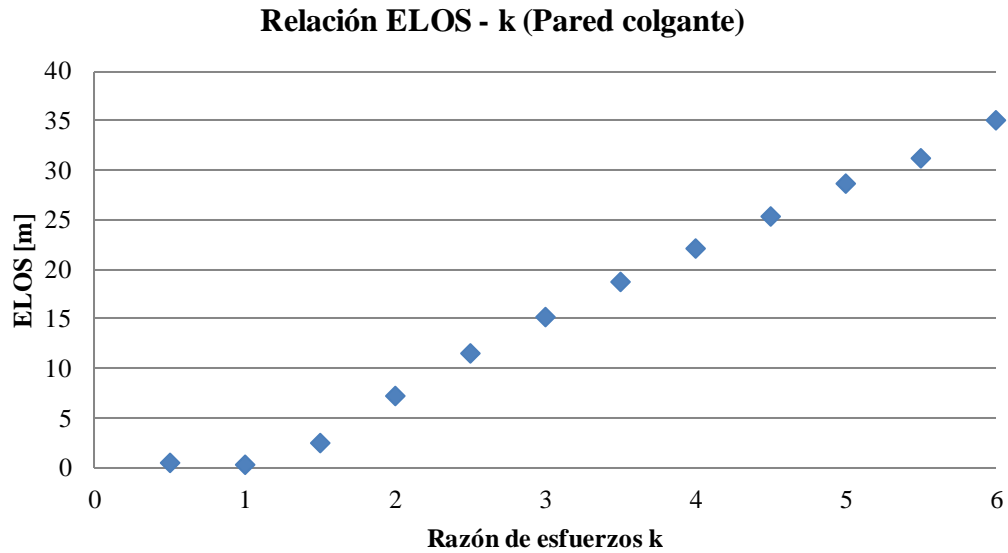


Figura 6-5. Relación entre el ELOS y la razón k, caserón.

En la Figura 6-5 se nota que cuando el k aumenta, la profundidad de falla promedio aumenta de manera lineal luego del k=1. Se observa que cuando la razón k disminuye a 0,5 el valor de ELOS también aumenta, lo que dice que para un estado de esfuerzo hidrostático la profundidad de la falla es la mínima.

6.3. Túneles

En este caso se realizan dos estudios, el primero relacionado con las características del macizo rocoso y en el segundo se evalúa el comportamiento de diferentes razones S_C/S_V .

Distintos macizos rocosos

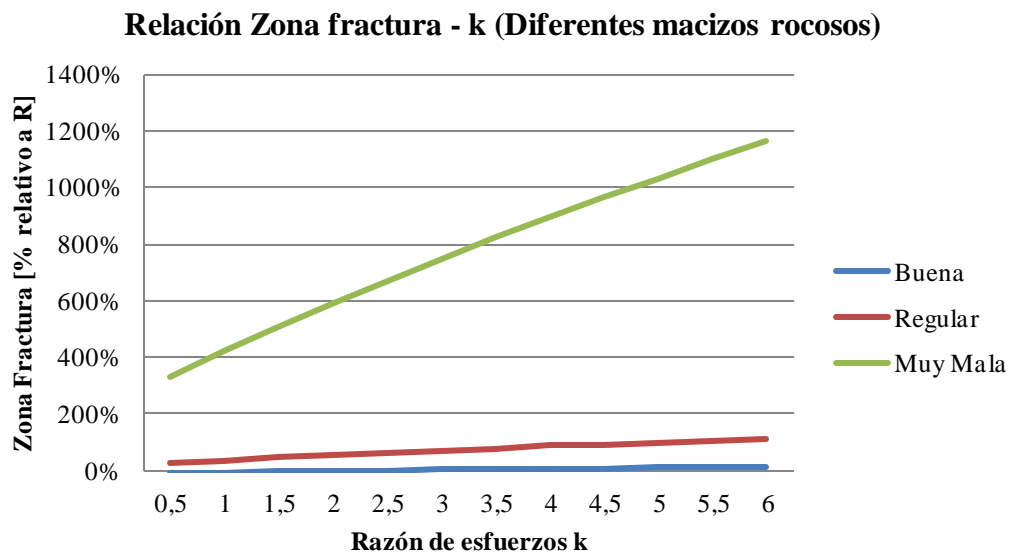


Figura 6-6. Relación entre la zona de fractura y la razón k para diferentes macizos rocosos, túnel.

CAPÍTULO 6 IMPACTO DE LOS ESFUERZOS IN-SITU EN EL DISEÑO MINERO

Para el macizo rocoso de peor calidad se muestra una zona de fractura que va desde valores cercanos al 300% relativo al radio hasta 1200% relativo al radio. Como no se distingue el comportamiento del resto de los macizos se muestra la siguiente figura para los de mejor calidad (Figura 6-6).

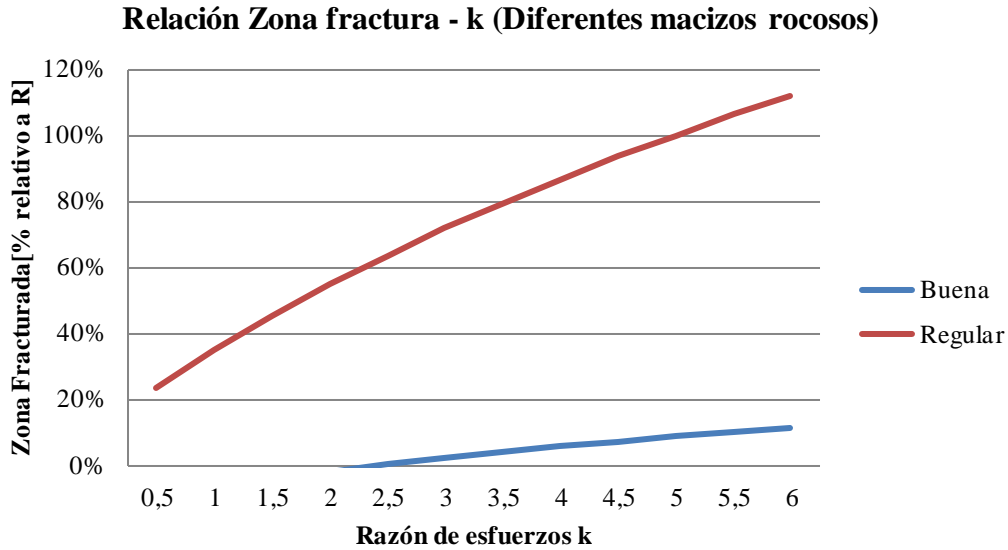


Figura 6-7. Relación entre la zona de fractura y la razón k solo los mejores macizos, túnel.

La Figura 6-7 muestra que para el caso de la roca regular el porcentaje varía desde el 20% hasta el 110% relativo al radio, mientras que para una roca buena va desde -10% a 10% relativo al radio.

Se aprecia que la calidad del macizo rocoso es relevante en el radio de la zona fracturada, por lo que su buena interpretación ayudará a establecer dimensiones que serán seguras y estables.

Diferentes S_c/S_v

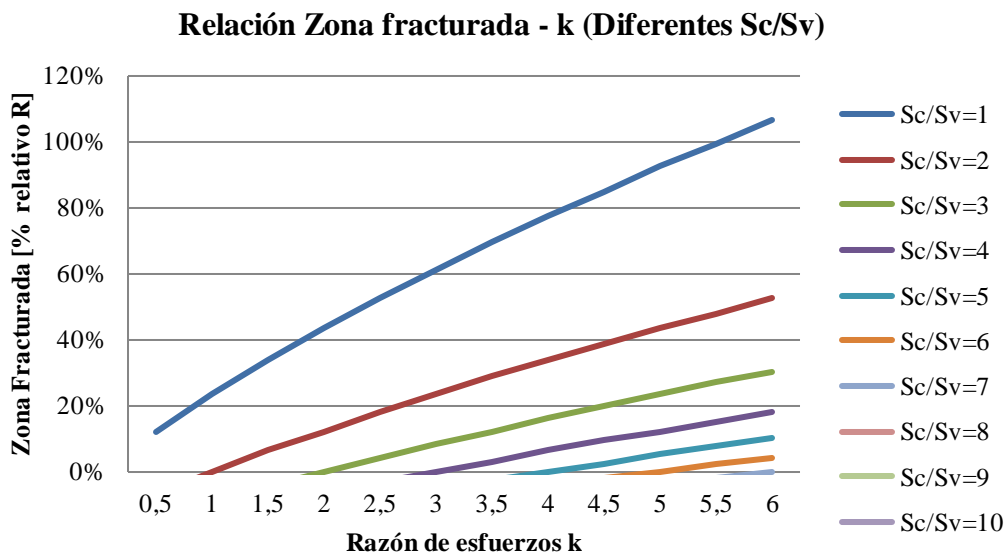


Figura 6-8. Relación entre la zona fracturada y la razón k para diferentes S_v/S_c , túnel.

De la Figura 6-8 se interpreta que cuando aumenta la razón de esfuerzo k , el radio de la zona fracturada aumenta, lo que se relaciona con lo observado en la tendencia del ELOS, que muestra que para un estado de esfuerzos no hidrostático se tiene una zona de fractura mayor.

Al analizar los diferentes valores para S_c/S_v se nota que, al aumentar la razón de esfuerzos k , la zona de fractura disminuye, esto debido a que el S_c aumenta, lo que significa que la calidad de la roca mejora y por lo tanto la estabilidad mejora también.

6.4. Tipo de Soporte

En este caso se estudia el efecto de la razón k al SRF y al tipo de soporte necesitado para una galería utilizada en una de las minas chilenas.

SRF

Se presentan dos tendencias del SRF en función del k para 500 [m] y 700 [m] de profundidad.

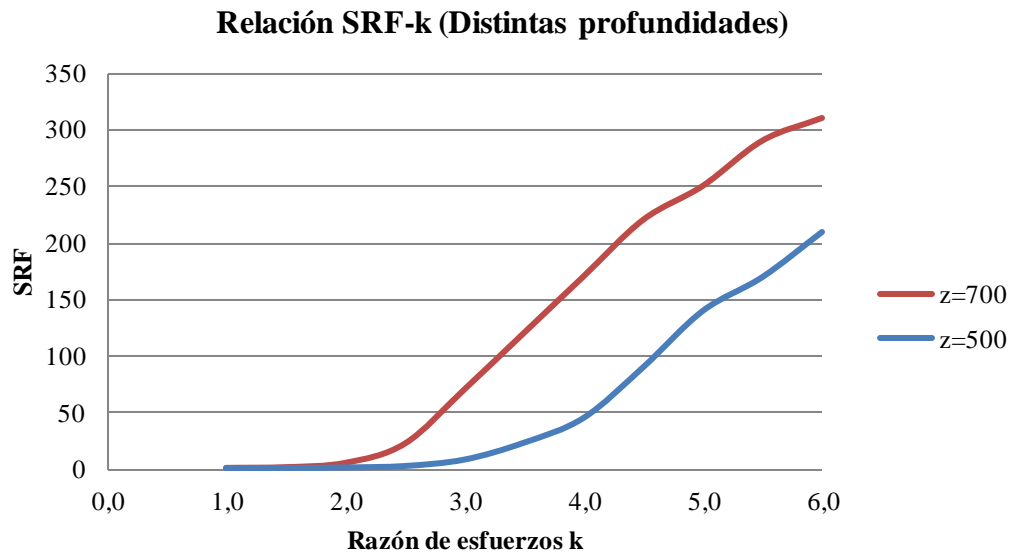


Figura 6-9. Relación entre el SRF y la razón de esfuerzos k para diferentes profundidades, soporte.

Se aprecia en la Figura 6-9 que en zonas más superficiales el efecto del k en el SRF se pospone a valores de k mayores y que aumenta de manera lineal con un alto gradiente. Los valores finales representan a macizos rocosos de mala calidad donde los estallidos de roca pasan comúnmente según la Figura 6-10.

Tipo de Soporte

En este caso se estudian tres tipos de macizos rocosos definidos por el GSI (Tabla 3-8), el siguiente gráfico muestra el espaciamiento de los pernos y el grosor del Shotcrete.

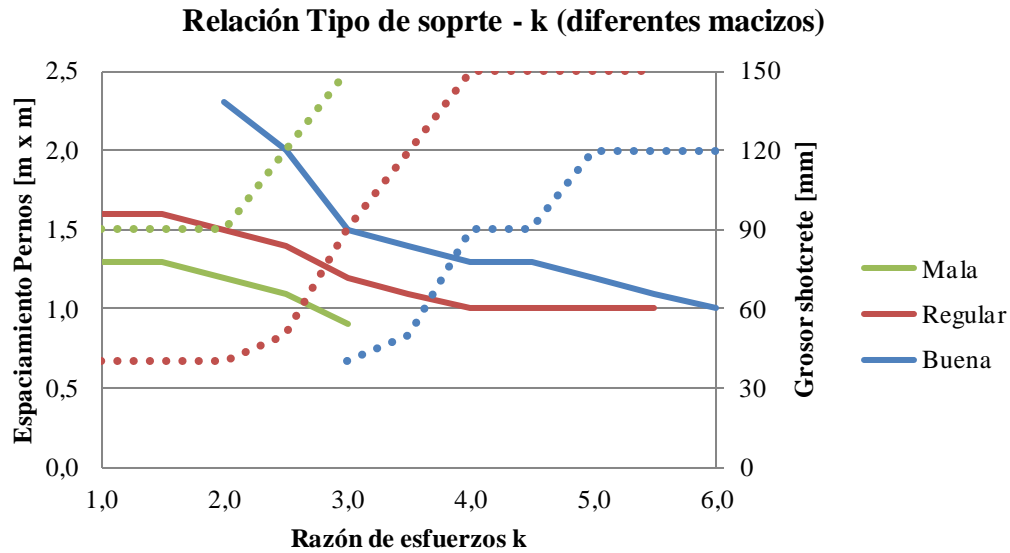


Figura 6-11. Relación entre el tipo de soporte y la razón de esfuerzos k, soporte.

Cabe destacar que la líneas punteadas en la Figura 6-11 representan al grosor del shotcrete mientras que las líneas continuas al espaciamiento de los pernos.

En el caso del macizo rocoso de mala calidad, el espaciamiento es alto y se utiliza un grosor de shotcrete de que empieza desde los 90 [mm] hasta el máximo valor de la Figura 6-12. Para razones de esfuerzos mayores a 3 no existen resultados ya que quedan fuera de los rangos de la Figura 6-13.

Para el macizo rocoso de calidad regular, el espectro de valores para el grosor del shotcrete varía por todos los valores posibles, mientras que el espaciamiento de los pernos varía, pero de manera más estable. Luego del $k = 5,5$ no existen resultados, ya que quedan fuera del rango de la Figura 6-14.

En el caso del macizo de buena calidad, para valores de k menores a 2 no es necesario el uso de soporte, ya que la galería es estable hasta valores de $k = 3$ y solo se requieren pernos. Para el resto de las razones de esfuerzos es necesario el uso de pernos y shotcrete, sin embargo, no llegan a valores máximos como en los otros casos.

Se puede interpretar del gráfico que cuando la razón de esfuerzos k aumenta, la estabilidad de la galería se hace menor, teniendo que utilizar soporte para estabilizarla. Esto se debe, como también se ha visto en los otros análisis, que al tener un macizo rocoso hidrostático este tiene una mayor estabilidad que cuando existe una diferencia entre los esfuerzos horizontales y el vertical, debido a que en este caso los esfuerzos se concentran o relajan alrededor de la galería produciendo la inestabilidad.

6.5. Comentarios Finales

En el caso de los pilares se observa que la geometría influye de sobremanera en la carga del pilar, por lo que su buen dimensionamiento es necesario, ya que solo así se podrán mantener estas labores estables y seguras.

CAPÍTULO 6 IMPACTO DE LOS ESFUERZOS IN-SITU EN EL DISEÑO MINERO

La calidad de macizo rocoso es relevante a la hora de estudiar cómo se comportará una labor minera, que según sus características y para un mismo tensor de esfuerzo, las excavaciones pueden ser estable o necesitar de soporte. En el caso de los túneles el radio de fractura también puede variar.

El estado de esfuerzos puede "modificar" las características de la roca haciéndola de menor calidad cuando se tienen esfuerzos no hidrostáticos lo que se muestra en el caso del SRF, donde se llega a valores que representan rocas donde los estallidos de roca son frecuentes.

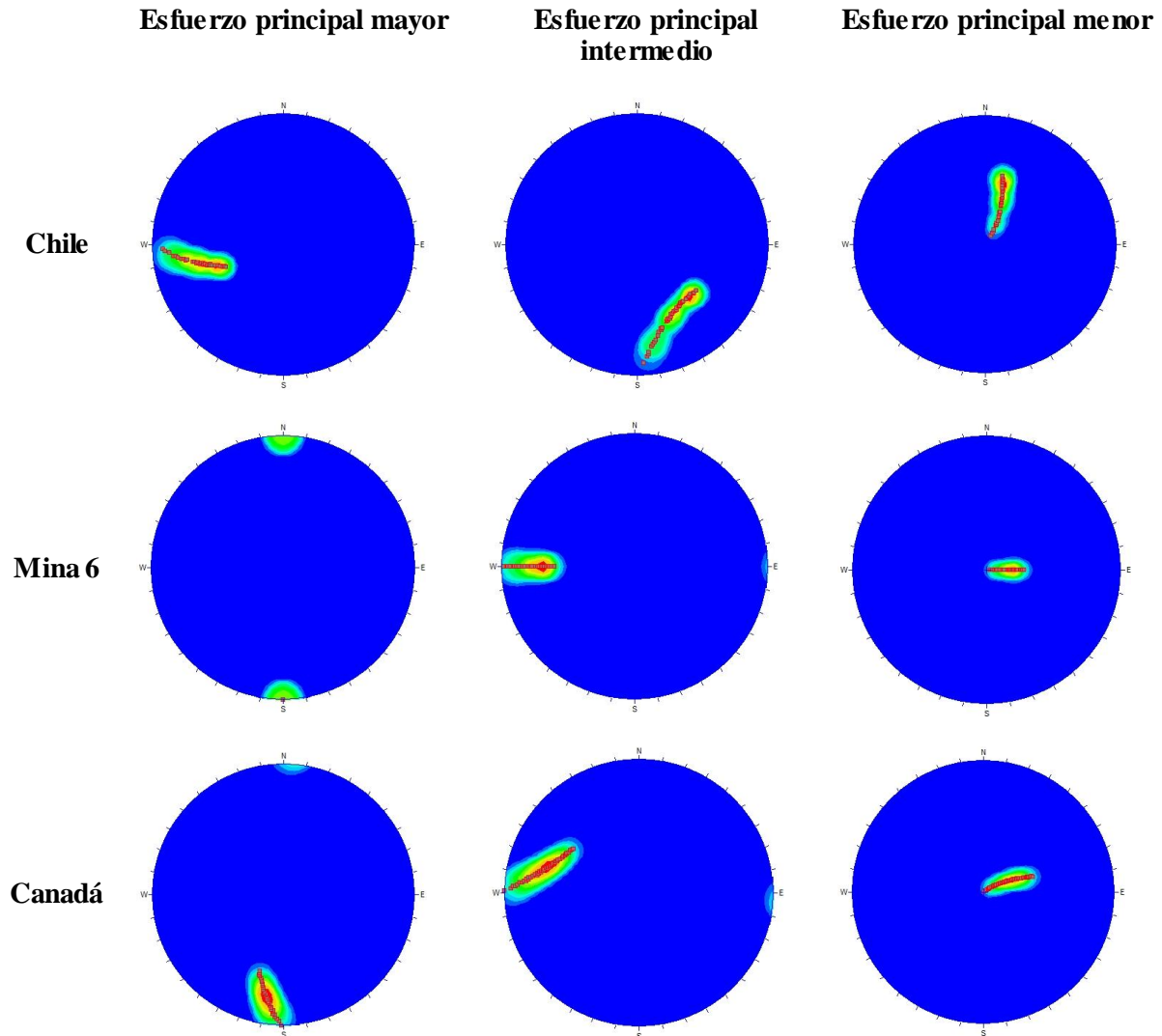
En general, se aprecia que las estructuras pierden estabilidad cuando el campo de esfuerzo no es hidrostático ya que se concentran o relajan los esfuerzos alrededor de las labores produciendo la inestabilidad.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentan en modo de conclusión el modelo para las tres zonas estudiadas.

	<i>Chile</i>		<i>Mina 6</i>		<i>Canadá</i>	
	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>	<i>Grad. [MPa/m]</i>	<i>Inter. [MPa]</i>
τ_{EN}	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,121
τ_{EV}	0,010	0,309	0,006	0,000	0,005	0,000
τ_{NV}	0,007	0,235	0,000	0,000	0,006	0,000
σ_{EW}	0,021	9,462	0,010	21,648	0,020	10,387
σ_{NS}	0,011	5,648	0,011	40,215	0,028	18,200
σ_V	0,027	0,000	0,012	12,008	0,026	0,000

Además se agrega las orientaciones para los esfuerzos principales.



CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se aprecia en las orientaciones que para estos casos el esfuerzo principal menor tiene una orientación vertical, mientras que los otros muestran una tendencia horizontal. En el caso del modelo chileno y canadiense se observa que los esfuerzos cambian tanto su azimut como inclinación en función de la profundidad, comenzando con valores sub- horizontales y vertical (para profundidades superficiales), para el caso de los esfuerzos principales mayor e intermedio, y vertical, respectivamente.

Las orientaciones concuerdan con el tensor de esfuerzo, se aprecia mayores valores de gradiente e intercepción en los esfuerzos con orientación similar al esfuerzo principal. Se aprecia que en el tensor de la mina 6 el valor de las intercepciones es mayor y los gradientes son menores a los encontrados en los otros lugares, lo que demuestra como en un lugar específico el valor del tensor puede cambiar considerablemente al modelo base del país.

La metodología propuesta en el presente informe es de simple aplicación, ya que los filtros, restricciones y software aplicados en ella son de fácil acceso y entregan buenos resultados. Las comparaciones realizadas con los diversos autores muestran que el modelo elegido tiene similares tendencias y orientaciones a modelos propuestos para los mismos lugares.

Al poder comparar diferentes modelos que usan restricciones y diferente cantidad de parámetros, se elevan las probabilidades de encontrar la mejor estimación, debido a que éstos interpretan con diferentes condiciones iniciales la base de datos, lo que ayuda a encontrar el modelo con el menor error para los esfuerzos principales.

En cuanto a las restricciones, diferentes autores utilizan el criterio de Mohr-Coulomb ya que este representa las fallas que delimitan los contornos del macizo rocoso por la acción de los esfuerzos in situ. En el caso de la razón b esta es utilizada por varios autores al correlacionarla con los movimientos tectónicos, es por esta razón que es incluida en este estudio ya que ayuda a obtener un tensor que se relaciona a los movimientos tectónicos de la zona en estudio. Por último, la primera invariante de esfuerzos no es utilizada por los autores revisados en los antecedentes, sin embargo, ayuda a acotar los rangos de los esfuerzos produciendo que el tensor se acerque los más posibles a los datos.

Al analizar los tres casos de estudio se observa que la cantidad de datos no siempre se correlaciona con la obtención de un modelo concluyente, ya que en el caso de la mina 6 el análisis se realiza con más datos de los que se cuentan para el modelo para Chile y este último se obtiene un modelo más robusto que para la mina 6. Por lo tanto, establecer una cantidad mínima de datos no sería suficiente para esperar que la metodología funcione de la mejor manera posible, si bien con alrededor de 90 datos se pudo obtener buenos resultados es necesario también obtener buenas correlaciones al analizar la base de datos, con valores sobre 0,2 para R^2 .

Los antecedentes muestran como los autores de diferentes modelos in situ concluyen sobre los diferentes mecanismos focales que se encuentran en cada región analizada. En el caso de la metodología propuesta, los modelos obtenidos también muestran una estrecha relación entre los movimientos tectónicos de cada lugar y el comportamiento de los esfuerzos normales, de corte y principales.

En particular, cuando se modela el esfuerzo in situ en Chile, se aprecia una correlación importante entre el mecanismo focal asociado al movimiento de las placas tectónicas presentes en esta región y la orientación de los esfuerzos, es decir, se hace evidente la relación que existe entre

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

la magnitud y orientación de los esfuerzos principales, ya que solo minimizando el error asociado a éstos se pueden obtener buenas estimaciones de sus orientaciones.

En el caso del modelo para la mina 6 se aprecia que existe mucha dispersión en los datos y es por esto que las restricciones no cumplen a cabalidad su función de acotar los rangos donde puede establecerse el tensor de esfuerzos, entregando modelos con altas diferencias lo que hace más difícil la tarea de concluir.

Las labores mineras están muy influenciadas por los esfuerzos in situ, sobre todo cuando éstos muestran un comportamiento no hidrostático. Porque en este caso los esfuerzos se concentran o relajar alrededor de las excavaciones produciendo zonas de fracturas o inestabilidades en general.

Si bien los esfuerzos influyen en las labores mineras, existen otros factores que también afectan, como las características del macizo rocoso o el dimensionamiento de la labor a analizar. Es por esto que para asegurar las buenas condiciones de las estructuras minera es necesario estudiar todas las aristas relacionadas a ellas.

Dentro de las recomendaciones con respecto al estudio, se destaca el seguir aumentando la base de datos de esfuerzos in situ para Chile, ya que como se vio en el informe, la alta dispersión no permite ser del todo concluyente en comparación a bases de datos que muestran bajas dispersiones. Una mayor cantidad de información siempre incrementa el valor del modelo.

Para un análisis posterior se puede establecer qué diferencias existen entre modelos que tiene valores de AIC muy parecidos para los esfuerzos principales, pero ajustes para los esfuerzos normales muy diferentes. Queda entonces por analizar qué peso tiene el ajustar de mejor manera el tensor de esfuerzo que también es clave a la hora de evaluar diseños de faenas mineras.

Otra mejora que se puede incorporar a la metodología propuesta es establecer un AIC que utilice además los RSS de las orientaciones de los datos, esto puede ayudar a establecer un modelo que además de ajustarse a la magnitud de estos se ajuste a su orientación. En cuanto a las restricciones se puede reemplazar el criterio de Mohr-Coulomb por otro criterio que utilice los tres esfuerzos principales y con esto aumentar el uso del σ_2 , que se pierde cuando se utiliza este criterio.

8. REFERENCIAS

- Akaike, H. "Information theory and an extension of the maximum likelihood principle." In *International Symposium on Information Theory*, by B.N. Pertaran and F. Csaaki, 276-281. Busapest, Hugarly, 1973.
- Amadei, B., and O. Stephansson. *Rock Stress and its measurements*. London: Chapman & Hall, 1977.
- Angelier, J. "Sur l'analyse de mesures recueillies sans des sites faillés: l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques." 1975: 1805-1808.
- Arjang, B., and G. Herget. "In Situ ground stressess in the Canadian Hardrock Mines: An Update." *Rock Mechanics and Mining Sciences* (Elsevier) 34, no. 3-4 (1997).
- Barton, N. "Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design." *Rock Mechanics and Mining Sciences* (Pergamon), 2002: 185-216.
- Barton, N., R. Lien, and J. Lunde. "Engineering clasification of rockmasses fot the design of tunnel support." 1974: 189-236.
- Bishop, A.W. "The strength of soils as engineering materials." *Géotechnique*, 1966: 91-128.
- Brown, E.T., and E. Hoek. "Trends in relayionships between measured in-situ stressess and depth." *Rock Mechanics and Mining Sciences* 15 (1978): 211-215.
- Brudy, M., M.D. Zoback, K. Fuchs, F. Rummel, and J. Baumgärtner. "Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength." *Geophysical Research* 102, no. B8 (1997): 18453-18475.
- Cai, M., L. Quiao, C. Li, B. Yu, and S. Wang. "Results of in situ stress measurements and their application to mining design al five Chinese metal mines." *Rock Mechanics and Minig Sciences* (Pergamon) 37 (2000): 509-515.
- Chacón, E. "Evaluación de esfuerzos tectónicos en minas chilenas y su incidencia en el diseño minero." Memoria, Departamento Ingeniería de Minas, Universidad de Chile, Santiago, 1988.
- Chauvenet, W. *A Manual of Spherical and Practical Astronomy*. 5th ed. Vol. II. 1863.
- Clark, J.M., and R.C. Pakalnis. "An empirical design approach for estimation unplanned dilution from open stope hanging-walls and footwalls." In *Proceeding of the 99th CIM annual general meeting*. Vancouver, 1997.
- Coates, D.F. "Rock Mechanics Principles." Department of Energy, Mines and Resources, Canada, 1981.
- Coulomb, C. *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a queles problemes de statique relatifs a architecture*. 1776.

- Duncan, M.E., and M.J. Pender. "Analysis of the Hollow Inclusion Technique for Measuring In Situ Rock Stress." *Rock Mechanics and Mining Science* (Pergamon) 17 (1980): 137-146.
- Gaviglio, P., R. Revaor, Pguet J.P., and M. Dejean. "Tectonic structures, strata properties and rockburst occurrence in a french coal mine." 1990.
- Goldberger, A. S. "A Course in Econometrics Harvard." University Press, Cambrigde, 1991.
- Grimstad, E., and N. Barton. "Updating of the Q-System for NMT." In *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, edited by Opsahl, Berg Kompen. Oslo, 1993.
- Heidbach, O., M. Tingay, A. Barth, J. Reinecker, D. Kurfieb, and B. Müller. *The World Stress Map database release*. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008, 2008.
- Herget, G. *Stress in Rock*. Rotterdam: Balkema, 1988.
- Hillis, R.R., J.R. Enever, and S.D. Reynolds. "In situ stress field of eastern Australia." *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, 1999: 813-825.
- Hoek, E., and E.T. Brown. "Practical estimates of rock mass strength." *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997: 1165-1186.
- Hudson, J.A., F.H. Cornet, and R. Christiansson. "IRSM Suggested Methods for rock stress estimation - Part 1: Strategy for rock stress estimation." *Rock Mechanics and Mining Sciences* (Pergamon) 40 (2003): 991-998.
- Kirsch, G. "Die theorie der elastizitaet und die deduerfnisse der festigkeitlehre." 1898: 197-807.
- Leeman, E.R. "The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole-laboratory and underground measurement." *Rock Mehcanics and Mining Science*, 1968: 31-56.
- Lisle, R.J., T.O. Orife, L. Arlegui, C. Liesa, and S.C. Srivastava. "Favoured states of palaeostress in the Earth's crust: evidence from fault-slip data." *Structural Geology* (Elsevier), 2006: 1051-1066.
- Ljunggren, C., Y. Chang, T. Janson, and R. Christiansson. "An overview of rock sress measurement methods." *Rock Mechanics and Mining Sciences* (Pergamon) 40 (2003): 975-989.
- Maloney, S. M., P.K. Kaiser, and a. Vorauer. "A Re-assessmente of In Situ Stresses in the Canadian Shield." 2006.
- Martin, C.D., and N.A. Chandler. "Stress heterogeneity and geological structures." *Rock Mechanics and Mining Sciences* 30 (1993): 993-999.
- Mathews, K.E, E. Hoek, D.C. Wylie, and S.B.V. Stewart. "Predction of stable sxcavation spans at depths below 1000[m] in hard rock mines." CaNMET Report, DSS Serial No. OSQ80-00081, 1981.

- Mawdesley, C., R. Trueman, and W.J. Whithen. "Extending the Mathews stability graph for open-stope design." *Trans. Institution of Mining and Metallurgy*, 2001: A27-A39.
- McKinnon, S.D., and D. Labrie. "Interpretation of Stresses Adjacent to the Cadillac Fault Assuming Marginal Large-Scale Rock Mass Stability." 2006.
- McKinnon, S.D., and I. Garrido. "Stress field analysis at the El Teniente Mine: evidence for N-S compression in the modern Andes." (Elsevier) 2003: 2125-2139.
- Mohr, O. *Abhandlungen aus dem Gebiete der Technischen Mechanik*. 2nd ed. Berlin, 1914.
- Potvin, Y. "Empirical open stope design in Canada." PhD Thesis, University of British Columbia, 1988.
- Reinecker, J., O. Heidbach, M. Tingay, P. Connolly, and B. Müller. "The 2004 release of the World Stress Map 2004." 2004.
- Sen, Z., and B.H. Sadagah. "Probabilistic Horizontal Stress Ratios in Rock." *Mathematical Geology* 34, no. 7 (2002).
- Sheorey, P.R. "A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock." *Rock Mechanics and Mining Sciences* (Pergamon) 31, no. 1 (1994): 23-34.
- Udd, J.E. "Forty Years of Stress Measurements in Canada - The CANMET experience." CANMET Mining and Mineral Sciences Laboratories, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario, 2006.
- Vallejos, J. "Clasificación del macizo rocoso." *Mecánica de rocas (MI4060)*. 2013.
- Vallejos, J. "Método convergencia-confinamiento." *Modelamiento numérico en mecánica de rocas (MI6061)*. 2013.
- Vallejos, J. "Pilares." *Cátedra de Mecánica de Rocas*. 2013.
- Vallejos, J. "Tensor de Esfuerzo y Deformación." *Mecánica de Rocas (MI4060)*. 2013.
- Windsor, C.R., P. Cavieres, E. Villaescusa, and J. Pereira. "Rock stress tensor measurement at El Teniente Mina, Chile." Kalgoorlie, Australia; Rancagua, Chile, 2006.
- Worotnicki, G., and R.J. Walton. "Triaxial "Hollow Inclusion" gauges for the determination of rock stress In Situ. Proc ISRM Symp. on Investigation of Stress Rock and Advances in Shear Measurement." *Sydney supplement*, 1976: 1-8.
- Zoback, M.D., and J.H. Healy. "In Situ Stress Measurements to 3.5 km Depth om the Cajon Pass Scientific Reaserch Borehole: Implication for the Mechanics of Crustal Faulting." *Geophysical Research* 97, no. B4 (1992): 5039-50057.

ANEXO A

Orientaciones esfuerzos

Se muestran las tendencias de los esfuerzos principales con respecto a la profundidad, además se utiliza el software Dips para analizar las orientaciones. En la siguiente figura se muestra el azimut desde los 0° (dirección NS) hasta los 90° (dirección EW), así se puede analizar de mejor forma como varían las direcciones de los esfuerzos principales.

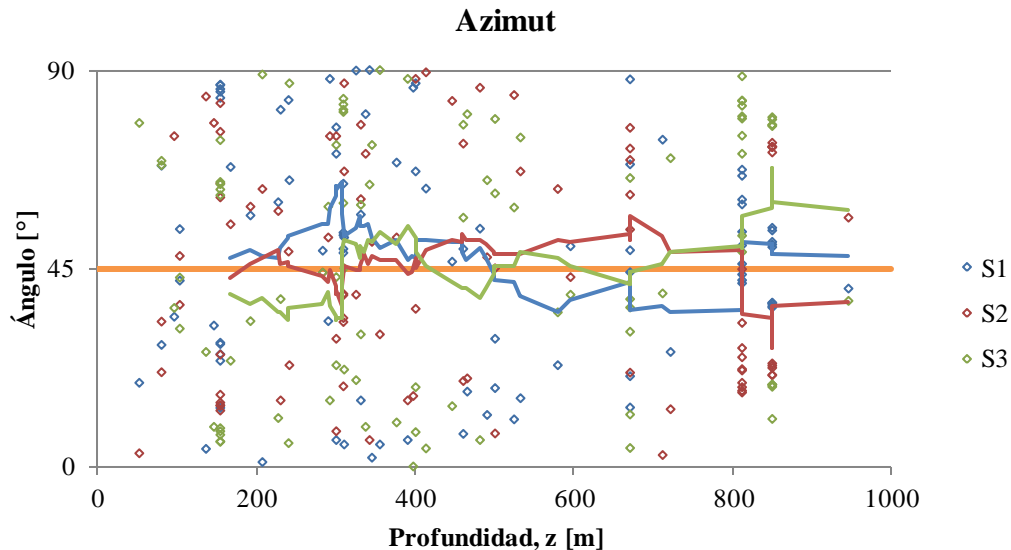


Figura Anexo A-0-1. Tendencias del azimut con respecto a la profundidad.

Se observa que las orientaciones cambian con la profundidad para cada esfuerzo principal:

- Sigma 1: Empieza con una orientación EW y a los 500 [m] cambia a una orientación NS, sin embargo en a la profundidad terminar la orientación es EW.
- Sigma 2: No se aprecia una tendencia clara en los primeros metros pero luego alrededor de los 700 [m] la orientación es preferentemente EW, al llegar a los 1000 [m] la tendencia es claramente NS.
- Sigma 3: En este caso se aprecia que en los primeros metros la tendencia es NS, luego va variando contantemente hasta terminar en una orientaciones EW.

Como se explicaba en el caso del análisis con respecto a la geografía se realiza de dos formas. Se presenta a continuación el caso con respecto al norte sur.

Tabla Anexo A-0-1. Distribución minas por geografía.

Norte - Sur	Costa - Cordillera
Mina 12	Mina 9
Mina 4	Mina 11
Mina 5	Mina 8
Mina 8	Mina 12
Mina 9	Mina 3
Mina 3	Mina 5
Mina 11	Mina 4

Se estudia primero el esfuerzo principal mayor:

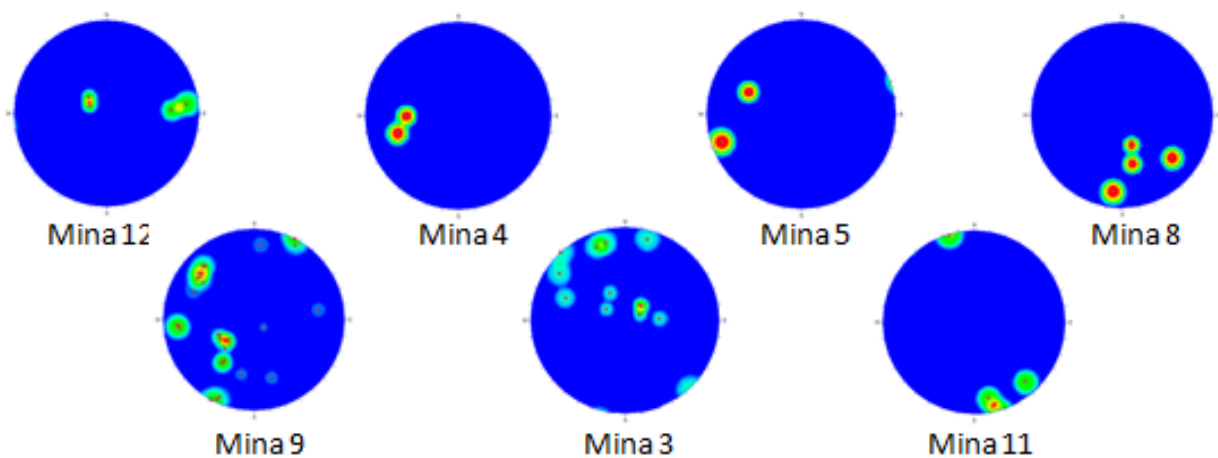


Figura anexo A-0-2. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, desde norte al sur, Sigma 1.

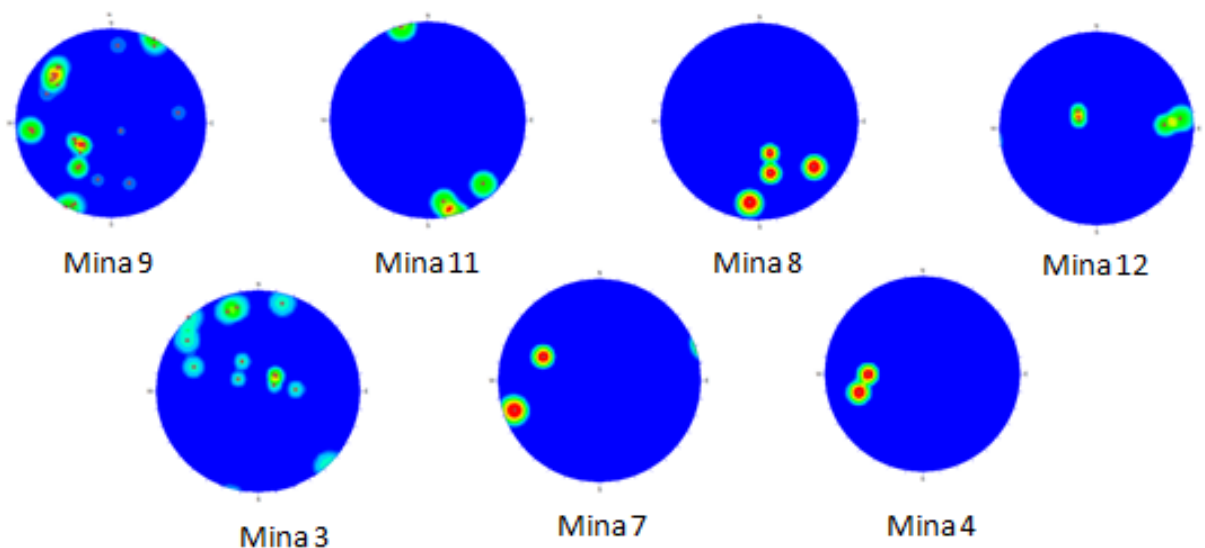


Figura Anexo A-0-3. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 1.

- Norte a sur: Se aprecia que al norte las orientaciones son EW sin embargo cuando se entra a la zona central el esfuerzo tiene componentes NS.
- Costa a cordillera: En este caso cuando los datos están más cercano a la costa la componente NS se hace más importante mientras que los yacimientos que están en la cordillera de los Andes tiene una orientación EW o NW-SE.

Lo obtenido del esfuerzo principal intermedio:

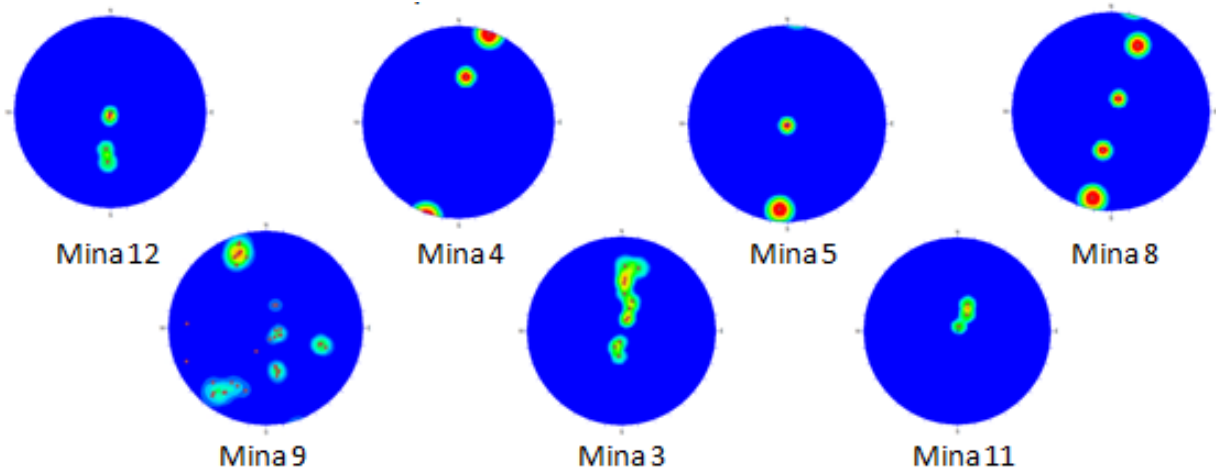


Figura Anexo A-0-4. Tendencias del azimuth con respecto a la geografía, de norte a sur, Sigma 2.

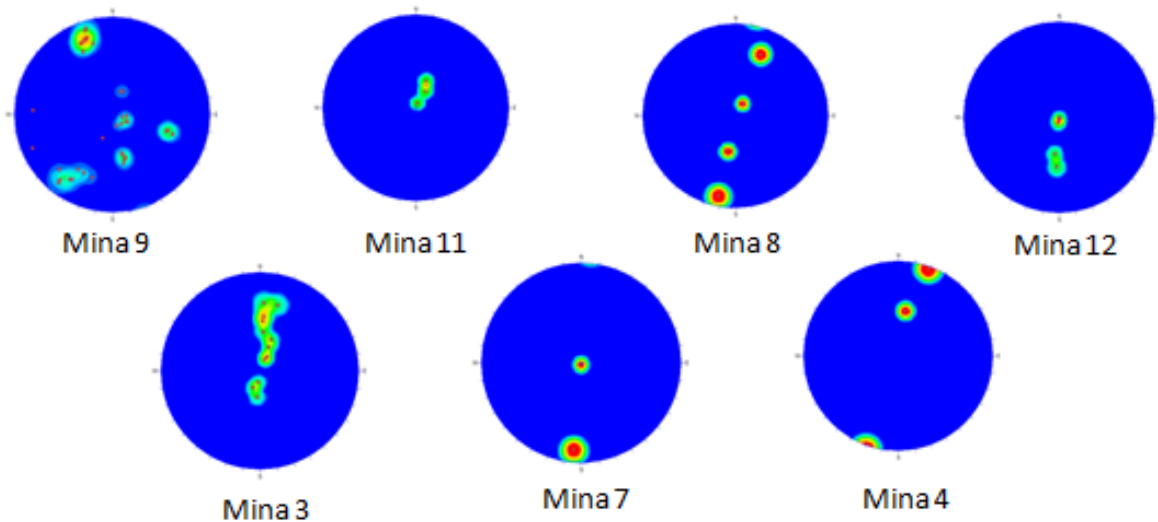


Figura Anexo A-0-5. Tendencias del azimuth con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 2.

- Norte a sur: : En este caso la mayoría de los datos es NS, aunque se presentan algunos con orientaciones un poco inclinadas hacia el NE-SW. Es importante destacar que existen una concentración de datos que muestran inclinaciones casi verticales.
- Costa a cordillera: Lo mismo se aprecia cuando se analizan de costa a cordillera, la mayoría es NS.

Con respecto al esfuerzo principal menor:

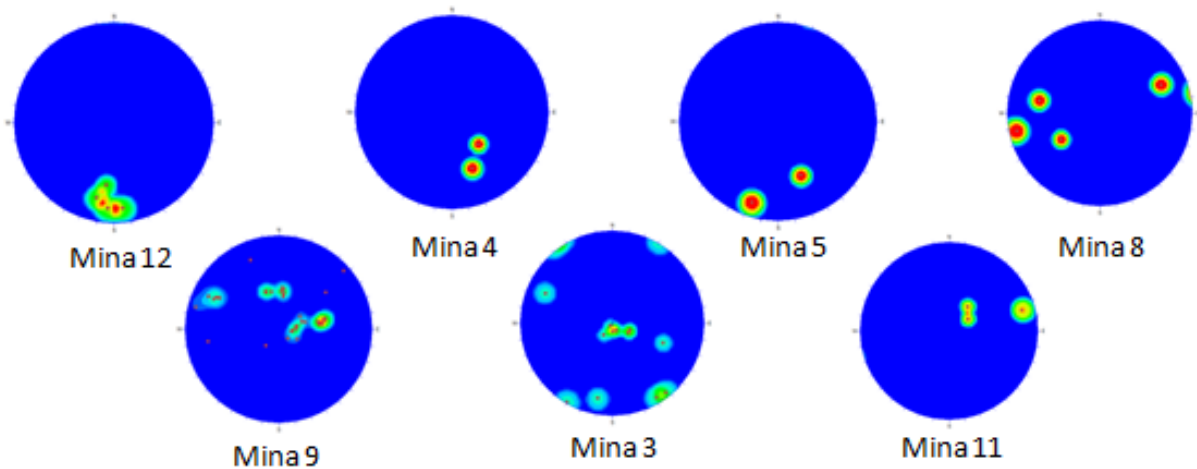


Figura Anexo A-0-6. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de norte a sur, Sigma 3.

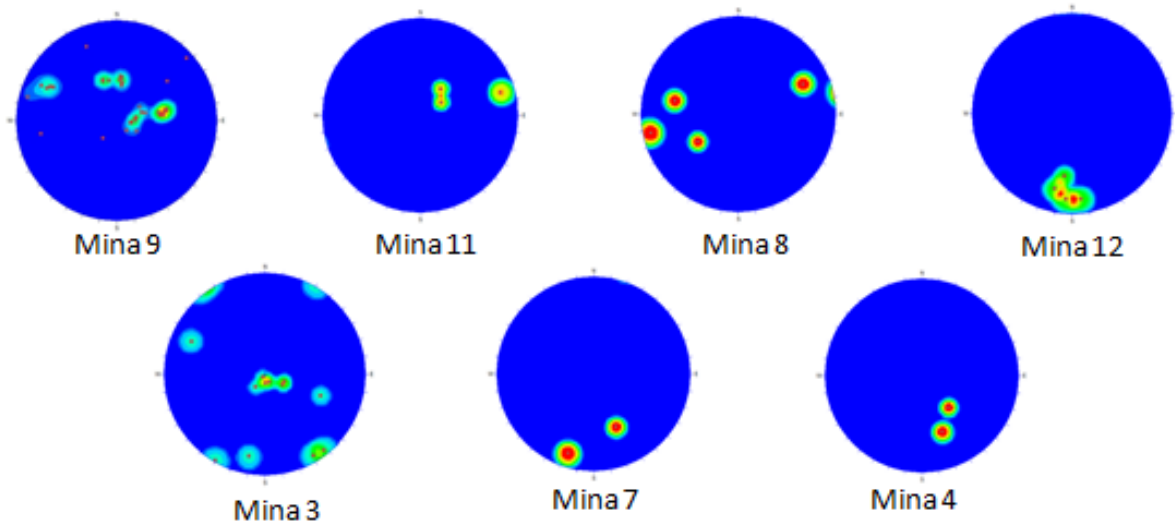


Figura Anexo A-0-7. Tendencias del azimut con respecto a la geografía, de costa a cordillera, Sigma 3.

- Norte a sur: Se observa que empieza con una orientación NS y luego pasa a EW. Es importante mencionar que existen muchos datos que son horizontales.
- Costa a cordillera: En este caso empieza de EW y luego termina a NS en las minas que se encuentran en la cordillera.

ANEXO B

Esfuerzos Horizontales

El primer análisis que se realiza evalúa la razón de los esfuerzos horizontales, para este caso se tomaron los datos de la base ya filtrada y se grafican para evaluar su tendencia.

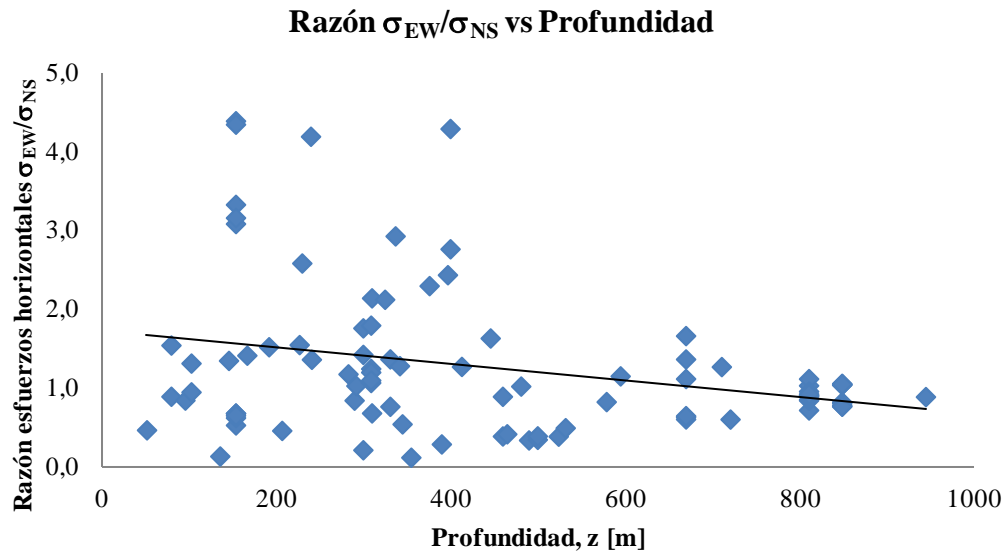


Figura Anexo B-0-1. Tendencia de razón entre los esfuerzos horizontales con respecto a la profundidad.

Se aprecia que en profundidades bajas se muestra una clara tendencia donde los esfuerzos que tienen la orientación EW son mayores a los esfuerzos con orientación NS. Cuando la profundidad aumenta esta tendencia llega a ser cercana a 1, es decir, los valores de los esfuerzos son similares.

Además se realiza un histograma de la misma razón que se observa a continuación.

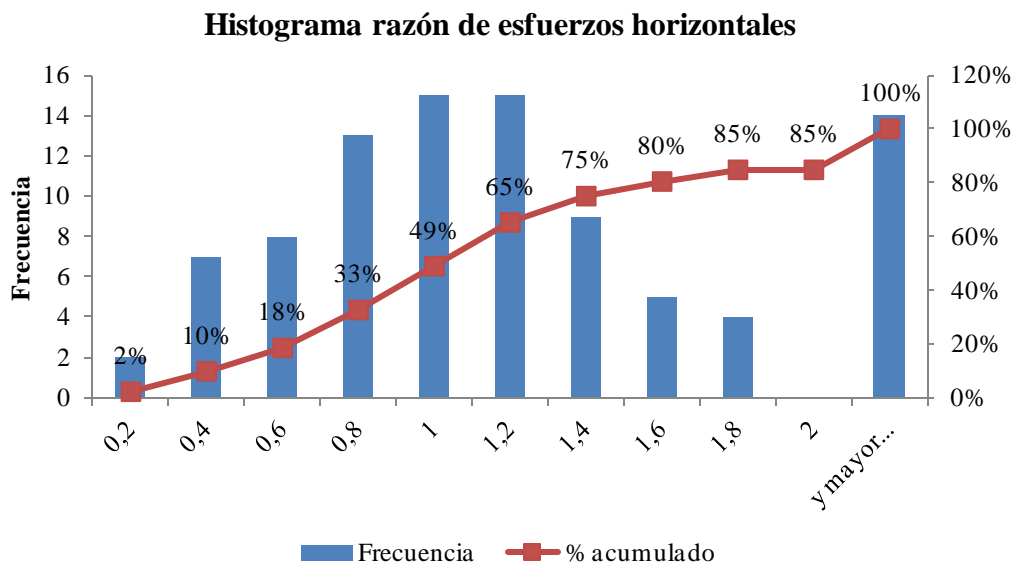


Figura Anexo B-0-2. Histograma de la razón de esfuerzos horizontales.

Se aprecia que existe una cantidad de datos superior donde el esfuerzo horizontal con orientación EW es mayor sin embargo el rasgo más llamativo es que existe una gran cantidad de datos donde este supera en más del doble al valor del esfuerzo horizontal con orientación NS.

Para complementar este análisis se realiza además el estudio de la razón k de esfuerzos que tiene la siguiente forma.

$$k_{E-O} = \frac{\sigma_{E-O}}{\sigma_V} \wedge k_{N-S} = \frac{\sigma_{N-S}}{\sigma_V} \quad (75)$$

Se utiliza la fórmula de Shorrey (Sheorey 1994) para encontrar el mejor ajuste de los datos.

$$k = 0,25 + 7 * E_h * \left(0,001 + \frac{1}{Z}\right) \quad (76)$$

Utilizando el complemento Solver de Excel se busca el mejor E_h maximizando el R^2 o coeficiente de determinación. Los valores que se encuentran para los E_h de las dos orientaciones analizadas son. Cabe destacar que se eliminan 7 datos cuya profundidad es menor a los 140[m] ya que se toman como valores contaminados por el valor de k .

Tabla Anexo B-0-1. Valores para los módulos de elasticidad de las orientaciones EW y NS.

	E_h [GPa]
Orientación EW	41
Orientación NS	30

Se observa que el valor del módulo para el esfuerzo EW es mayor al encontrado para el esfuerzo NS. Se muestra los gráficos a continuación.

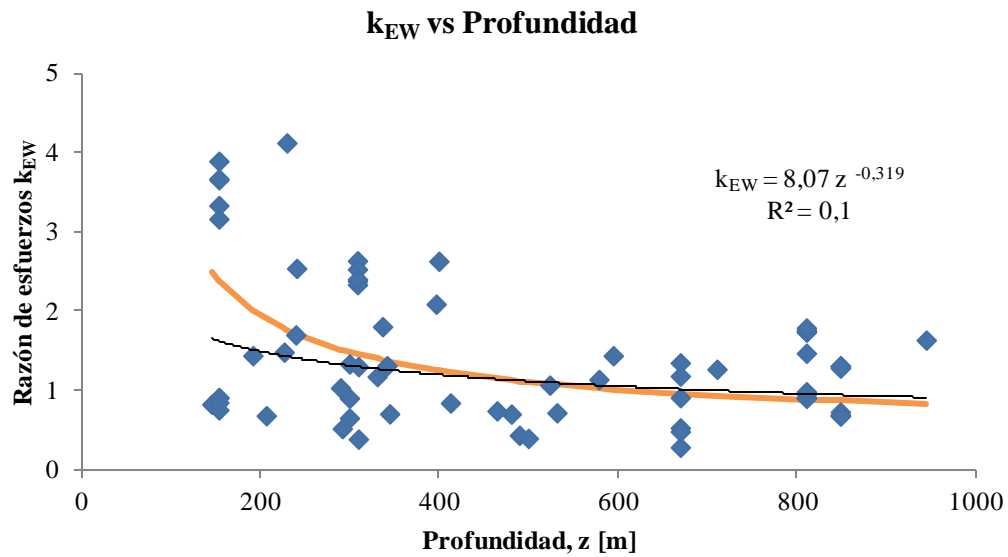


Figura Anexo B-0-3. Razón de esfuerzos k_{EW} versus profundidad.

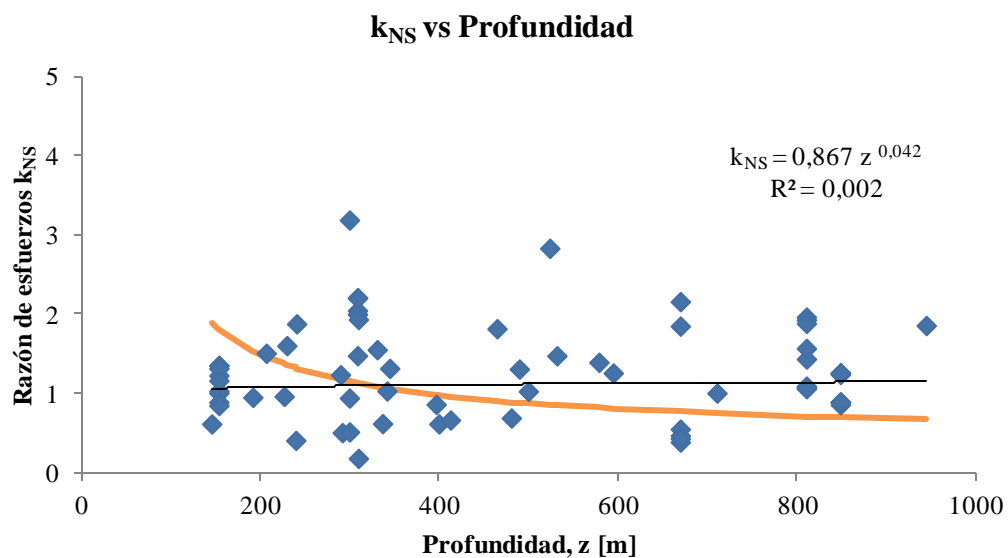


Figura Anexo B-0-4. Razón de esfuerzos k_{NS} versus profundidad.

La línea naranja muestra el ajuste de Shorrey utilizando los E_h optimizados. Se observa que la tendencia de la razón k_{EW} muestra valores más altos que en el caso del k_{NS} , esto corrobora lo obtenido por la corporación World Stress Map que muestra esta misma tendencia.

ANEXO C

Tendencias Lineales en los Modelos

Base de Datos de minas chilenas

Si bien la elección del modelo queda dado por el AIC de los esfuerzos principales también es necesario revisar las tendencias de los esfuerzos de corte, las razones k , la primera invariante, el criterio de Mohr-Coulomb y razón de esfuerzos b .

En todos los gráficos que se muestran a continuación están los 6 modelos que son optimizados. Cada modelo optimizado resulta del siguiente tensor de esfuerzos.

Tabla Anexo C-0-1. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado.

	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>
$\tau_{EW/NS}$	0,001	0,000	0,000	0,000	0,002	0,153
$\tau_{EW/V}$	0,005	1,716	0,004	0,035	0,009	1,053
τ_{NSV}	0,002	1,802	0,009	0,015	0,006	0,770
σ_{EW}	0,028	8,142	0,014	5,611	0,020	9,557
σ_{NS}	0,016	4,396	0,026	9,142	0,013	5,319
σ_V	0,015	2,924	0,021	0,000	0,027	0,000

	Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6	
	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>
$\tau_{EW/NS}$	0,000	0,006	0,000	0,005	0,002	0,000
$\tau_{EW/V}$	0,000	0,060	0,011	0,031	0,010	0,309
τ_{NSV}	0,001	0,190	0,006	0,058	0,007	0,235
σ_{EW}	0,032	8,091	0,023	9,249	0,021	9,462
σ_{NS}	0,016	5,319	0,012	5,776	0,011	5,648
σ_V	0,009	2,925	0,025	0,000	0,027	0,000

Se observa que en la mayoría de los casos el tensor de esfuerzos muestra valores mayores para los esfuerzos con orientación EW.

Como se explica en el capítulo 3 Metodología el AIC solo depende del error de los esfuerzos principales sin embargo se utiliza un R^2 ajustado (Goldberger 1991) para conocer cómo se comportan el resto de los esfuerzos.

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) * \left(\frac{n - 1}{K - 1} \right) \quad (77)$$

Donde:

- n : número de observaciones.

- K : número de parámetros.

Tabla Anexo C-0-2. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte.

Modelo	σ_{EW}	σ_{NS}	σ_V	$\tau_{EW/NS}$	$\tau_{EW/V}$	$\tau_{NS/V}$
1	-140.04	-79.51	-78.08	-93.64	-248.60	-156.72
2	-74.79	-88.67	-80.76	-80.75	-163.70	-287.86
3	-100.58	-83.29	-69.71	-100.72	-342.12	-220.92
4	-170.94	-74.28	-108.64	-81.00	-99.80	-94.81
5	-113.95	-84.05	-71.27	-81.26	-363.44	-180.99
6	-104.91	-87.31	-69.71	-100.56	-334.96	-226.65

Se aprecia que el que tiene más cantidad de índices altos es el modelo 4 también es claro ver que los esfuerzos de corte tienen un peor ajuste que los esfuerzos normales,

Esfuerzos de Corte

Se muestran los gráficos para los esfuerzos de corte.

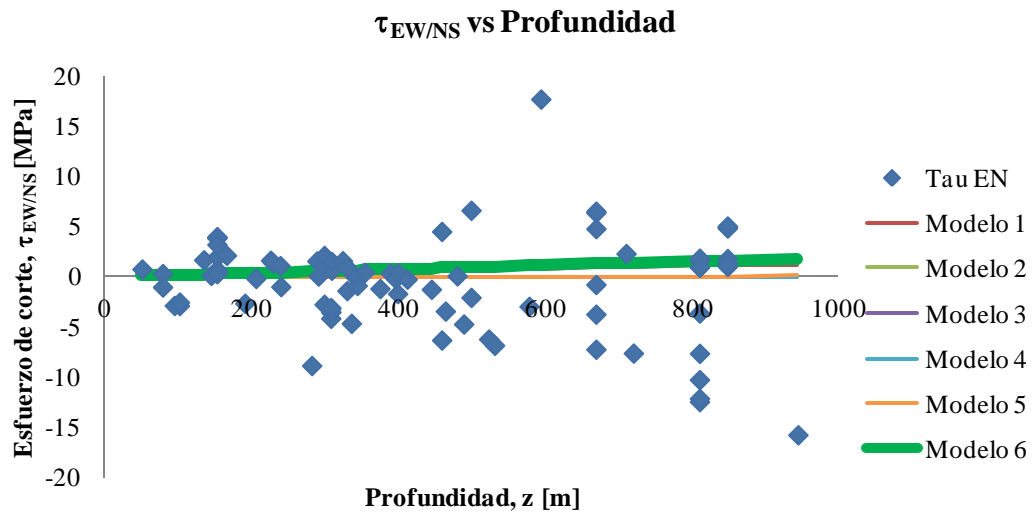


Figura Anexo C-0-1. Es fuerza de corte EW/NS para los 6 modelos.

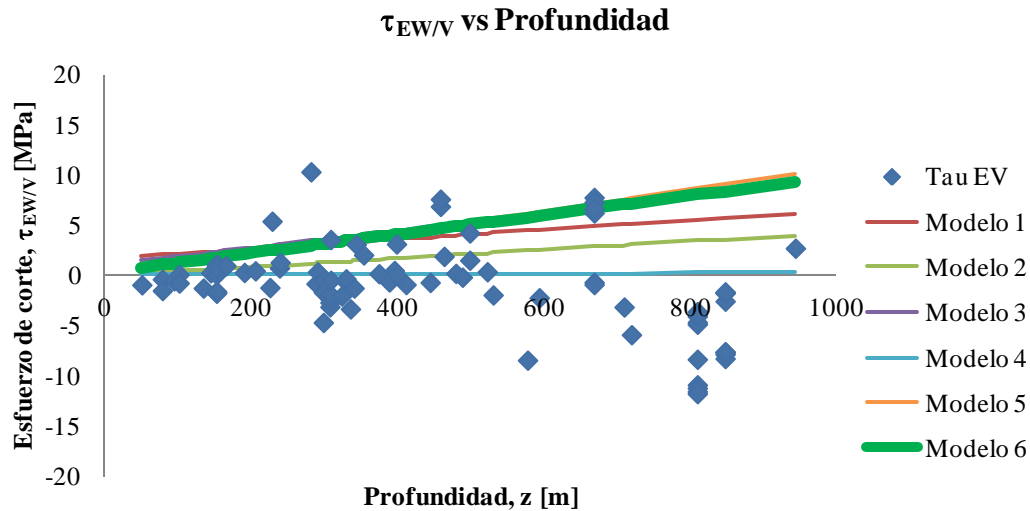


Figura Anexo C-0-2. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos.

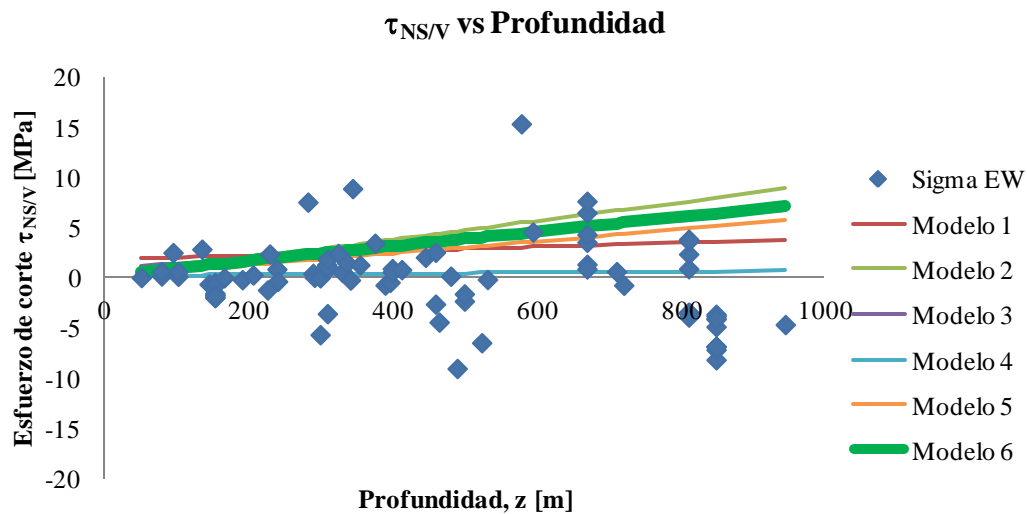


Figura Anexo C-0-3. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos.

Se aprecia que para todos los modelos el esfuerzo de corte que relaciona las dos orientaciones horizontales muestra una tendencia lineal y de bajo valor lo que explica que los esfuerzos principales tengan orientaciones cercanas al EW y NS.

Al revisar los esfuerzos que relacionan los esfuerzos horizontales con el vertical se aprecia que en general su gradiente es mayor y por lo tanto al profundizar el esfuerzo de corte tiene un valor que hace que la inclinación de los esfuerzos principales cambie desde orientaciones horizontales a sub-horizontales.

Razones de esfuerzo k

Se muestran los gráficos para los k_{EW} y k_{NS} .

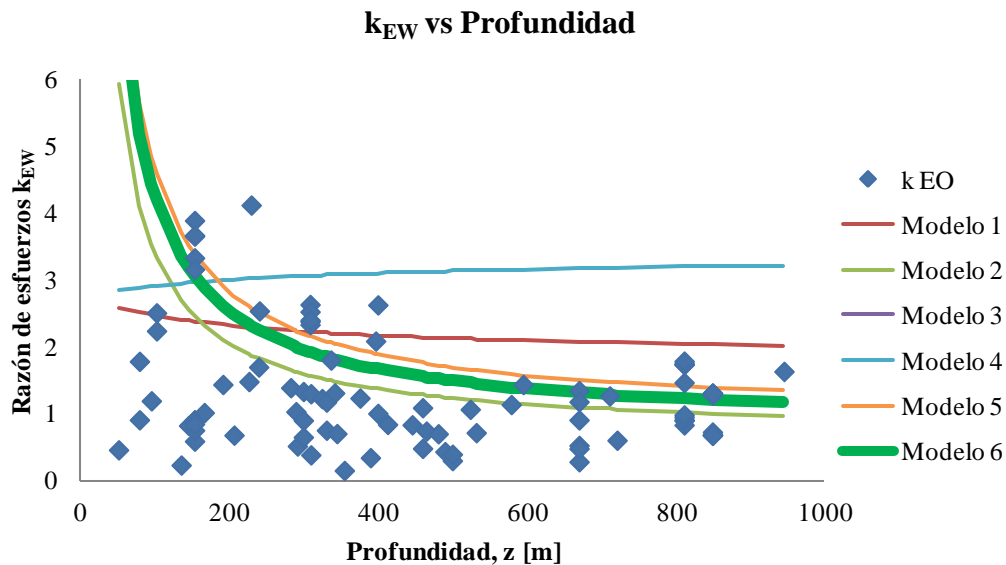


Figura Anexo C-0-4. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos.

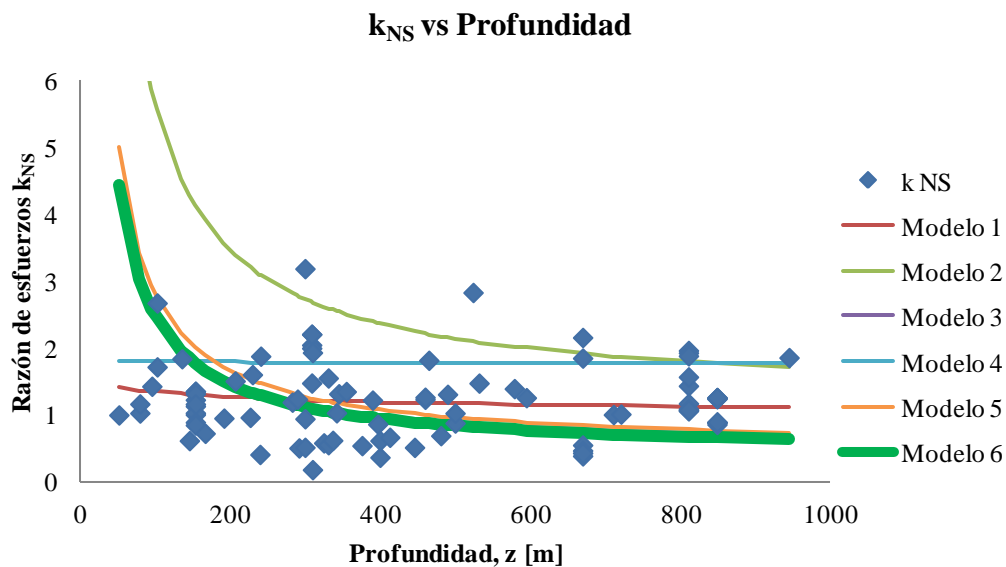


Figura Anexo C-0-5. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos.

Al revisar los gráficos se concluye que los modelos 1 y 4, modelos que tienen parámetros libres para el esfuerzo vertical, entregan tendencias lineales con respecto a la profundidad lo que no se condice con los antecedentes que se tienen para esta razón. El resto de los modelos muestra la tendencia típica para este parámetro sin embargo el modelo 2 entrega una tendencia muy alejada de los valores en el caso del k_{NS} .

Primer invariante

Se muestra el gráfico para la primera invariante de esfuerzos.

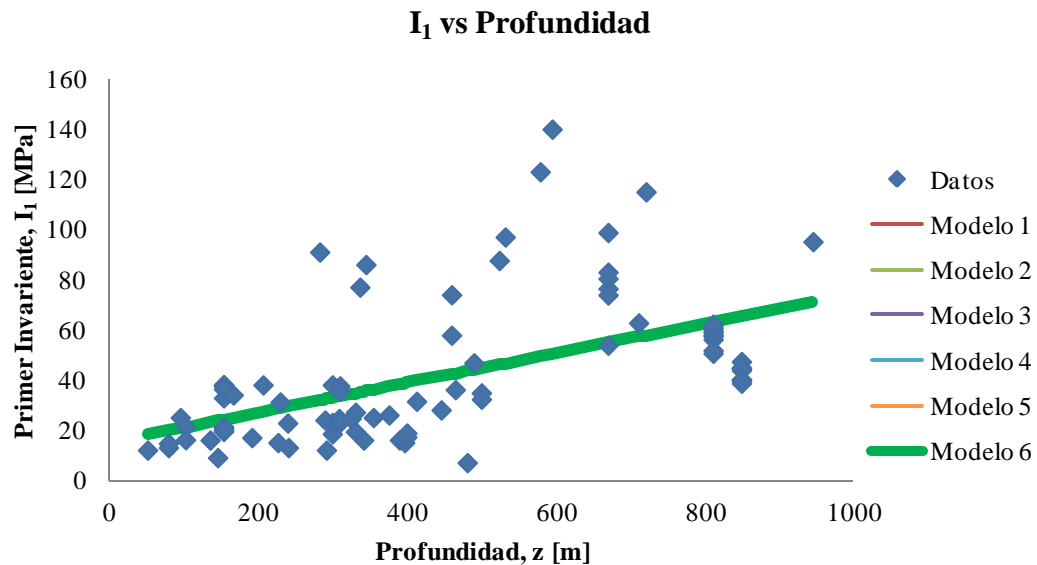


Figura Anexo C-0-6. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos.

Se aprecia que todos los modelos muestran un comportamiento similar, esto muestra que esta restricción se cumple por todas las alternativas.

Criterio de Mohr - Coulomb

Se muestra el gráfico para el criterio de Mohr - Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914).

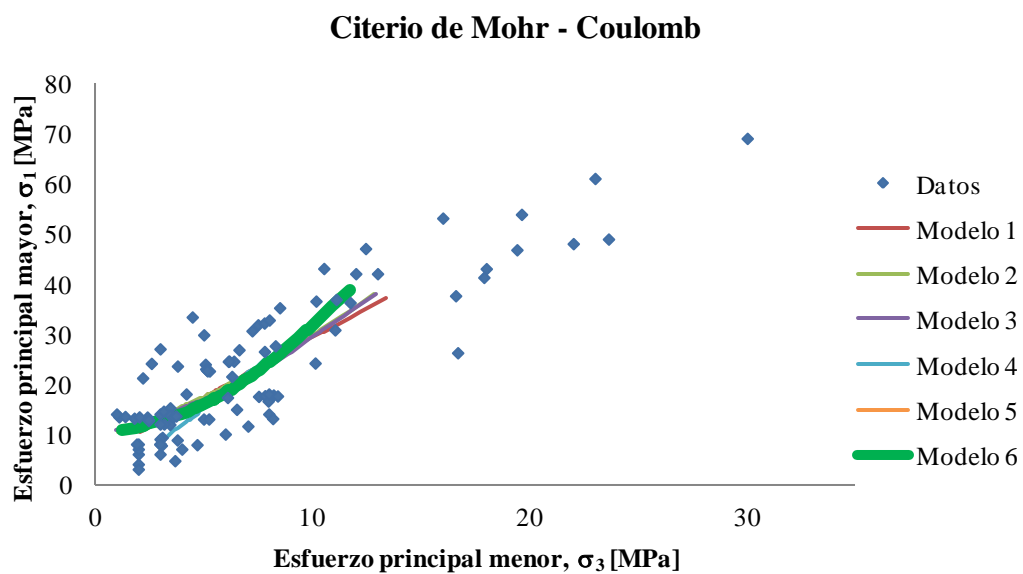


Figura Anexo C-0-7. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos.

Se aprecia que en general los tres primeros modelos muestran una tendencia similar mientras que los últimos muestran tendencia con un gradiente más alto lo que se traduce a tener un ángulo de fricción mayor reflejando así un tipo de roca de mejor calidad.

A pesar de que exista esta diferencia los modelos muestran tendencias que se mantienen en las mediciones realizadas.

Razón de esfuerzos b

Se muestran el histograma y el gráfico con respecto a la profundidad para el parámetro b.

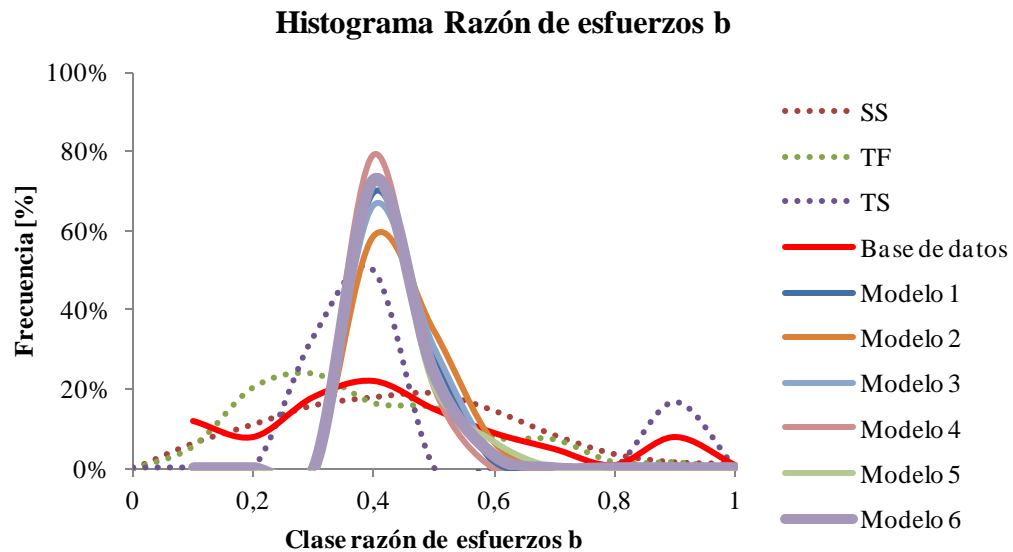


Figura Anexo C-0-8. Histograma parámetro b de los 6 modelos más los mecanismo focales.

Se observa que en todos los modelos el comportamiento del parámetro b es similar y parecido al mecanismo focal TS, que como se explica tiene un comportamiento de falla inversa con componente de falla transversal.

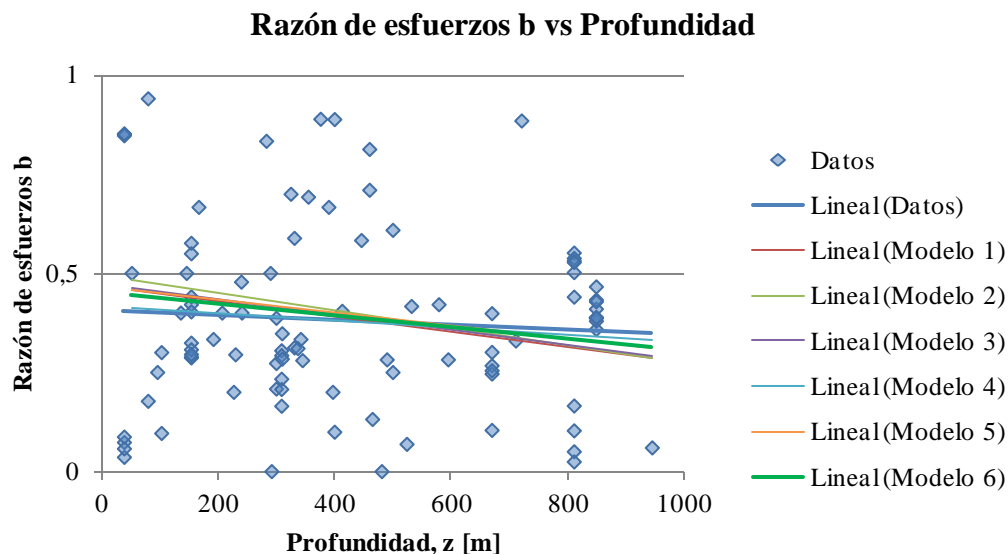


Figura Anexo C-0-9. Relaciones lineales del parámetro b con la profundidad para los 6 modelos.

En general todos tienen una tendencia similar a lo obtenido a partir de las mediciones, los diferentes modelos muestran valores que se acercan al 0.5 en profundidades bajas y que disminuyen cuando se profundiza.

Base de Datos de la mina 6

Al igual que para la base de datos de minas chilenas se realiza los mismo gráfico pudiendo comprender mejor el comportamiento de los diferentes modelos. Se presentan los gráficos obtenidos para las 6 alternativas optimizadas.

Se muestra el tensor de esfuerzos para todos los modelos

Tabla Anexo C-0-3. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado.

	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>
$\tau_{EW/NS}$	0,000	0,000	0,001	0,005	0,002	0,654
$\tau_{EW/V}$	0,000	0,000	0,020	0,026	0,008	9,399
$\tau_{NS/V}$	0,003	3,968	0,001	0,000	0,002	2,299
σ_{EW}	0,011	40,215	0,021	34,309	0,008	27,709
σ_{NS}	0,005	19,565	0,000	27,635	0,000	24,847
σ_V	0,017	14,091	0,032	0,000	0,045	0,000

	Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6	
	Grad.	Inter.	Grad.	Inter.	Grad.	Inter.
$\tau_{EW/NS}$	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000
$\tau_{EW/V}$	0.006	0.000	0.005	0.031	0.004	8.748
$\tau_{NS/V}$	0.000	0.000	0.007	0.040	0.002	3.556
σ_{EW}	0.010	21.648	0.011	21.306	0.014	33.397
σ_{NS}	0.011	40.215	0.009	40.693	0.014	18.914
σ_V	0.012	12.008	0.032	0.000	0.045	0.000

Se aprecia que en general todos los gradientes de los esfuerzos normales son bajos y las constantes para la intersección tienen un alto valor. En el caso de los esfuerzos de corte los gradientes son muy cercanos a cero lo que muestran que las orientaciones de los esfuerzos deberían ser similares cuando se profundiza.

Se analizan también los coeficientes de determinación ajustados para todos los modelos.

Tabla Anexo C-0-4. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte, mina 6

Modelo	σ_{EW}	σ_{NS}	σ_V	$\tau_{EW/NS}$	$\tau_{EW/V}$	$\tau_{NS/V}$
1	-307,51	-198,81	-119,50	-119,60	-158,39	-165,85
2	-299,12	-138,87	-206,45	-124,93	-667,02	-122,94
3	-113,85	-161,54	-160,39	-147,56	-825,51	-130,15
4	-127,72	-232,26	-168,12	-119,60	-254,74	-124,99
5	-125,10	-219,81	-208,49	-120,31	-237,68	-142,86
6	-192,04	-153,00	-160,39	-119,60	-596,73	-149,91

Se observa que los ajustes son mucho menores a los encontrados en el modelo de esfuerzos para Chile. Además se aprecia que ajustan mejor los esfuerzos de corte comparados con los esfuerzos normales.

El modelo que tiene los mejores ajustes es el modelo 1, al igual que en el análisis para la base de datos de minas chilenas no coincide el modelo que tiene menor AIC con el que ajusta mejor para los demás esfuerzos. Sin embargo en este caso el modelo 1 es el modelo más similar al modelo 4 elegido finalmente.

Esfuerzos de Corte

Se presentan las tendencias para los esfuerzos de corte.

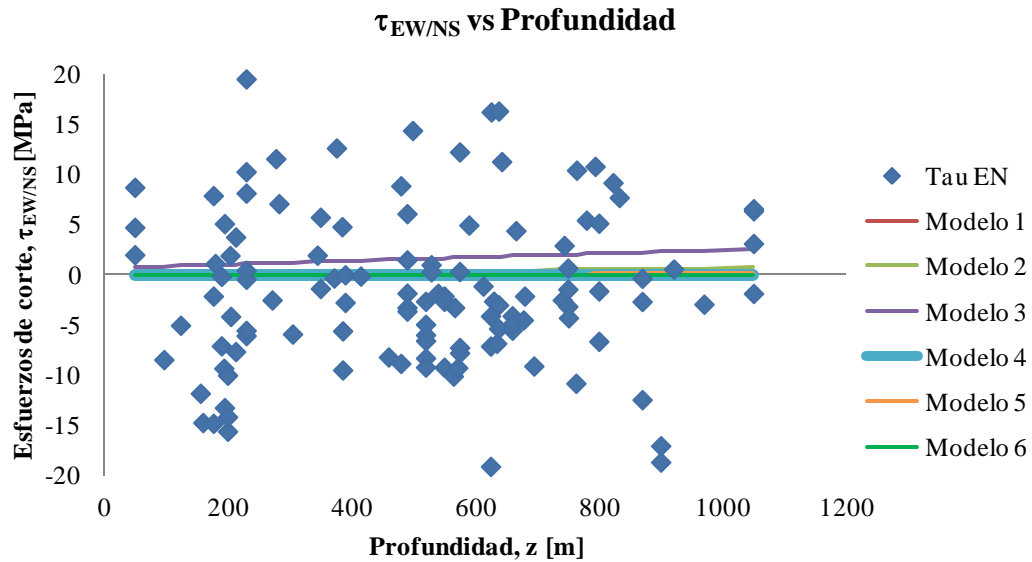


Figura Anexo C-0-10. Esfuerzo de corte EW/NS para los 6 modelos, mina 6.

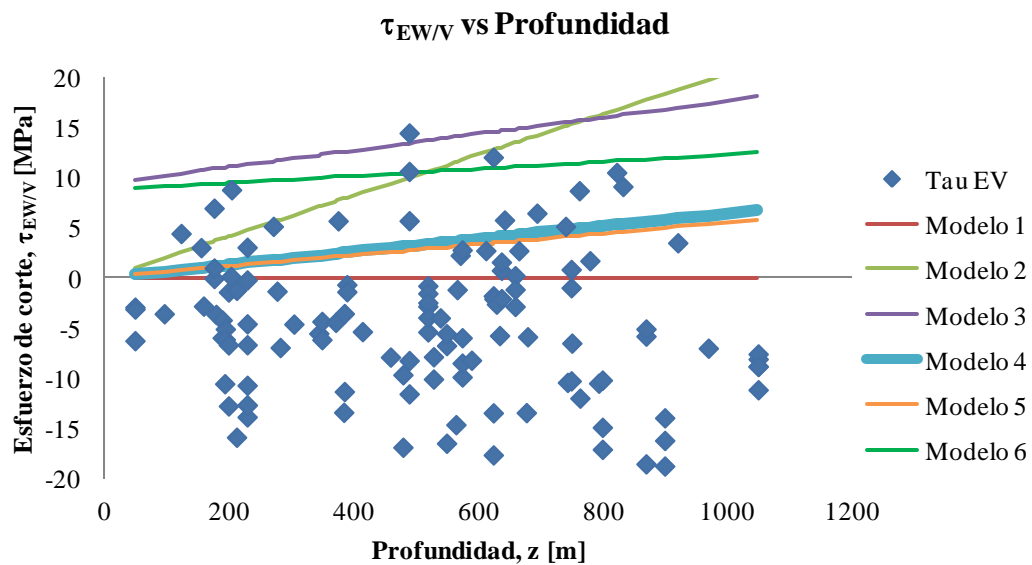


Figura Anexo C-0-11. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos, mina 6.

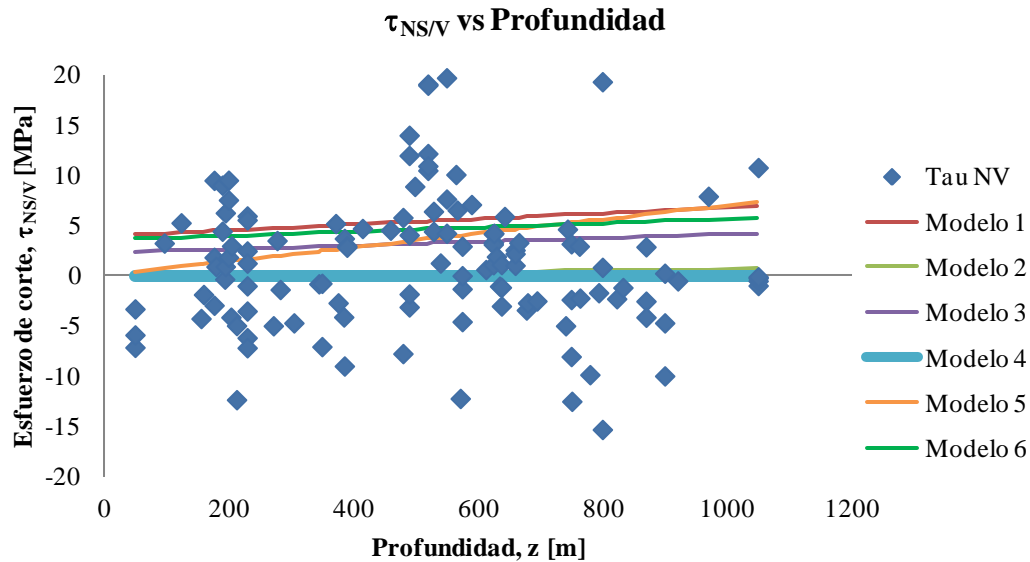


Figura Anexo C-0-12. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos, mina 6.

Se aprecia que el modelo elegido muestra tendencias similares en el caso del esfuerzo de corte que relaciona los esfuerzos horizontales. En los otros casos se aprecia que tiene una tendencia distinta y más cercana a esfuerzos de corte nulos.

Razón de esfuerzos k

Se muestran las tendencias para las razones de esfuerzos k_{EW} y k_{NS} .

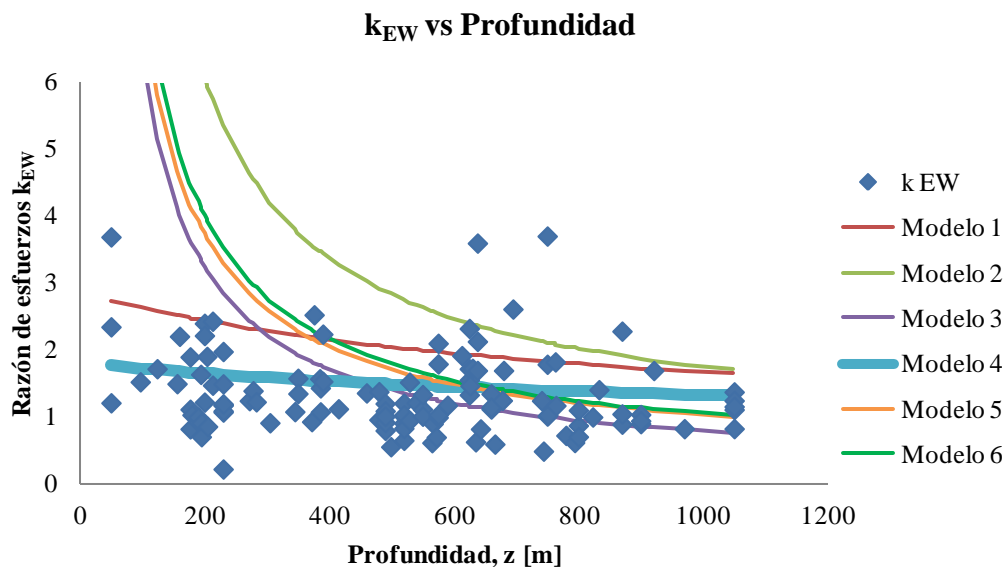


Figura Anexo C-0-13. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos, mina 6.

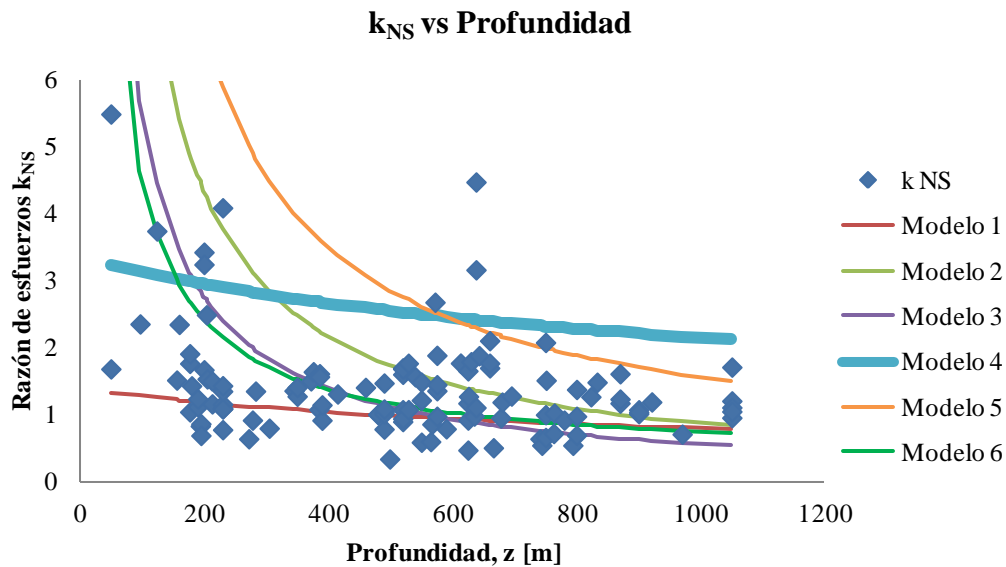


Figura Anexo C-0-14. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos, mina 6.

Se observan tendencias que si bien se acercan a valores bajos no tiene la tendencia típica de valores altos para profundidades bajas y luego una disminución grande cuando se llegan a profundidades más altas.

Primer Invariante

Se muestra las tendencias de los 6 modelos para la primera invariante de esfuerzos.

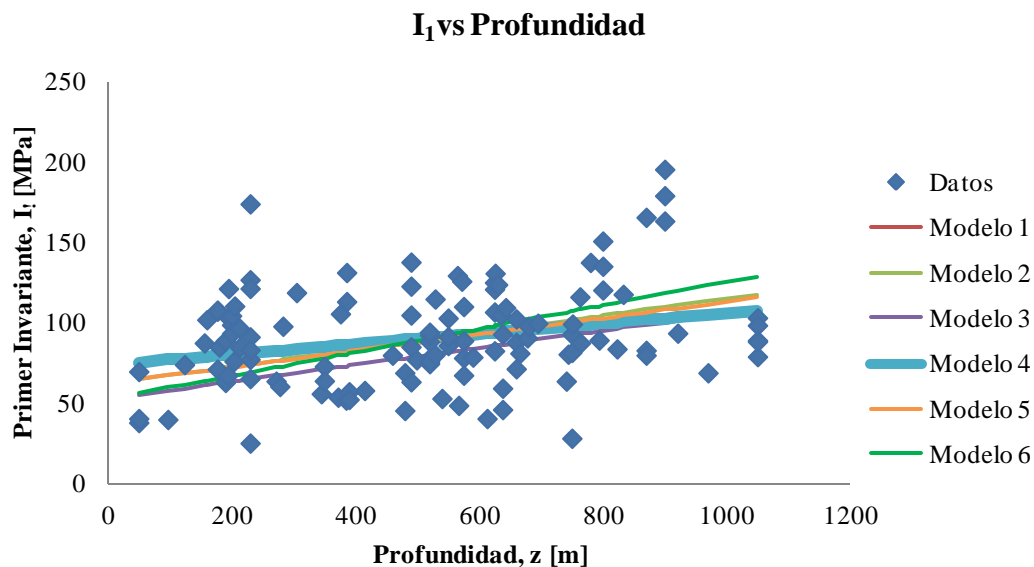


Figura Anexo C-0-15. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos, mina 6.

Se aprecia que todos los modelos muestran comportamientos similares.

Criterio de Mohr - Coulomb:

Se presenta las tendencias para el criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914).

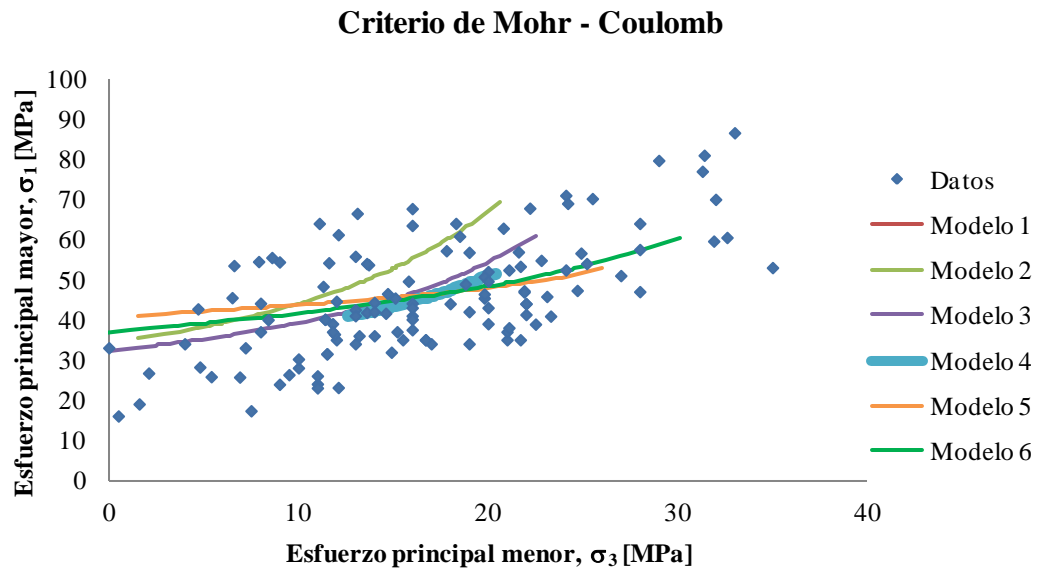


Figura Anexo C-0-16. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos, mina 6.

Se aprecia que en general todos los modelos muestran tendencias dentro del margen de los datos, Sin embargo el modelo 2 y 3 muestran tendencias con gradientes más altos lo que implica mayores valores para la cohesión que representa mejor calidad de macizo rocoso.

Razón de esfuerzos b

En este caso se compara la frecuencia de este parámetro con lo obtenidos para la base de datos y para los diferentes mecanismos focales.

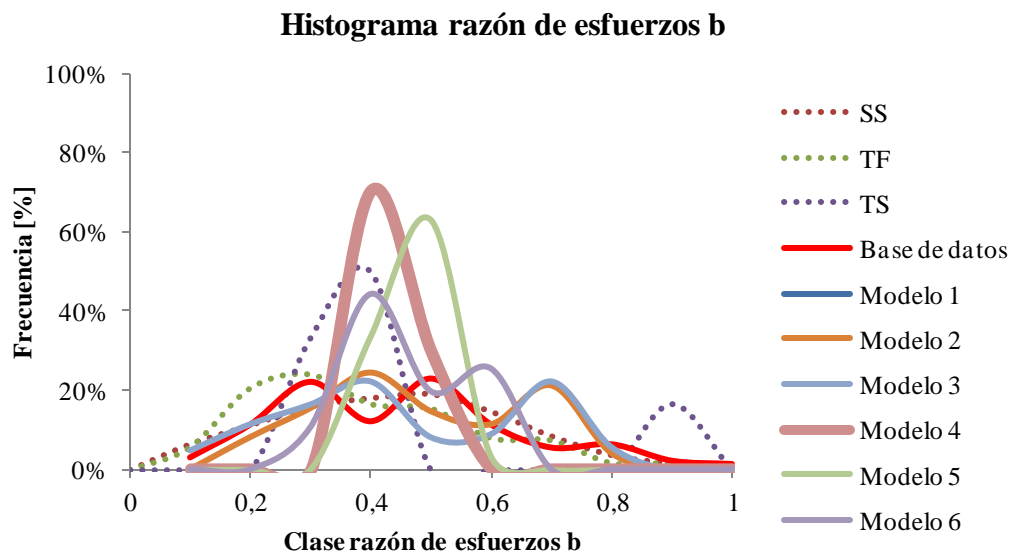


Figura Anexo C-0-17. Histograma razón de esfuerzos b de los 6 modelos más los mecanismo focales, mina 6.

Se aprecia que los modelos tienen diferentes comportamientos en el histograma y por lo tanto no es posible concluir con precisión el mecanismo focal en este caso.

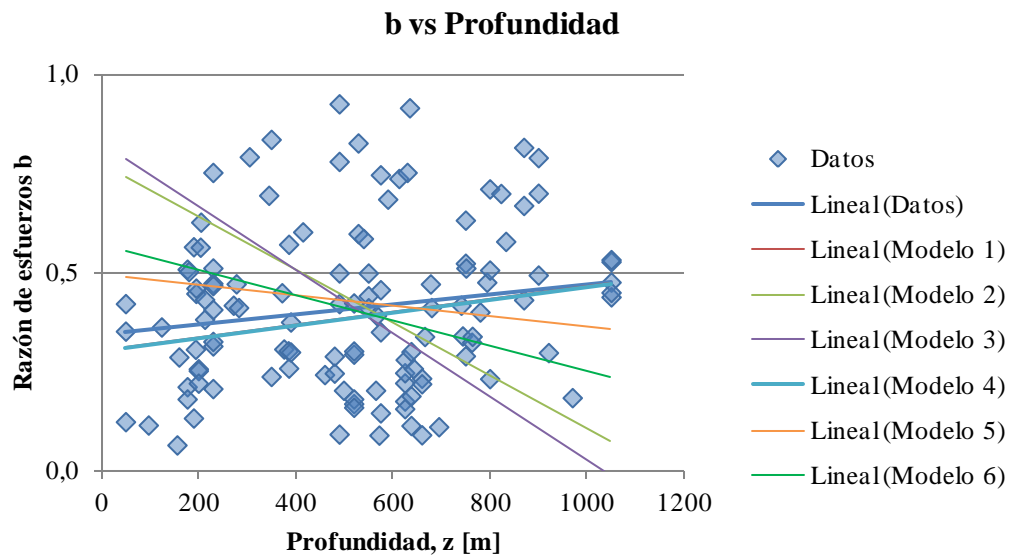


Figura Anexo C-0-18. Relaciones lineales de la razón de esfuerzos b con la profundidad para los 6 modelos, mina 6.

Se observa en este caso que las tendencias lineales son muy diferentes para todos los modelos, sin embargo en el caso del modelo 4 este muestra una trayectoria similar a la base de datos.

Se concluye de este estudio que la gran dispersión presente en la base de datos hace difícil concluir sobre el comportamiento de los esfuerzos ya que como se vio en las tendencias las trayectorias no siempre eran similares y presentan comportamientos que puede llevar a conclusiones muy diferentes.

Base de Datos de minas canadienses

Se muestran los mismos gráficos analizados en las secciones anteriores para las minas canadienses pudiendo comprender mejor el comportamiento de los diferentes modelos. Se presentan los gráficos obtenidos para las 6 alternativas optimizadas.

Las ecuaciones para los diferentes modelos se presentan a continuación.

Tabla Anexo C-0-5. Tensor de esfuerzos para cada modelo optimizado, minas canadienses.

	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>
$\tau_{EW/NS}$	0,000	0,013	0,000	0,004	0,003	0,022
$\tau_{EW/V}$	0,003	4,844	0,004	0,000	0,004	1,895
$\tau_{NS/V}$	0,005	3,877	0,000	0,005	0,005	0,159
σ_{EW}	0,020	6,954	0,019	11,004	0,023	6,773
σ_{NS}	0,028	10,904	0,032	16,737	0,030	16,527
σ_V	0,025	12,777	0,024	0,000	0,026	0,000

	Modelo 4		Modelo 5		Modelo 6	
	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>	<i>Grad.</i>	<i>Inter.</i>
$\tau_{EW/NS}$	0,000	0,005	0,001	0,000	0,002	0,121
$\tau_{EW/V}$	0,000	0,071	0,007	0,023	0,005	0,000
$\tau_{NS/V}$	0,000	0,245	0,005	0,000	0,006	0,000
σ_{EW}	0,032	16,952	0,028	18,286	0,020	10,387
σ_{NS}	0,023	9,854	0,020	10,378	0,028	18,200
σ_V	0,018	3,890	0,026	0,000	0,026	0,000

Se observa en la Tabla Anexo C-0-5 que los valores para los gradientes son similares entre sí, visto también en las tendencias presentadas en la sección 5.3.2, mientras que las intersecciones varían de un modelo a otro. En el caso de los esfuerzo de corte se muestran gradientes cercanos a 0 pero con cierta inclinación lo que produce los cambios de orientación de los esfuerzos principales.

Los coeficientes de determinación ajustados se muestran a continuación.

Tabla Anexo C-0-6. Coeficiente de determinación ajustado para los esfuerzos normales y de corte, minas canadienses.

Modelo	σ_{EW}	σ_{NS}	σ_V	$\tau_{EW/NS}$	$\tau_{EW/V}$	$\tau_{NS/V}$
1	-146,33	-82,30	-150,27	-187,74	-468,66	-437,12
2	-114,12	-124,93	-61,50	-192,78	-269,81	-172,67
3	-119,88	-104,82	-56,01	-164,81	-383,01	-228,48
4	-159,24	-101,23	-71,46	-192,28	-173,76	-171,38
5	-126,71	-113,18	-56,04	-171,17	-438,91	-231,79
6	-110,62	-104,33	-56,01	-166,18	-336,28	-276,98

Se aprecia que los modelos 3 y 4 tienen los menores R^2 ajustados, también se distingue que los modelos que utilizan las restricciones son aquellos que obtienen mejores correlaciones.

Esfuerzos de Corte

Se presentan las tendencias para los esfuerzos de corte.

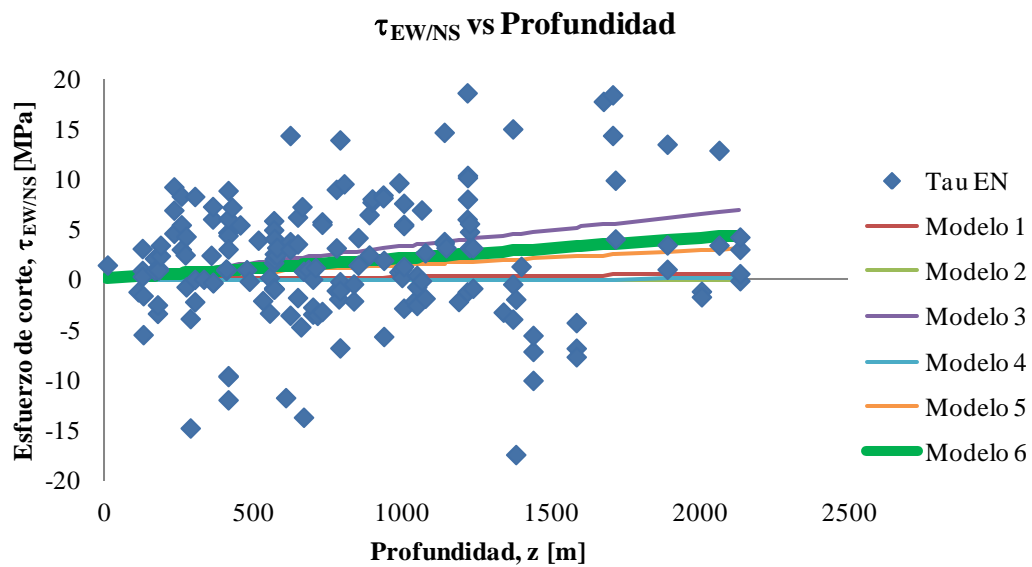


Figura Anexo C-0-19. Esfuerzo de corte EW/NS para los 6 modelos, minas canadienses.

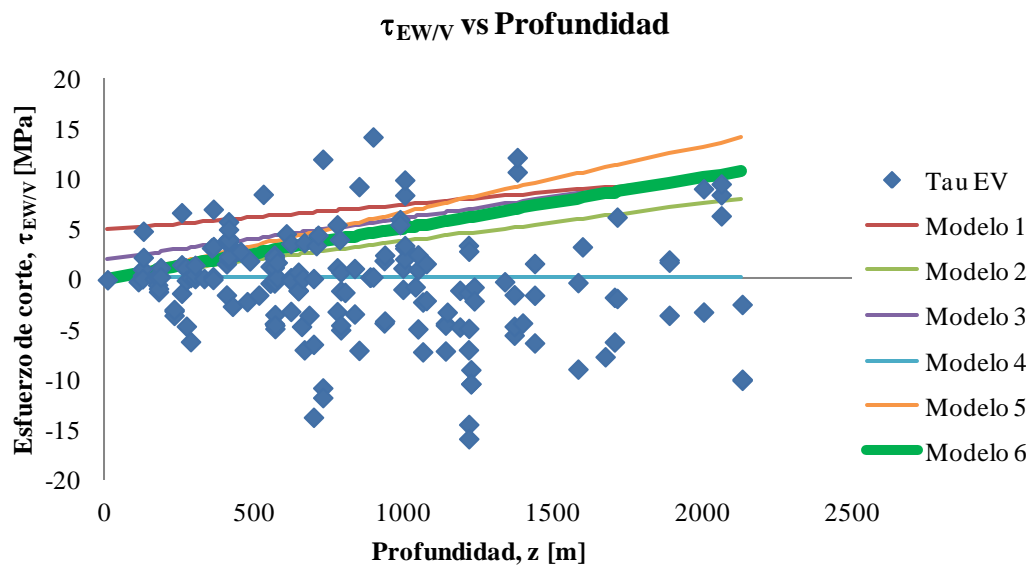


Figura Anexo C-0-20. Esfuerzo de corte EW/V para los 6 modelos, minas canadienses.

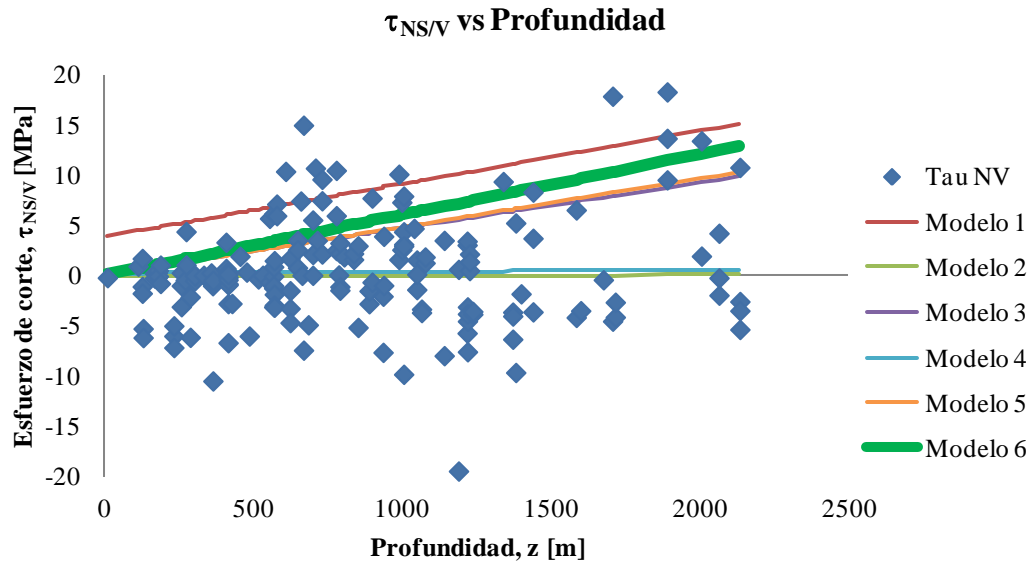


Figura Anexo C-0-21. Esfuerzo de corte NS/V para los 6 modelos, minas canadienses.

Se aprecia en la Figura Anexo C-0-19, Figura Anexo C-0-20 y Figura Anexo C-0-21 que las tendencias de los esfuerzos de corte muestran gradientes altos para la mayoría de los modelos sin embargo algunos muestran tendencias con bajo gradiente y valores muy cercanos a 0.

Razón de esfuerzos k

Se muestran las tendencias para las razones de esfuerzos k_{EW} y k_{NS} .

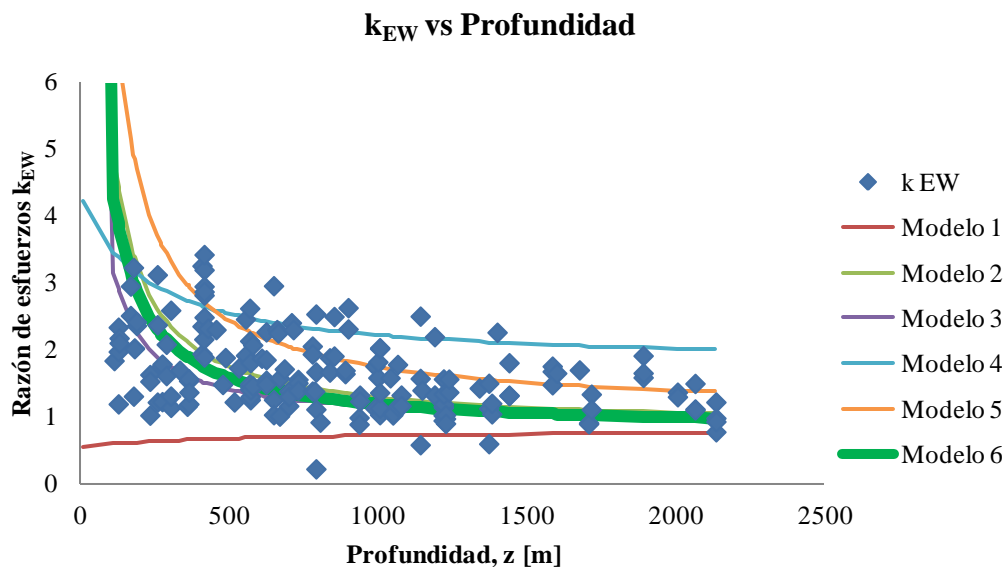


Figura Anexo C-0-22. Razón de esfuerzos k_{EW} para los 6 modelos, minas canadienses.

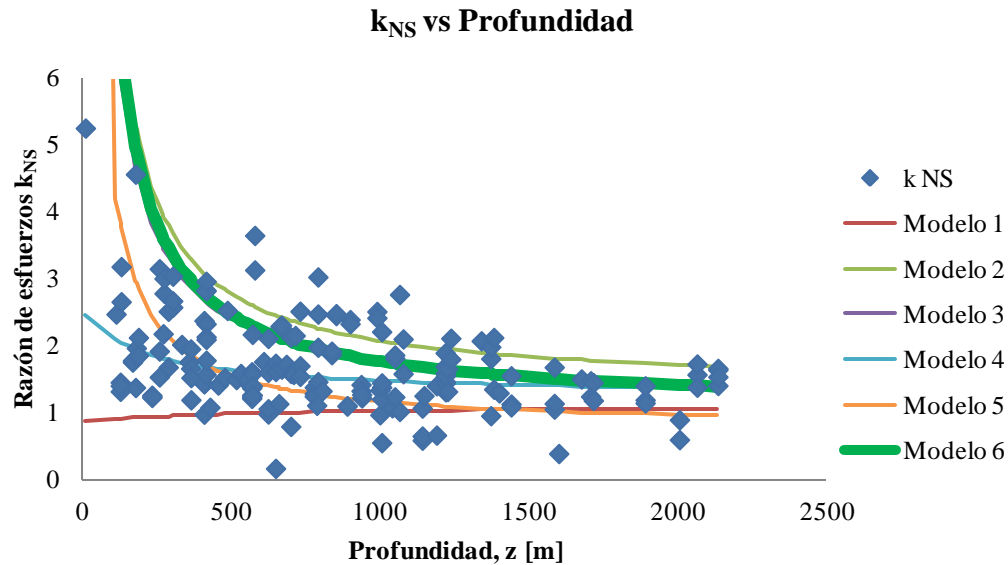


Figura Anexo C-0-23. Razón de esfuerzos k_{NS} para los 6 modelos, minas canadienses.

Se aprecia que la tendencia muestra el comportamiento típico para esta razón en los dos casos, se aprecia que el modelo 1 muestra un comportamiento distinto que va de valores menores a mayores.

1° Invariante

Se muestra las tendencias de los 6 modelos para la primera invariante de esfuerzos.

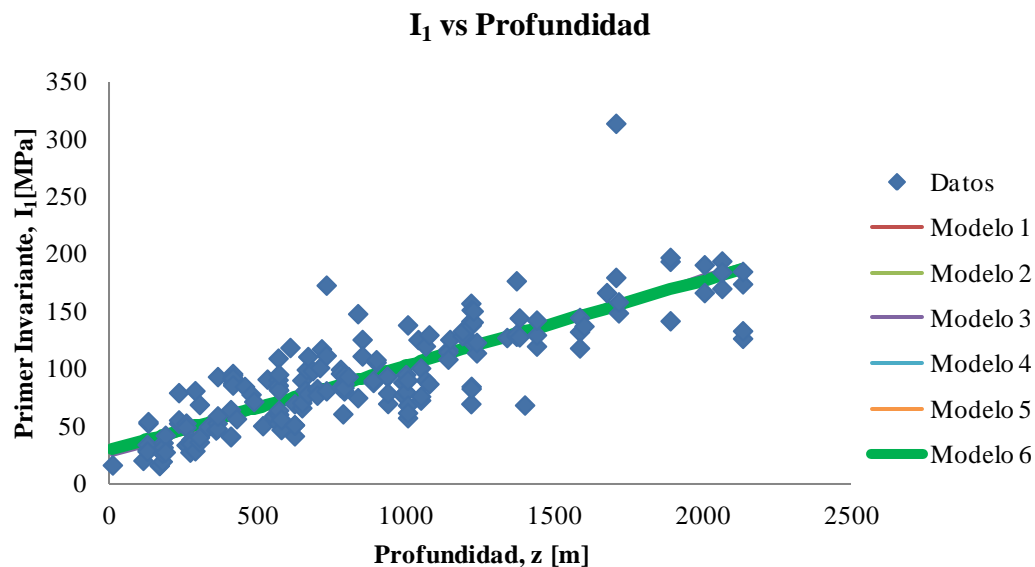


Figura Anexo C-0-24. Primer Invariante de esfuerzos para los 6 modelos, minas canadienses.

Se observa un comportamiento similar para todos los modelos lo que concuerda con lo encontrado con los esfuerzos principales.

Criterio de Mohr - Coulomb:

Se presenta las tendencias para el criterio de Mohr-Coulomb (Coulomb 1776) (Mohr 1914).

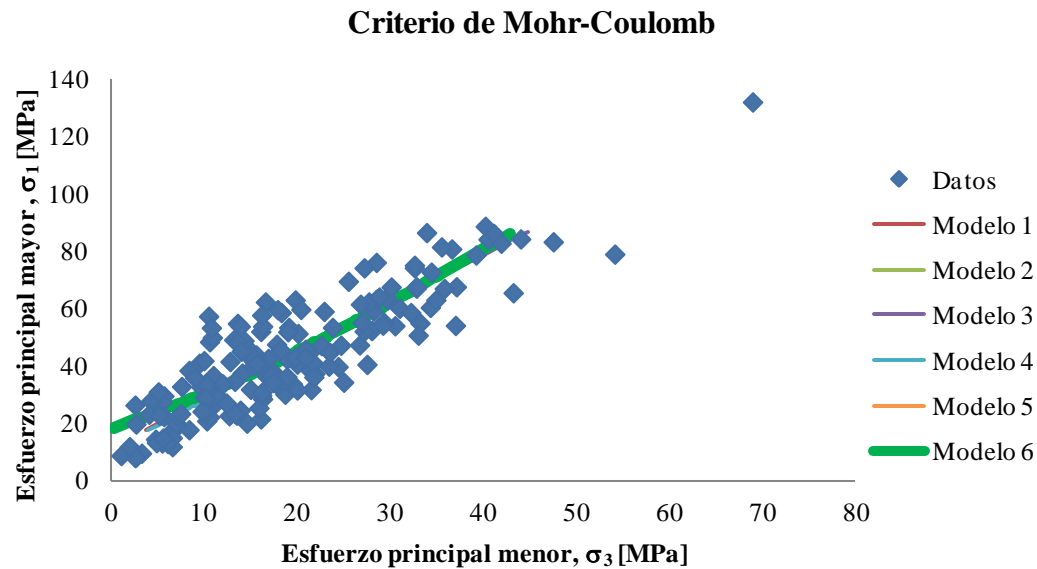


Figura Anexo C-0-25. Criterio de Mohr - Coulomb para los 6 modelos, minas canadienses.

Se observa que todos los modelos muestran tendencias similares lo que conversa con lo obtenido con los esfuerzos principales.

Razón de esfuerzos b

En este caso se compara la frecuencia de este parámetro con lo obtenidos para la base de datos de minas canadienses y para los diferentes mecanismos focales.

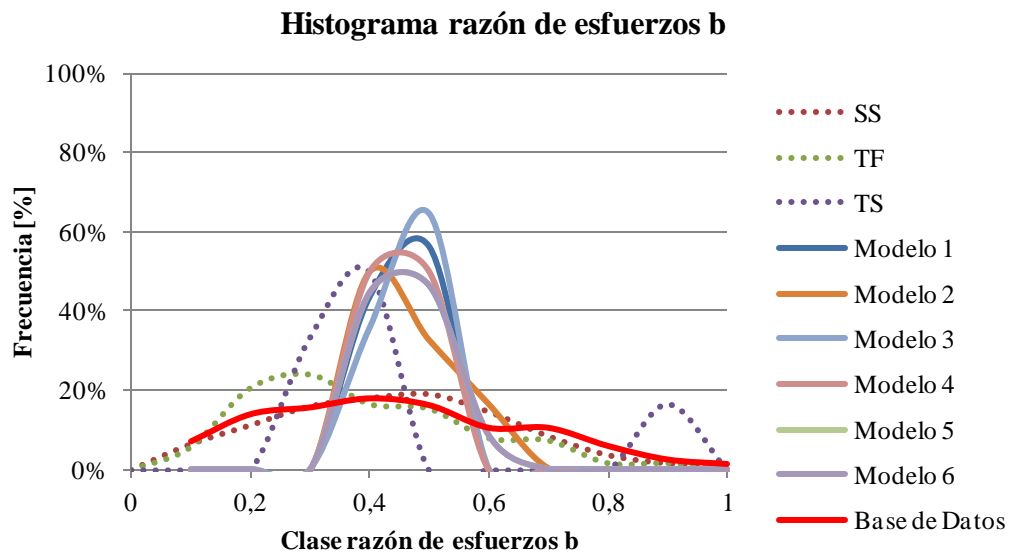


Figura Anexo C-0-26. Histograma parámetro b de los 6 modelos más los mecanismo focales, minas canadienses.

Se aprecia que la base de datos muestra un comportamiento parecido al mecanismo focal SS, que implica una falla de rumbo, en el caso de los histogramas de los modelos muestran un comportamiento no similar pero con una media más cercana a la que se obtiene por la base de datos.

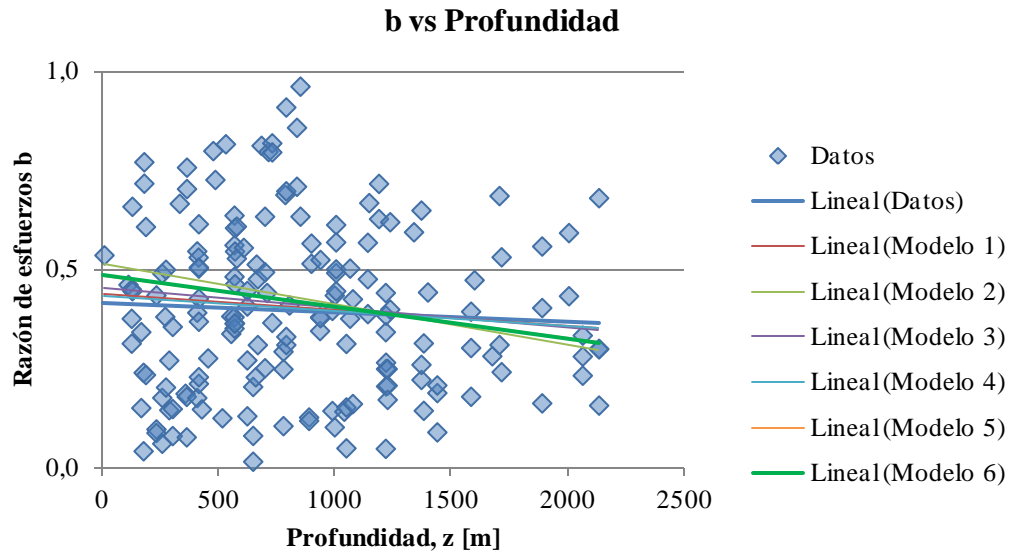


Figura Anexo C-0-27. Relaciones lineales del parámetro b con la profundidad para los 6 modelos, minas canadienses.

Se aprecia que las trayectorias de las tendencias lineales son similares y se parecen a la obtenida por los datos.

Se distingue que en general todas las tendencias para los esfuerzos y diferentes variables analizadas son similares y por lo tanto se puede inferir que el comportamiento del modelo es el correcto.