



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS**

**ANÁLISIS DE ENVOLVENTE PARA LA ESTIMACIÓN
DE LAS PROPIEDADES DE MATERIAL DE LASTRE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

NICOLÁS SOBARZO DE REQUESÉNS

**PROFESOR GUÍA:
JUAN LUIS YARMUCH**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ELEONORA WIDZYK CAPEHART
GASTÓN GONZALEZ SHAND**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN DE MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS
POR: NICOLÁS SOBARZO DE REQUESÈNS
FECHAS: 21/08/2015
PROFESOR GUÍA: SR. JUAN LUIS YARMUCH

“ANÁLISIS DE ENVOLVENTE PARA LA ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE MATERIAL DE LASTRE”

Los ensayos triaxiales de gran tamaño permiten una mejor estimación del comportamiento de material depositado en botaderos, pues al incluir granulometrías de mayor tamaño entregan resultados similares a los esperables en terreno, pues al carecer de procesos de conminución posteriores a la voladura en el material destinado a botaderos, las colpas pueden alcanzar el orden métrico.

Se recolectó una base de datos de 260 ensayos triaxiales, en su mayoría de gran escala, información que fue agrupada en función de su tamaño de partículas, separando 2 grandes grupos, los ensayos con granulometría máxima menor a 80mm y los con granulometrías mayores, por presentar tendencias similares en cuanto a la forma de sus curvas de su distribución granulométrica.

Por medio de softwares de ajustes matemáticos y mediante test de hipótesis se llegó a un modelo matemático de la forma $\sigma_1'^{0.5} = b'\sigma_3'^{0.5}$ con diferentes factores “b” en función para cada granulometría.

Basados en datos históricos, se recrearon 22 escenarios, de los cuales 17 representaron escenarios estables y 5 escenarios inestables. Los modelos de simulación fueron trabajados en el software Slide, aprovechando perfiles previamente construidos por Piteau Associates en campañas anteriores, por ende, solo se recalibro el material de botadero con la nueva curva de ajuste y se conservó el resto de los materiales previamente definidos (en función de mineralizaciones, litologías, alteraciones, niveles freáticos, geometría).

Al contrastar las ecuaciones obtenidas con la ecuación de Leps y la ecuación de Indraratna (1993) fue posible notar que a la hora de convertir los datos a un espacio σ_n vs τ , los valores de cizalle para las ecuaciones planteadas en este trabajo son menores, lo que guarda sentido con lo que se esperaría de un material no confinado.

Abstract

Large-Scale Triaxial Testing, lets a better estimation about the behavior of the material deposited in Dumps,if it includes higher particle size, it gives similar expected results on the field where it does not exist comminutions process after extraction, and rocks can have a metric size.

A database of 260 Traxial tests was collected, mostly large-scale triaxial test.; information that was grouped by their particle size, separated in two big groups. The test with maximum particle-size less than 80 mm and test with maximum particle size higher than 80 mm, because they have similar trends in their particle-size distribution.

Using a Mathematical Software and through a hypothesis testing, a mathematical model was created, $\sigma_1'^{0.5} = b'\sigma_3'^{0.5}$, with different B factors for different cases.

Based in historical data, were created, 17 of them showed stable conditions and 5 instable. The models of simulation were created using "Slide", a slope stability software taking olds profiles created by Piteau Associates old works, and using all the old material less Dump (Mineralization, Lithology, Alteration, Water Table and Geometry).

Contrasting the gotten equations with Leps (1970), and the equation of Indraratna, it was possible to notice that when we change the datum to σ_n vs τ , , Cizalle values for the equations set out in this investigation were lower, and it is what happens with a no confined material

Keywords: Triaxial, Dump, equation, adjustments, particle size.

Agradecimientos

A Gastón González, Ingeniero Senior de Piteau Associates por proponer este tema y supervisarme en el desarrollo del mismo.

A los Profesores Yarmuch y Widzyk por contar con sus apoyo y supervisión durante el semestre.

Compañía minera Antamina, sobre todo a los Señores John Pottie y Carlos Aguirre por facilitar información de ensayos triaxiales gigantes de Antamina.

Al señor Emilio Farias por facilitar la base de datos de ensayos Triaxiales de la división Andina de Codelco.

Al Señor Leonardo Dorador de Golder por orientarme y facilitarme datos del VI congreso Chileno de Geotecnia, el cual incluía datos de la división Los Bronces, de Minera Sur Andes.

Tabla de contenido

Agradecimientos	5
1 Introducción	15
1.1 Motivación del Trabajo	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivos generales:.....	16
1.2.2 Objetivos específicos:.....	16
1.3 Hipótesis.....	16
1.4 Alcances.....	16
1.5 Entregable	16
2 Antecedentes	17
2.1 Antecedentes Generales	17
2.1 Revisión de la resistencia al cizallamiento de enrocado	17
2.2 Ensayos Triaxiales de gran escala de enrocado de Grauvaca	18
2.3 Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño	19
2.4 Caracterización geomecánica de suelos granulares gruesos.	20
3 Metodología	23
3.1 Recolección de datos.....	24
3.1.1 Homologación de la información	26
3.1.2 Análisis granulométrico.....	28
3.1.3 Información reciente vs información histórica	31
3.2 Ajustes Matemáticos.....	33
3.2.1 Línea de tendencias.....	33
3.2.2 Curvas de tendencia	36
3.2.3 Elección de curva.....	43
3.2.4 Selección de Caso a Modelar	45
3.2.5 Test de Hipótesis	47
3.2.6 Curvas Seleccionadas para Simulaciones	50
3.3 Simulaciones.....	51
3.3.1 Construcción de los perfiles	51
3.3.2 Material de Botadero Simulado	53

3.3.3	Selección de método de análisis y simulación	56
3.3.4	Superficies a analizar	57
4	Resultados	59
5	Conclusión y Discusión	66
6	Bibliografía	67
7	Anexo y Apéndices	68

Índice de tablas

Tabla 1 – Información recolectada según fuentes	25
Tabla 2 Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 1 (σ_1 vs σ_3)	39
Tabla 3 Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 2 (σ_1 vs σ_3)	39
Tabla 4 - Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 1 (q vs p)	42
Tabla 5 - Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 2 (q vs p)	42
Tabla 6 - Intercepto en funciones Logarítmicas	43
Tabla 7 – Ecuaciones seleccionadas y sus diferentes factores.....	46
Tabla 8 - Ecuaciones Para Caso Final a analizar	46
Tabla 9 - Ecuaciones de TableCurve 2d y Excel con y sin intercepto	47
Tabla 10 - Errores Estándar de los Interceptos Estimados.....	47
Tabla 11 - Grados de Libertad Caso final.....	48
Tabla 12 - Ecuaciones Finales para simulación	50
Tabla 13- Origen de Secciones y Numero de Superficies Simuladas	58
Tabla 14 – Resultados Simulación en superficies que no deben fallar	60
Tabla 15 - Resultados Simulación en superficies que no deben fallar	60

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 – Grafico extraído de Leps.....	17
Ilustración 2- Figuras extraída de Indraratna (1993).....	19
Ilustración 3 -Variación del Ángulo de Fricción Interna con el Esfuerzo Normal y Comparación con Resultados de Otros Materiales de Cantera y Angulares, Palma (2009).	20
Ilustración 4 - Ángulo de fricción máximo, Verdugo(2009)	22
Ilustración 5 – Despliegue de datos en espacio σ_1 vs σ_3	26
Ilustración 6 - Despliegue de datos en espacio ϕ vs σ_n	27
Ilustración 7 – Separación de granulometrías Caso 1	29
Ilustración 8 – Separación de granulometrías Caso 2	30
Ilustración 9- información sobre bandas de Leps (1970).....	31
Ilustración 10 – Contraste Datos Privados de Piteau, recolectados por Leps(1970) y para la Memoria.....	32
Ilustración 11 – Líneas de Tendencia Caso 1.....	33
Ilustración 12 – Líneas de Tendencia Caso 2.....	34
Ilustración 13 – Zoom en Caso2	35
Ilustración 14 - Ejemplos de ecuación 2 en espacio σ_1 vs σ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$	37
Ilustración 15 - Ejemplos de ecuación 3 en espacio σ_1 vs σ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$	37
Ilustración 16 - Ejemplos ecuación 4 en espacio σ_1 vs σ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$	38
Ilustración 17 - Ejemplos ecuación 5 en espacio σ_1 vs σ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$	38
Ilustración 18 – Ejemplo Ecuación 6 aplicada al Caso 2 con $d_{max}>80mm$	40
Ilustración 19 - Ejemplo Ecuación 7 aplicada al Caso 2 con $d_{max}>80mm$	41
Ilustración 20- Ejemplo Ecuación 8 aplicada al Caso 2 con $d_{max}>80mm$	41
Ilustración 21 - Representación gráfica de ecuaciones del Caso 1	45
Ilustración 22- Representación gráfica de ecuaciones del Caso 2	45
Ilustración 23 - Vista Isométrica de triangulaciones de Litología, Mineralización, Alteración y Nivel Freático para construccion de material de Fundacion (bajo el botadero) en Rhinoceros 5.....	52
Ilustración 24- Vista Planta Topografía de Botaderos y secciones a cortar	52
Ilustración 25- Perfil de Análisis en Slide con Materiales de Fundación incorporados	53
Ilustración 26- Curva de Ajuste para $d_{max}<80$	54
Ilustración 27 - Curva de Ajuste para $d_{max}>80$	55
Ilustración 28- Curva de Ajuste para base de datos completa.....	55
Ilustración 29- Ventanas de configuración de Path Search	57
Ilustración 30 - Nomenclatura para bancos	57
Ilustración 31 - Comparación Curvas actuales y propuestas	59
Ilustración 32- Ejemplos superficies estables en Quebrada Blanca y Antamina respectivamente	61
Ilustración 33 - Superficies de Falla para banco 0303 casos $d_{max}<80$, $d_{max}>80$ y caso simplificación.....	61
Ilustración 34- Elementos de banco con deslizamiento.....	62
Ilustración 35- Material bajo sección 0303	63
Ilustración 36- Superficie 0203 responsable de minimizar efectos de deslizamiento en 0303	63
Ilustración 37 - Ejemplos de secciones de botadero que fallo en Line Creek	64
Ilustración 38 - Comparación entre condiciones similares para botaderos de Line Creek y Quebrada Blanca	65

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 – Estimación mediante potencias	36
Ecuación 2 – Estimación mediante Logaritmos.....	36
Ecuación 3 - Estimación mediante raíces cuadradas	36
Ecuación 4 - Estimación mediante polinomio con potencias.....	36
Ecuación 5 – Estimación mediante inversos multiplicativos.....	36
Ecuación 6 - Estimación mediante raíces cuadradas para semisuma vs semirestas	40
Ecuación 7 - Estimación mediante polinomio con potencias para semisuma vs semirestas.....	40
Ecuación 8 - Estimación mediante logaritmos para semisuma vs semirestas	40
Ecuación 9 - Ecuación descartada	42
Ecuación 10 - Ecuación descartada	42
Ecuación 11 - Ecuación candidata a ajuste	43
Ecuación 12 - Ecuación candidata a ajuste	43
Ecuación 13 - Ecuación de Hoek y Brown(2002)	43
Ecuación 14 - Desarrollo de Estimación mediante raíces cuadradas.....	44
Ecuación 15 – Liberalización de la Estimación planteada.	47
Ecuación 16- Test de Hipótesis.....	48
Ecuación 17 - Desarrollo Test de Hipotesis	48
Ecuación 18 - Criterio de Comparación del Test de Hipótesis	49
Ecuación 19 - Intervalo de Confianza para el Test de Hipótesis	49
Ecuación 20 - Desarrollo de intervalo de confianza.....	49
Ecuación 21 - Estimación propuesta base de datos completa (sin separación por granulometría).....	50
Ecuación 22 – Obtención de Esfuerzo Normal.....	53
Ecuación 23 – Obtención de Cizalle	53
Ecuación 24 - Obtención de ángulo de fricción.....	53

Índice de Anexos

Anexo 1 – Gráfico semi-Logarítmico en espacio σ_n vs ϕ ,	68
Anexo 2 – Gráfico espacio σ_1 vs σ_3 , Caso1	68
Anexo 3 – Gráfico Logarítmico en espacio σ_1 vs σ_3 , Caso1	69
Anexo 4 – Gráfico en Espacio σ_1 vs σ_3 , Caso2	69
Anexo 5 – Gráfico Logarítmico en espacio σ_1 vs σ_3 , Caso2	70
Anexo 6 - Granulometría Caso 1	70
Anexo 7 – Granulometría Caso 2.....	71
Anexo 8 – Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	72
Anexo 9 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bex^c$	72
Anexo 10 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=ax^b$	73
Anexo 11 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	73
Anexo 12 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	74
Anexo 13 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$	74
Anexo 14 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	75
Anexo 15 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$	75
Anexo 16 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	76
Anexo 17 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$	76
Anexo 18 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$	77
Anexo 19 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+be^{xc}$	77
Anexo 20 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$	78
Anexo 21 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$...	78
Anexo 22 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$	79
Anexo 23 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+be^{xc}$	79
Anexo 24 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$	80
Anexo 25 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	80
Anexo 26 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$	81
Anexo 27 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	81
Anexo 28 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$	82
Anexo 29 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	82
Anexo 30 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	83
Anexo 31- Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$	83
Anexo 32 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	84
Anexo 33 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	84

Anexo 34 – Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	85
Anexo 35 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	85
Anexo 36 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio p vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	86
Anexo 37 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bex^c$	86
Anexo 38 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	87
Anexo 39 - Caso 1, Escenario $80mm<d_{max}<152mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$	87
Anexo 40 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	88
Anexo 41 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	88
Anexo 42 - Caso 1, Escenario $152mm<d_{max}<175mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$	89
Anexo 43 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	89
Anexo 44 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	90
Anexo 45 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}<50$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	90
Anexo 46 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	91
Anexo 47 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	91
Anexo 48 - Caso 1, Escenario $175mm<d_{max}<200mm$ y $d_{60}>50$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$	92
Anexo 49 – Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	92
Anexo 50 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	93
Anexo 51 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	93
Anexo 52 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$	94
Anexo 53 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y=ax^b$	94
Anexo 54 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	95
Anexo 55 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	95
Anexo 56 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$	96
Anexo 57 – Caso 2, Escenario $d_{max}<20mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	96
Anexo 58 - Caso 2, Escenario $d_{max}<20mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	97
Anexo 59 - Caso 2, Escenario $d_{max}<20mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	97
Anexo 60 - Caso 2, Escenario $20mm<d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	98
Anexo 61 - Caso 2, Escenario $20mm<d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	98
Anexo 62 – Caso 2, Escenario $20mm<d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$	99
Anexo 63 - Caso 2, Escenario $20mm<d_{max}<80mm$, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	99
Anexo 64 - Caso 2, Escenario $20mm<d_{max}<80mm$, espacio σ_1 vs σ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$	100
Anexo 65- Tabla de Materiales bajo secciones de Botaderos.....	101
Anexo 66 – Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca	102
Anexo 67 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	103
Anexo 68 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	104
Anexo 69 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	105
Anexo 70 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	106
Anexo 71 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	107
Anexo 72 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	108

Anexo 73 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	109
Anexo 74 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	110
Anexo 75 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	111
Anexo 76 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	112
Anexo 77 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	113
Anexo 78 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	114
Anexo 79 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	115
Anexo 80 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	116
Anexo 81 - Sección1, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	117
Anexo 82- Sección1, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	118
Anexo 83 - Sección1, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	119
Anexo 84 – Sección2, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	120
Anexo 85 - Sección2, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	121
Anexo 86 - Sección2, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	122
Anexo 87 -Sección2, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	123
Anexo 88 - Sección2, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	124
Anexo 89 - Sección2, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	125
Anexo 90 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	126
Anexo 91 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	127
Anexo 92 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	128
Anexo 93- Sección2, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	129
Anexo 94 - Sección2, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	130
Anexo 95 - Sección2, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	131
Anexo 96 - Sección2, Superficie 0304, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	132
Anexo 97- Sección2, Superficie 0304, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	133
Anexo 98- Sección2, Superficie 0304, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	134
Anexo 99 - Sección2, Superficie 0404, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	135
Anexo 100 - Sección2, Superficie 0404, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	136
Anexo 101- Sección2, Superficie 0404, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca	137
Anexo 102 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	138
Anexo 103 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca	139
Anexo 104 - Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	140
Anexo 105 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	141
Anexo 106 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	142
Anexo 107 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	143
Anexo 108 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	144
Anexo 109 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	145
Anexo 110 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	146
Anexo 111 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	147
Anexo 112 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	148
Anexo 113 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	149
Anexo 114 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	150
Anexo 115 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	151
Anexo 116 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	152
Anexo 117 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	153
Anexo 118 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca	154

Anexo 119 - Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	155
Anexo 120 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	156
Anexo 121 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	157
Anexo 122 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	158
Anexo 123- Sección4, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	159
Anexo 124 - Sección4, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	160
Anexo 125 - Sección4, Superficie 0203, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	161
Anexo 126 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca	162
Anexo 127 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}<80$, Quebrada Blanca.....	163
Anexo 128 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste $d_{max}>80$, Quebrada Blanca.....	164
Anexo 129 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Antamina	165
Anexo 130 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Antamina.....	166
Anexo 131 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Antamina.....	167
Anexo 132 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Line Creek	168
Anexo 133- Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Line Creek	169
Anexo 134 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek	170
Anexo 135 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Line Creek.....	171
Anexo 136 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Line Creek.....	172
Anexo 137 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek	173
Anexo 138 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Line Creek.....	174
Anexo 139 - Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Line Creek	175
Anexo 140 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek	176
Anexo 141 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Line Creek.....	177
Anexo 142 - Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Line Creek	178
Anexo 143 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek	179
Anexo 144 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}<80$, Line Creek.....	180
Anexo 145 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste $d_{max}>80$, Line Creek.....	181
Anexo 146 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek	182

1 Introducción

1.1 Motivación del Trabajo

En cada operación minera a lo largo del país y del mundo, es habitual la movilización de enormes cantidades de material cuyo tratamiento no presenta interés económico. Dicho material, es depositado mediante volteo de camiones en zonas destinadas a este, y dado que no son materiales de mayor interés económico, esta operación carece de un control estricto o mayores estudios y conocimientos sobre su comportamiento, siendo habituales los deslizamientos de material.

Varios factores tienen incidencia en una mejor o peor estabilidad del depósito, siendo estos: pendiente del terreno de fundación, resistencia del material de fundación, condiciones freáticas del terreno, cargas dinámicas bajo condiciones sísmicas, clima de la zona en cuestión, grado de confinamiento y propiedades de resistencia del material constitutivo. La mayoría de las veces dichos deslizamientos no representan un gran riesgo, dado que se cuenta con amplias extensiones de terreno para la deposición.

Sin embargo con el pasar de los años y las nuevas tecnologías han permitido un mayor desarrollo de minas cordilleranas, las cuales dado su asentamiento se ven en la necesidad de aumentar en altura dichos depósitos, dada la escases de espacio. Esto se ha traducido como la necesidad de caracterizar este material para predecir su comportamiento sometido a las grandes presiones que la altura de este depósito podría alcanzar, pues los deslizamientos de material podrían bajar por laderas montañosas y terminar afectando poblados cercanos, o en muchos casos poner en riesgo la vida de los operadores que lo construyen.

Dado que el material estéril solo pasa por los procesos de voladora y luego es cargado directamente para ser depositado, el tamaño del material presentara una variada granulometría, pudiendo llegar a partículas del orden métrico. Es por esto que se hace necesario una recolección y análisis de los distintos tipos de materiales ensayados a lo largo de la historia con probetas de grandes dimensiones, pues con estas es más viable la predicción del comportamiento de este tipo de material, ya que dentro de ellas puede utilizarse material de tamaño más cercano al observado en terreno.

De manera general, la motivación del presente trabajo es recopilar información tanto de estudios recogidos por la literatura, como de manera particular por la empresa Piteau, y con ellos modelar una curva de comportamiento del material en un espacio de esfuerzos principales para así, en caso de condiciones meramente geométricas, predecir la estabilidad del talud de botadero.

Así, el fin último de esta memoria es generar una curva que modele matemáticamente cual será el comportamiento del material enrocado para con ella ser capaces de predecir bajo qué condiciones el botadero permanecerá estable, posibles recomendaciones en su construcción y precauciones que se deberán tener a la hora de incrementar la altura de estos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos generales:

- Plantear un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento del material lastre por medio de curvas de esfuerzos principales (σ_1 vs σ_3 y σ_n vs ϕ).

1.2.2 Objetivos específicos:

- Actualizar de curva de comportamiento planteada por Leps (1970) con nueva información recolectada hasta la fecha.
- Recopilar al menos 100 datos más de laboratorio Triaxiales de gran escala.
- Comparar y contrastar de comportamiento de distintas granulometrías para distintos tipos de materiales.
- Realizar recomendaciones sobre estabilidad de botaderos para casos recolectados.

1.3 Hipótesis

- La curva de Leps (1970), ampliamente utilizada en obras Civiles y Mineras, fue construida a partir de información ensayada para recrear las condiciones de presas, por esto se espera una sobre-estimación de la resistencia de enrocados depositados por volteo. Luego nuestra curva planteada debiese entregar valores de cizalle menores a los actualmente reflejados por Leps para los mismos esfuerzos normales.

1.4 Alcances

- Dado que muchos de los motivos de colapso de un botadero escapan al análisis del material, los alcances de este trabajo buscaran recrear solo condiciones en que material del botadero sea el único culpable de la falla o no falla del mismo, ya sea por su construcción, o por su elevación.

1.5 Entregable

- Ajuste matemático en el espacio de esfuerzos principales que permita caracterizar geotécnicamente materiales de enrocado.

2 Antecedentes

2.1 Antecedentes Generales

2.1 Revisión de la resistencia al cizallamiento de enrocado

Leps (1970) propone un modelo de resistencia para materiales de relleno. El estudio abarca el análisis de aproximadamente 100 ensayos triaxiales de consolidado drenado con los que construyó un Abaco, el cual es ampliamente utilizado por la industria para simular la resistencia presente en materiales de relleno. Los datos que, en su gran mayoría, son resultado de ensayos triaxiales de gran escala conducidos en México en los años 60, (Marsal et al., 1965; Marsal et al., 1967). Los parámetros de entrada de dicho Abaco son la presión normal a la cual está sometida el material y el grado de competencia del enrocado.

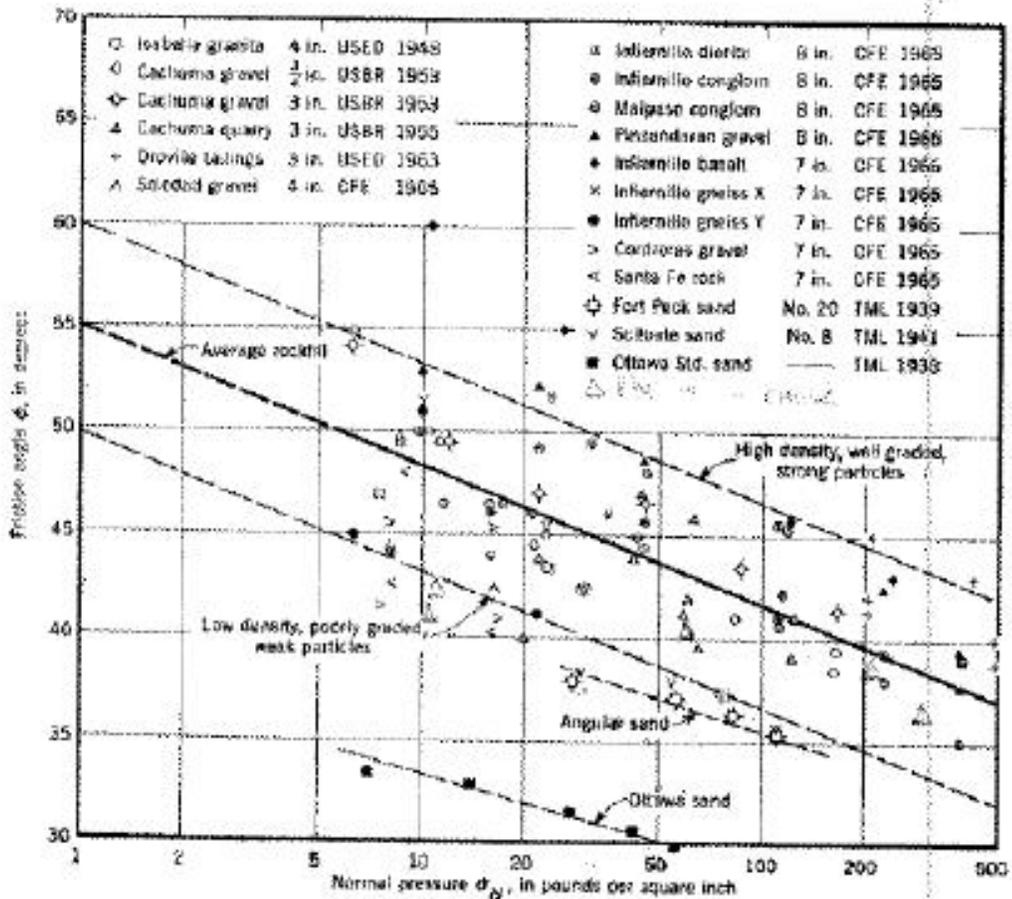


Ilustración 1 – Grafico extraído de Leps

De dicho estudio se concluye que todos los ensayos triaxiales de gran escala realizados en relleno hasta la fecha, indican que la resistencia al cizalle de estos, tal como se expresa por su ángulo de fricción,

varían notablemente en función de la presión normal, siendo altas a bajas presiones y sustancialmente más pequeñas al tener un aumento en las presiones normales.

A presiones normales menores a, aproximadamente, 10 psi, los ángulos de fricción fueron del orden de 45° a 60°, con un promedio de alrededor de 50°. Se concluye también que al realizar una compactación absoluta se espera la obtención de ángulos de hasta 55° en promedio. Por encima de lo asumido, la resistencia friccional del enrocado a bajas presiones de confinamiento es un factor muy importante para la estabilidad.

Sin embargo a pesar de las conclusiones planteadas en dicha Publicación se debe recordar que su aplicabilidad está enfocada en la construcción de presas con material de enrocado, por lo que dichas presas se espera sean compactadas, para así cumplir más satisfactoriamente su desempeño. La utilización de dicha data no es del todo correcta a pesar de su amplio uso en la industria, pues para la realización de ensayos triaxiales gigantes el material fue compactado, esto sumado a la alta resistencia del material se tradujo como la existencia de dilatación en los ensayos y los valores de fricción reflejados en los gráficos corresponden realmente a una fricción residual.

Luego la utilización directa de dicha data sin ponderadores o factores correctivos conlleva a una sobreestimación de las propiedades del material y con ello los resultados de las simulaciones de dicho material serán erróneos.

2.2 Ensayos Triaxiales de gran escala de enrocado de Grauvaca

Indraratna et al. (1993) reutiliza la información recolectada por Leps y agrega nuevos ensayos de su autoría para realizar un nuevo análisis que permite modelar matemáticamente el comportamiento del material Grauvaca. Como resultado fue capaz de delimitar la data recolectada mediante ecuaciones tanto en el espacio Esfuerzo normal vs Cizalle como en el espacio Esfuerzo principal mayor versus Esfuerzo principal menor.

Para realizar un mejor ajuste optaron por normalizar tanto Esfuerzo principal mayor, menor, normal y Cizalle por el Esfuerzo a la compresión uniaxial de cada roca ensayada, el resultado de lo anterior se puede observar en la ilustración 2.

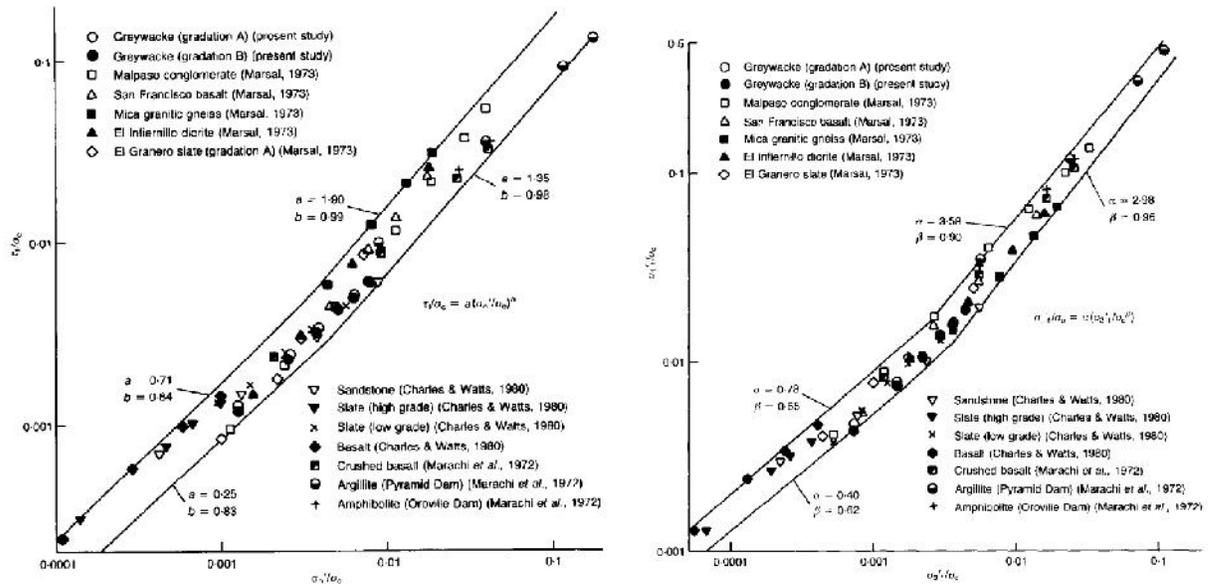


Ilustración 2- Figuras extraída de Indraratna (1993)

Cabe destacar que a pesar de los resultados obtenidos en dicha publicación tan solo se aportan 12 nuevos ensayos correspondientes a ensayos tradicionales sobre material de Grauwaca, y dichos ensayos presentan tamaños de partícula máximo de 25 a 38mm, por lo cual para nuestro estudio a pesar de ser útiles no son suficientes para satisfacer las necesidades modelar una nueva curva capaz de predecir el comportamiento de material de lastre.

2.3 Caracterización Geotécnica de Materiales de Lastre en Botaderos de Gran Altura Mediante Ensayos Triaxiales y Odométricos de Gran Tamaño

Palma, Linero y Apablaza (2009) definen un plan de ensayos que incluye 2 materiales del tipo granodiorita y porfídico. Estudian la granulometría de las muestras originales, ejecutan pruebas índices para la caracterización de los granos que constituían el material, evalúan la resistencia característica de las partículas. Para ensayos triaxiales gigantes (probetas de 2m de altura y 1m de diámetro) evalúan la resistencia al corte, deformidad y el comportamiento en compresión uniaxial (odómetros) como la permeabilidad. Adicionalmente evalúan el fenómeno de rotura de partículas generado por el corte triaxial y por la compresión odométrica. Las envolventes de falla revelan una curvatura, evidenciando que la resistencia al esfuerzo cortante no es función lineal de la presión normal aplicada. Con lo anterior se establece la típica reducción del ángulo de fricción interna con el aumento de la presión confinante.

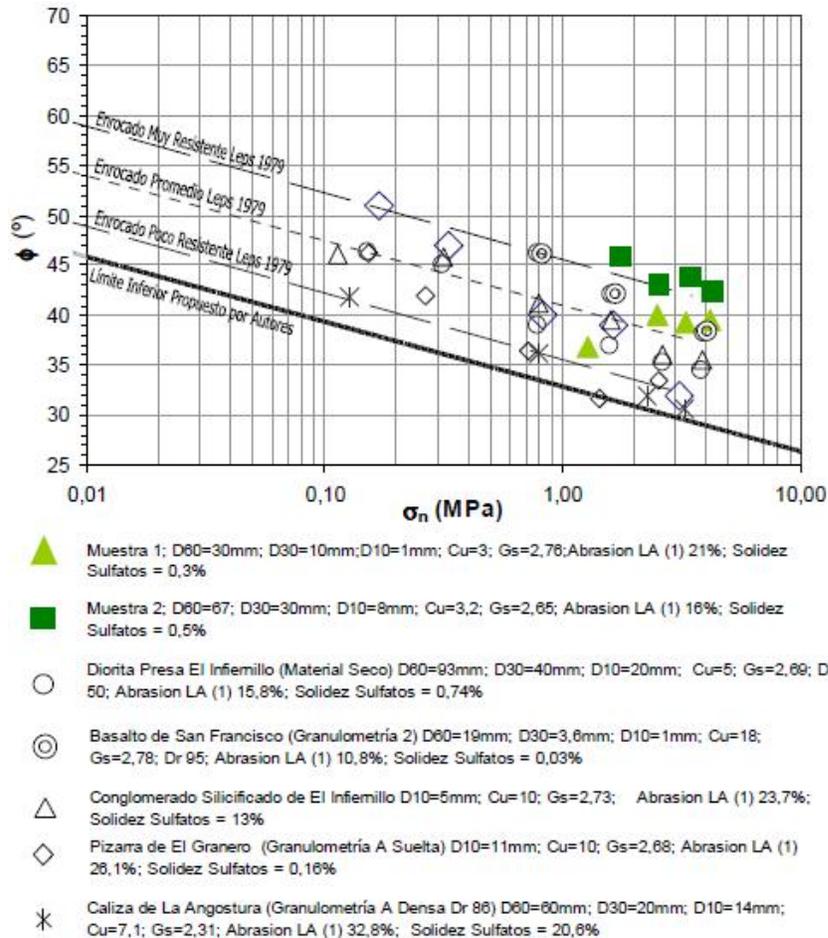


Ilustración 3 -Variación del Ángulo de Fricción Interna con el Esfuerzo Normal y Comparación con Resultados de Otros Materiales de Cantera y Angulares, Palma (2009).

Las tendencias encontradas podrían ser utilizadas para predecir en función de la granulometría del material in situ disminuciones en D10 relativas a las presiones esperadas, y con ello predecir la severidad de los cambios de permeabilidad en forma cualitativa.

Finalmente se concluye que para los materiales estudiados se presentó una moderada a alta resistencia al corte, observándose deformaciones unitarias máximas cercanas a 15% para los ensayos de compresión uniaxial.

2.4 Caracterización geomecánica de suelos granulares gruesos.

Verdugo (2006) busca alternativas para proyectos que no disponen con equipos para ensayar probetas de grandes dimensiones, para ello utiliza la parte menos gruesa del material original y se ensaya como equivalente del suelo original. Para lo anterior se realizaron experimentos en cinco suelos gruesos aplicando técnicas de gradación homotética, reveló así la aplicabilidad y limitaciones de esta metodología. Además, describe la técnica de extracción de probetas inalteradas con dimensiones de 60cm de diámetro y 120cm de alto en suelo gravoso, revelando así los resultados obtenidos de ensayos CID como parámetros de resistencia al corte y coeficiente de empuje horizontal en reposo.

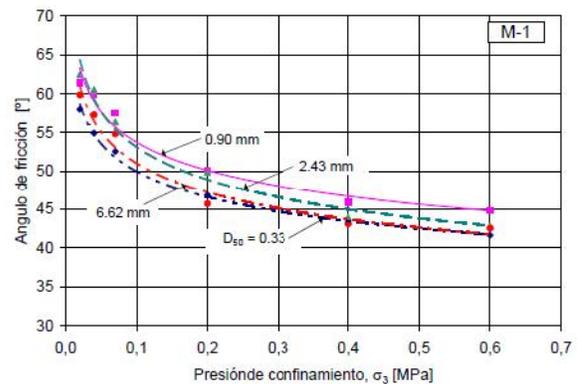
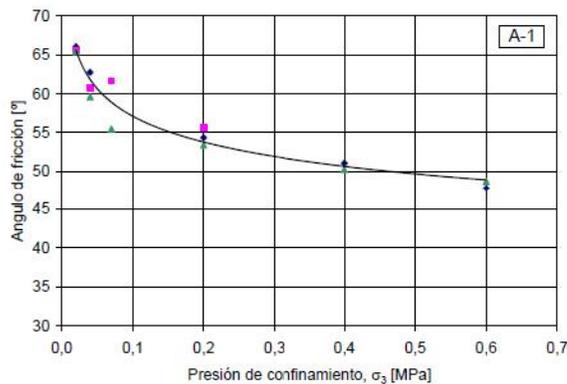
La serie de ensayos triaxiales CID se lleva a cabo a presiones de confinamiento desde los 20 a los 600kPa. Dependiendo del tamaño máximo de partículas utilizan probetas triaxiales de 5, 10 y 15 cm de diámetro,

todas estas con una razón altura/diámetro de 2. A su vez, todos los ensayos se realizan a deformación controlada con una velocidad del 0.1%/min. Se utiliza como criterio de saturación el alcanzar un parámetro B de Skempton superior al 95%.

Las probetas se preparan por el método de compactación húmeda, para lo que se utiliza agua destilada en una proporción del 5% del peso seco. Algunas de las muestras son compactadas a una densidad relativa del 80%, mientras que otras al 70%.

Se observa que en general el ángulo de fricción máxima es satisfactoriamente estimado por las muestras que presentaban granulometría paralela. Mientras que aquellas que no presentaban paralelismo presentan discrepancias que son ser atribuidas al no perfecto paralelismo de la granulometría, o bien a las diferencias en la forma de las partículas de acuerdo al tamaño de estas.

Es posible notar que para presiones menores a 0.3MPa las muestras construidas por partículas angulosas movilizan ángulos de fricción mayores a aquellas de partículas más redondeadas. Este hecho no pudo ser atribuido a la diferencia de densidades relativa como un único motivo.



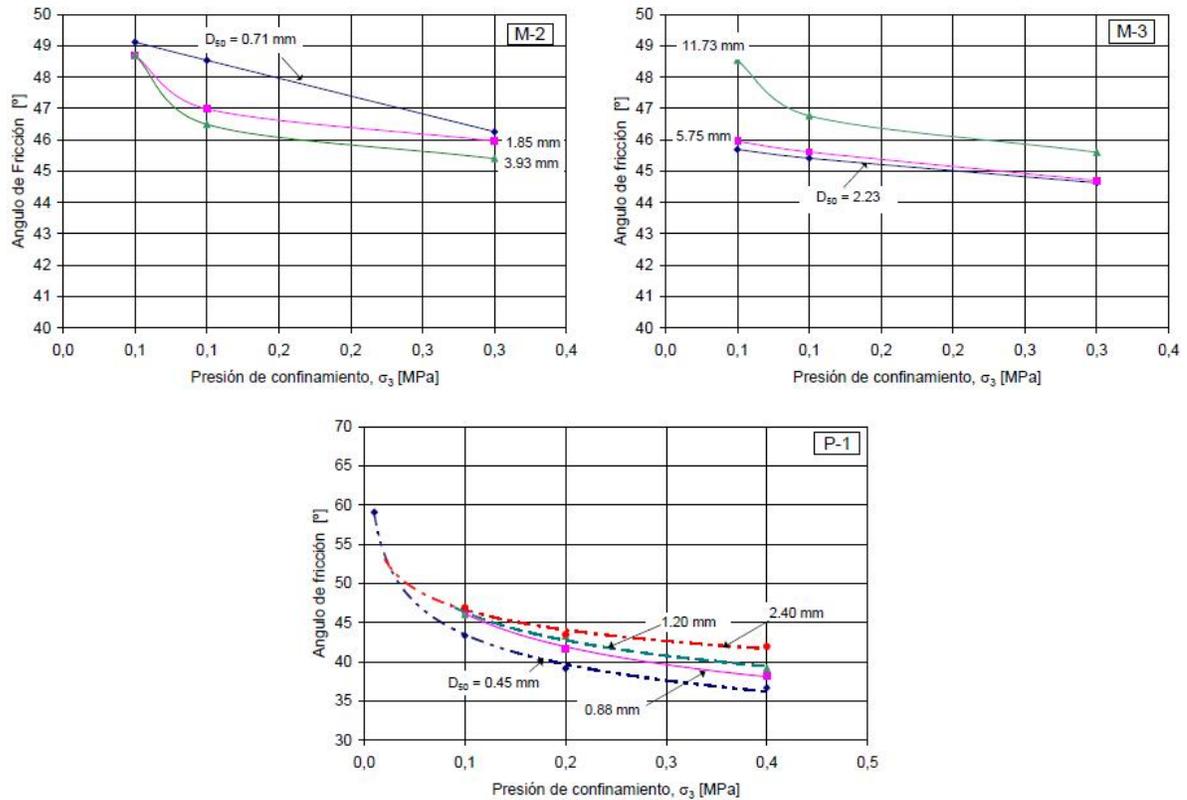


Ilustración 4 - Ángulo de fricción máximo, Verdugo(2009)

De lo anterior es posible concluir que para el caso de proyectos que involucran suelos gruesos en su estado natural, es fuertemente recomendado el uso de equipos triaxiales de gran escala con probetas inalteradas de gran tamaño, dado que este tipo de ensayos permite evaluar la resistencia, rigidez, resistencia post peak y calibrar modelos constitutivos.

Por otro lado, cuando se trabaja con material grueso colocado y compactado, es posible evaluar los parámetros geomecánicos a través de ensayos de muestras de gradación homotética al suelo grueso. De los resultados experimentales se desprende que el método de granulometría paralela entrega resultados razonables para la evaluación de la respuesta geomecánica de material grueso. Sin embargo, se debe recalcar que existen notables limitaciones en caso de que la granulometría paralela no pueda ser realizada satisfactoriamente, debido a restricciones en el contenido de finos, o cuando la forma de las partículas varía con el tamaño de éstas.

3 Metodología

Para el modelamiento de una nueva y más completa curva de predicción del comportamiento del material lastre se realizaron varias etapas.

Primero que todo fue necesaria la recolección de datos, investigar de las diferentes fuentes de información útil y recolección de la mayor cantidad de datos posible. Se homologó la información, pues dada la diferente fuente de la información fue necesario traspasar todos los datos a un mismo tipo de lenguaje, ya sea en unidades de medida como en espacio de análisis. Se prosiguió con un análisis granulométrico, con este se concluyó que en lugar de separar los datos por procedencia o tipo de material, dada la heterogeneidad típica presente en los botaderos ya construidos era más simple analizar las tendencias reflejadas por las curvas granulométricas.

Una vez definidos los distintos escenarios y separada la data, se buscó representar los datos como una ecuación matemática en el espacio de esfuerzos principales. Primeramente se realizaron ajustes lineales para corroborar o descartar el comportamiento no lineal planteado por la literatura. Luego se prosiguió con la búsqueda de curvas de tendencia que ajustaras en el comportamiento de los distintos casos analizados. Se usaron distintos criterios para simplificar y mejorar lo mejor posible el ajuste seleccionado, para así asegurar la aplicabilidad de este a la realidad.

Finalmente mediante softwares especializados facilitados por la empresa Piteau Associates Chile, se recrearon las condiciones naturales a las que están sometidos botaderos existentes en la realidad y se buscó validar o descartar los ajustes sugeridos en función de si eran estos capaces de recrear la realidad mediante un contraste con la data histórica de dichos botaderos.

1-

3.1 Recolección de datos

Para el desarrollo de esta memoria fue necesario llevar a cabo un trabajo de investigación referente a los tipos de ensayos que aportarían información útil a la estimación de propiedades del material lastre.

Para esto se recolectó información de diferentes fuentes, partiendo desde la información recopilada por Leps(1970), la cual es ampliamente utilizada por el área de la ingeniería de minas e ingeniería civil a la hora de modelar material no confinado. Buscando en la fuente de dicha información se dio con las publicaciones de Marshal (1965 y 1967) y Holtz & Gibbs (1956).

Esta información fue recolectada por Leps con el fin de simular las condiciones a las que estaría sometida una presa de enrocado y por ende a la hora de realizar los ensayos triaxiales gigantes el material fue compactado, esto sumando a la alta densidad del material utilizado se tradujo como dilatación en los ensayos, y es por ende que la fricción reflejada en sus gráficos correspondería a los ángulos de fricción peak, lo que conlleva a la sobreestimación de las propiedades de un enrocado modelado con dicha data si este será enrocado de botadero, ya que dicho material se encontrara en la realidad en estado suelto, siendo depositado solo por volteo de camiones y la única compactación en dicho material sería generada por el peso del mismo material y la circulación de camiones sobre este a la hora de depositarlo.

Sin embargo, a pesar de lo mencionado anteriormente, esta data es ampliamente utilizada aun en la actualidad a la hora de modelar material de enrocado y es por esto que su recolección fue el punto de partida de este trabajo y sirvió contrastarla con la data generada en la actualidad.

Siguiendo con esta línea de investigación se encontró información publicada por Marachi(1972) Marsal(1973), Charles y Watts(1980) e Indraratna(1993).

Por medio de contactos en el mundo minero fue posible acceder también a información más reciente, entre ella la data publicada en el VI Congreso Chileno de Geotecnia (2007) perteneciente a ensayos triaxiales gigantes realizados para Andina y los Bronces, e información publicada por Palma, Linderos y Apablaza perteneciente a Andina. Por último se incluyeron 5 ensayos triaxiales Gigantes realizados por Antamina.

Para finalizar con la recolección de datos se agregó la base de datos privada recolectada por Piteau Associates recolectada en Canadá.

Así se pudo recolectar un total de 260 datos, de los cuales solo 87 correspondieron a los originales utilizados por Leps en su publicación. Su fuente y origen puede observarse en la tabla 1.

Fuente	Numero de Datos	Leps 87 datos*	Indraratna 99 datos (σ_n vs ϕ)	Indraratna - 60 datos* (σ_1 vs σ_3)
CFE 1965, Leps	7	X	X	
Usbr 1953, Leps	27	X	X	
Used 1948, Leps	2	X	X	
(Marsal , 1967)	4	X	X	
(Marsal, 1973)	56	X	X	X
(Indraratna, 1993)	12		X	X
(Marachi, 1972)	36			X
(Charles & Watts, 1980)	17			X
Piteau data base	64			
Andina,	16			
Andina2,	8			
Los Bronces,	6			
Antamina	5			

Tabla 1 – Información recolectada según fuentes

3.1.1 Homologación de la información

Dado que la información proviene de diferentes fuentes, tuvo que ser tratada individualmente para expresar los datos en el mismo tipo de información. En algunos casos la información se obtuvo como esfuerzos principales mayor y menor (σ_1 vs σ_3) en Megapascales (MPa), en otros provino en Kilogramo fuerza por centímetro cuadrado (Kgf/cm²), en otros la información estaba desplegada como esfuerzo normal versus fricción (σ_n vs ϕ) y aquella información extraída de reportes de Idiem figuraba como p vs q, siendo “p” la semisuma de los esfuerzos principales mayor y menor, mientras que “q” representa la semiresta los esfuerzos principales mayor y menor.

Se optó por generar una base de datos que incluyera la información en cada una de las nomenclaturas anteriormente mencionadas, existiendo entonces una versión de todos los datos en la forma de los esfuerzos principales mayor y menor en Megapascales, otra con la información en forma de esfuerzo normal versus fricción en Kilopascales y una última, en forma de la semisuma y semiresta de los esfuerzos principales mayor y menor en Kilogramo fuerza por centímetro cuadrado.

Se procedió de esta manera para poder hacer un contraste gráfico de qué espacio era más apropiado de utilizar y dónde se observaban tendencias más claras. La superposición de los datos, en un espacio de esfuerzos principales, puede observarse en la ilustración 5. A su vez, es posible observar los mismos datos en el espacio de esfuerzo versus cizalle en la ilustración 6.

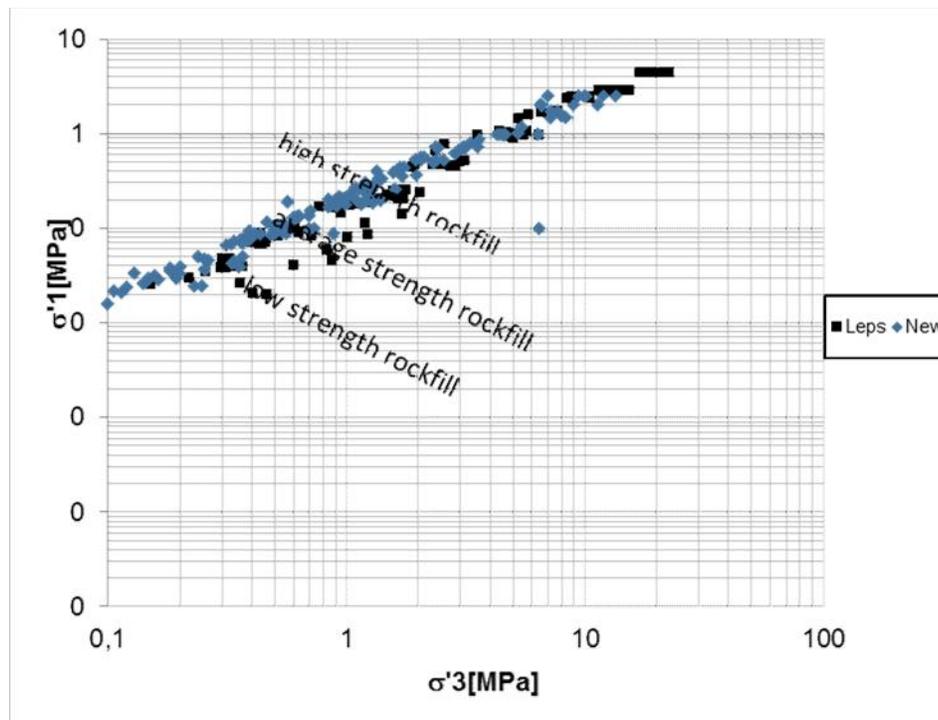


Ilustración 5 – Despliegue de datos en espacio σ_1 vs σ_3

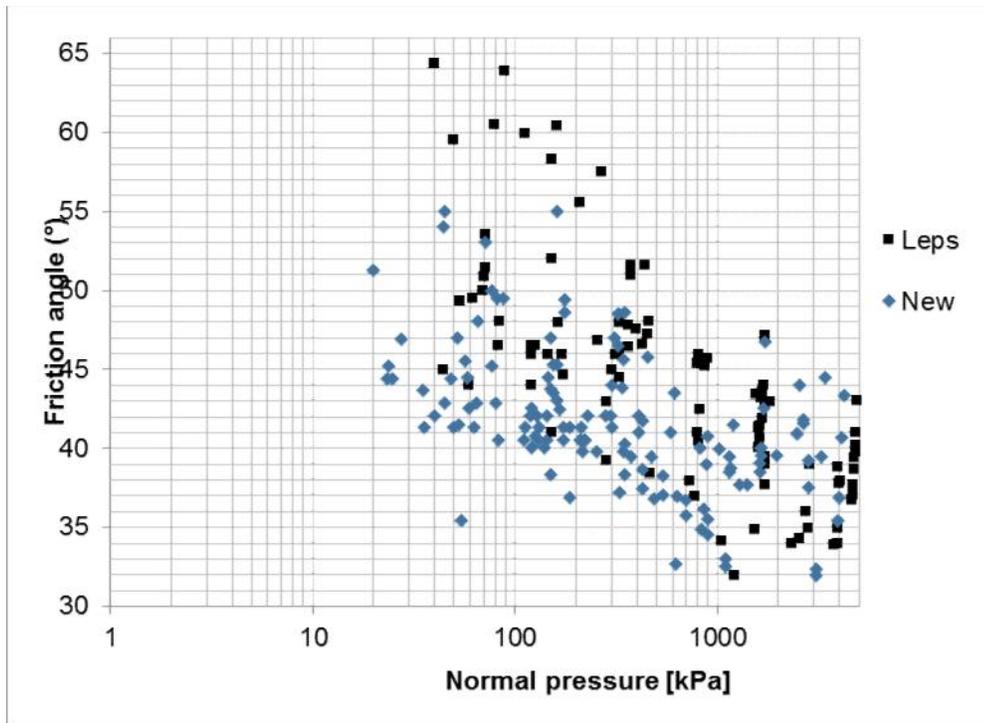


Ilustración 6 - Despliegue de datos en espacio w vs τ

3.1.2 Análisis granulométrico

La información recolectada además de contar con los esfuerzos aplicados en el ensayo, también cuenta con descripciones del tipo de material que se ensayó, como son alteración, mineralización, densidad aparente y las curvas granulométricas del mismo.

Si bien se reconoce que una simulación debiera hacer distinciones entre los distintos tipos de materiales ensayados, ya sea porque esto influirá directamente en su comportamiento, a la hora de ser ensayados, lo cierto es que la industria minera al ser estos materiales de nulo valor económico, no realiza distinción de estos a la hora de depositarlos, por lo que los botaderos suelen estar compuestos por mezclas de materiales de distintos orígenes.

Dado que lo que se busca es ser capaces de reproducir el comportamiento de este material y la aplicación directa de esto en simulaciones, se hace poco aplicable una distinción por tipo de material ya que con ellos solo aplicaría para aquellos botaderos donde se conoce la secuencia de deposición de material.

Es por ello que se optó por trabajar con una distinción del material en función de sus curvas granulométricas, ya que el tamaño de partículas estaría indirectamente relacionando materiales con comportamiento de quiebre similares.

La data recolectada abarcó tamaños de partícula desde los 11.43 mm hasta los 200 mm como tamaño máximo de partícula. En su mayoría el porcentaje de finos fue de un 0%, mientras que el porcentaje de arena no sobrepaso el 25%.

La información tuvo que ser cuidadosamente recolectada ,para recuperar los tamaños de partícula de las mismas, buscándose reproducir lo más fielmente posible, y no solo por medio de sus puntos de interés, como suelen ser los tamaños bajo el 10%, 30% 60% y 100% del total del material.

Una vez reproducidas las curvas granulométricas, fueron desplegadas todas juntas, para así analizarlas como conjuntos, determinar formas similares y tendencias.

De un total de 260 datos separados en 61 tipos de materiales de distintos orígenes fue posible replicar en totalidad la curva granulométrica de 39 tipos de material, también se contó con el tamaño máximo de 22 materiales, por lo que estos últimos al no disponer de información granulométrica más allá de su tamaño máximo, fueron analizados como si se tratasen del material mayor similitud.

Una vez separada y ordenada las diferentes granulometrías de todos los datos utilizables, se procedió a contrastar las curvas granulométricas, observándose las diferentes tendencias. De dichas curvas fue posible separar la información en 2 grandes casos:

- Se separó principalmente en función del tamaño máximo de partícula (d_{max}) reconociéndose una tendencia diferente para aquellos datos con granulometrías menores a 80mm, 152mm, 175mm y aquellos menores a 200mm se pudo separar en 2 clases diferentes en función del 60% de los datos (d_{60}), diferenciándose el caso con d_{60} menores a 50,4mm y aquellos con d_{60} mayor a esto. Todas las clases fueron excluyentes las unas con las otras, es decir el subgrupo con d_{max} menor a 175 no incluía datos menores a 152, solo desde 153mm hasta 175mm. Esto se puede observar en la ilustración 7.

- Se separó en 3 clases, tomando en consideración solo el d_{max} , siendo estas d_{max} menor a 20mm, d_{max} menor a 80mm y d_{max} mayor a 80mm. Esto se puede observar en la ilustración 8.

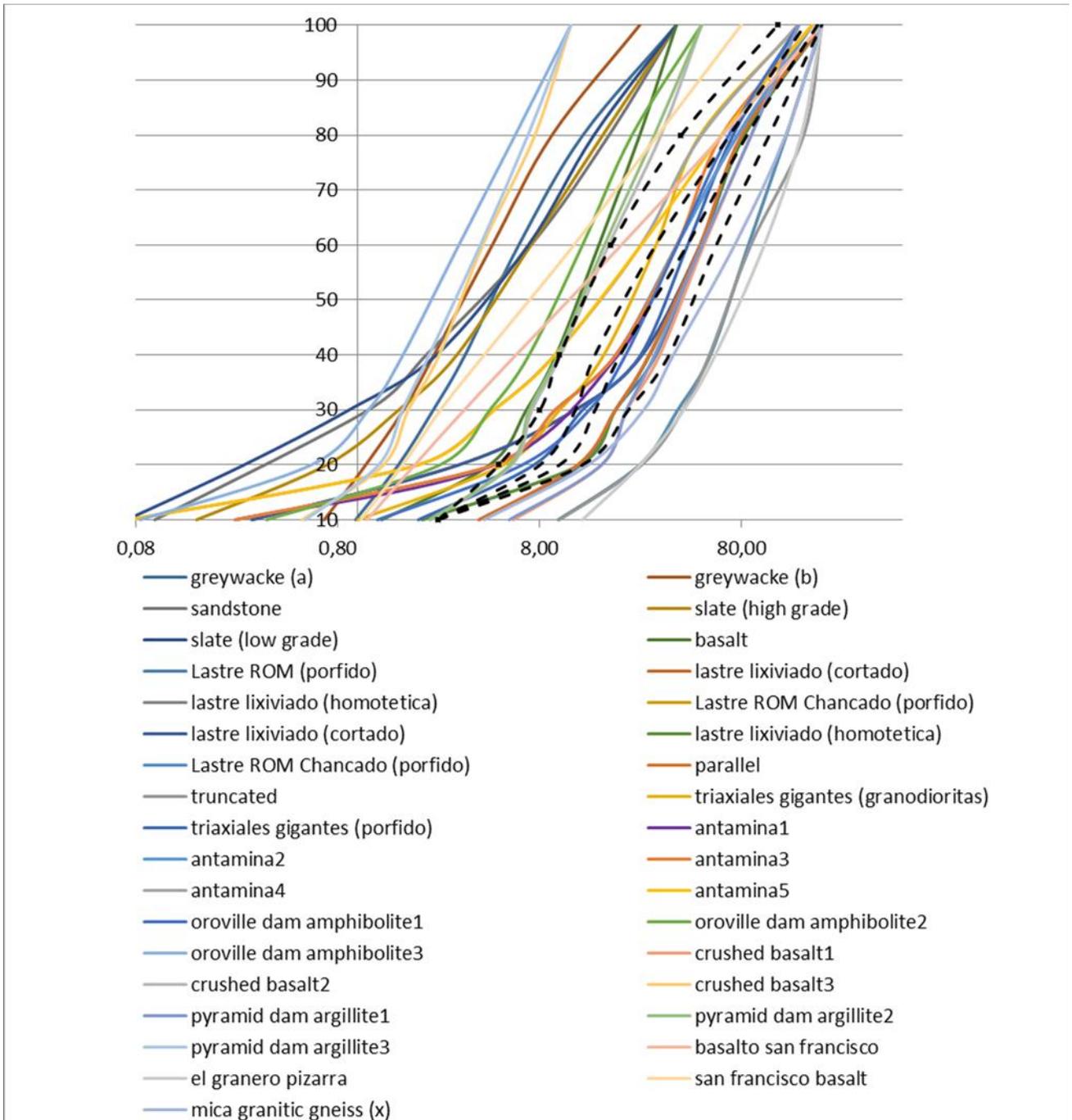


Ilustración 7 – Separación de granulometrías Caso 1

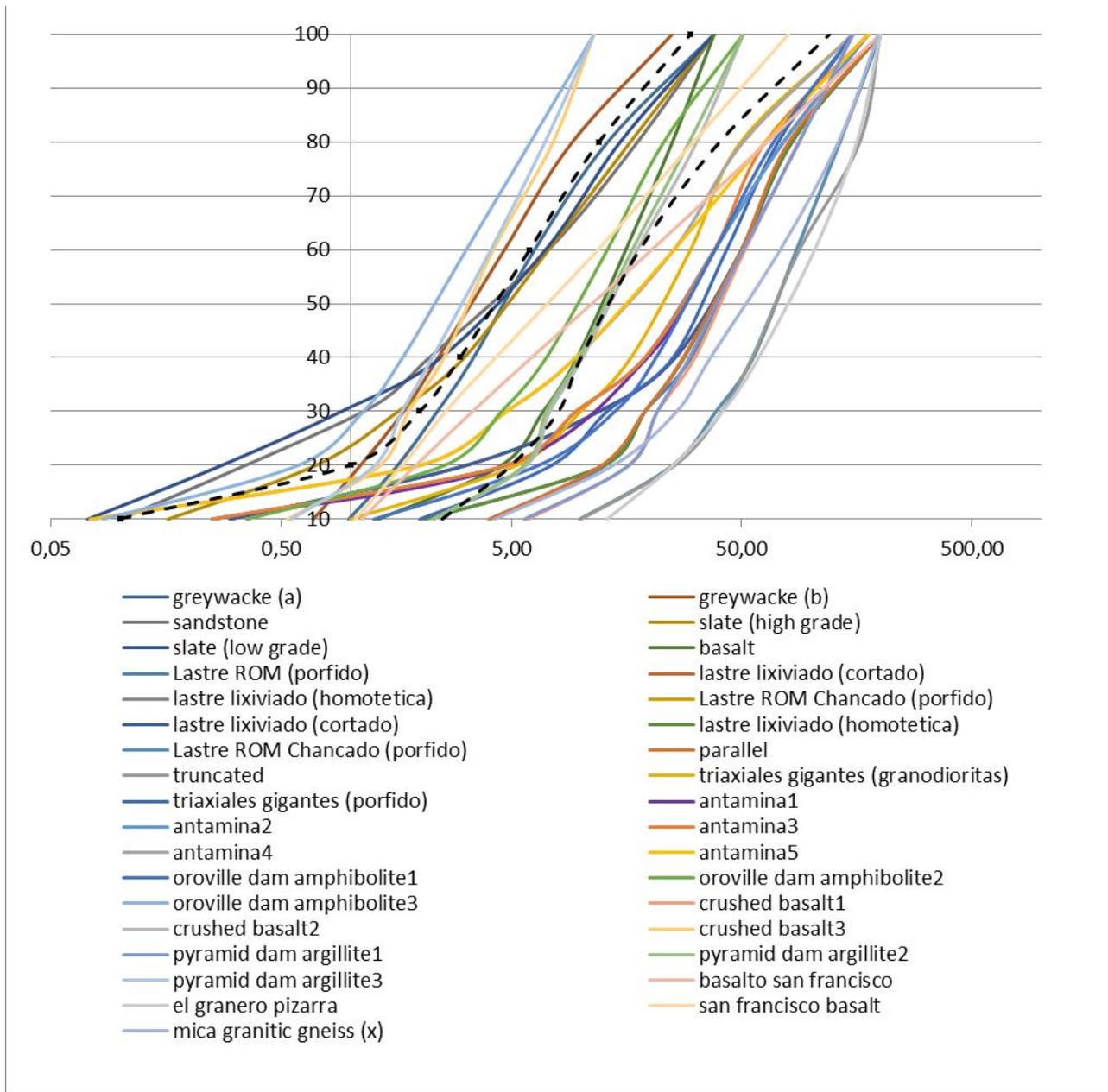


Ilustración 8 – Separación de granulometrías Caso 2

Para separar en estos 2 escenarios se desplegaron los datos en una gráfica normal, para el primer caso, y en una logarítmica, para el segundo caso, y es por esto que el segundo caso se asume todo el material más grueso como un grupo unificado, sin discriminar por su comportamiento a los tamaños bajo el 60%, dado que en una gráfica logarítmica el comportamiento de la mayoría de las curvas es similar.

También cabe destacar que en el Caso 2 la separación de los datos bajo 20 mm como tamaño máximo del resto de la data se debió principalmente a que este tamaño esta mayormente asociado a materiales de suelo y en primera instancia se asumió que su información no sería del todo útil ya que el tamaño de partículas en botadero muchas veces supera el orden métrico.

3.1.3 Información reciente vs información histórica

Con la información recolectada desplegada en una gráfica de Esfuerzo Normal versus Fricción (σ_n vs ϕ) fue posible reproducir las curvas o bandas propuestas por Leps, las cuales debían contener toda la información recolectada, sin embargo reproduciendo dichas bandas es posible notar que buena parte de la información está por debajo de estas, lo cual según sus bandas se traduciría como una recolección de material de botadero compuesta únicamente por materiales de baja resistencia, aún que los datos muestran que no fue así, motivo por el cual se corrobora la hipótesis que mucha de esta información no es representativa por haber sido ensayada buscando recrear condiciones de material que no se condicen con el material de botadero, además cabe destacar que es posible que dichas curvas estén obsoletas al haber sido realizadas tomando en consideración información muy antigua, en épocas en las que no existían equipos competentes para la toma de este tipo de datos en esta clase de material. Un contraste de la información recolectada se puede observar en la ilustración 9, a su vez es posible observar las zonas de baja, mediana y alta resistencia propuestas por Leps(1970).

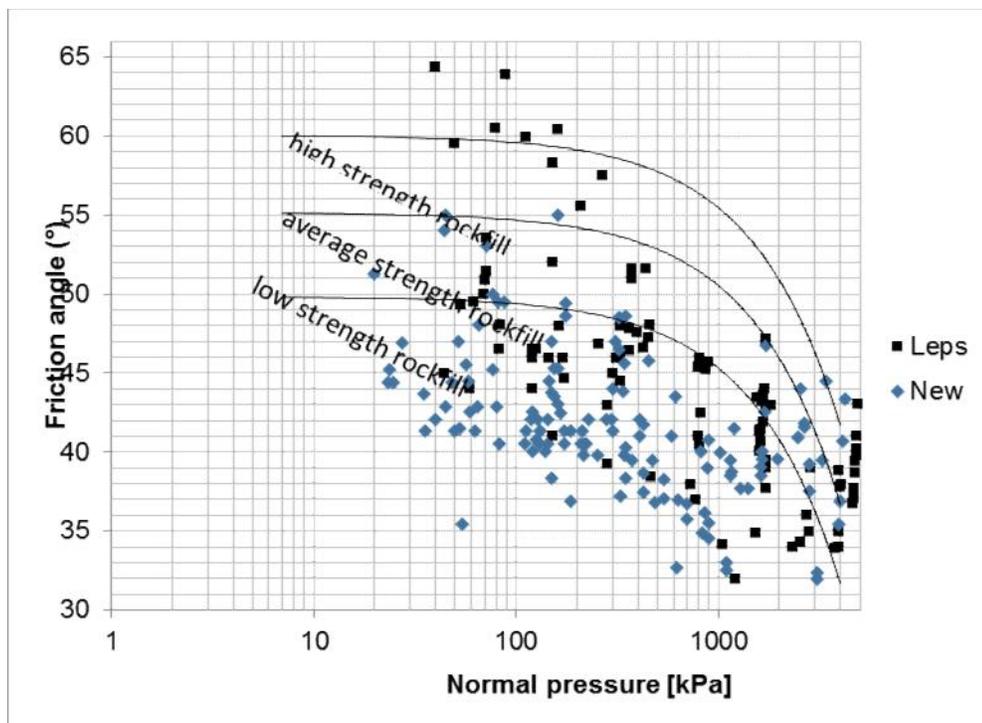


Ilustración 9- información sobre bandas de Leps (1970)

Posterior al descarte de las bandas de Leps se contrastó la información con la curva de Leps-Fair, generada por Piteau utilizando datos privados de la empresa, los cuales se pudieron representar como una curva de tendencia muy clara, sin embargo buena parte de los nuevos datos a pesar de tener un comportamiento similar podía observarse que estaban por encima de estos por lo que un nuevo análisis se hizo necesario, descartando la curva ajustada por la empresa.

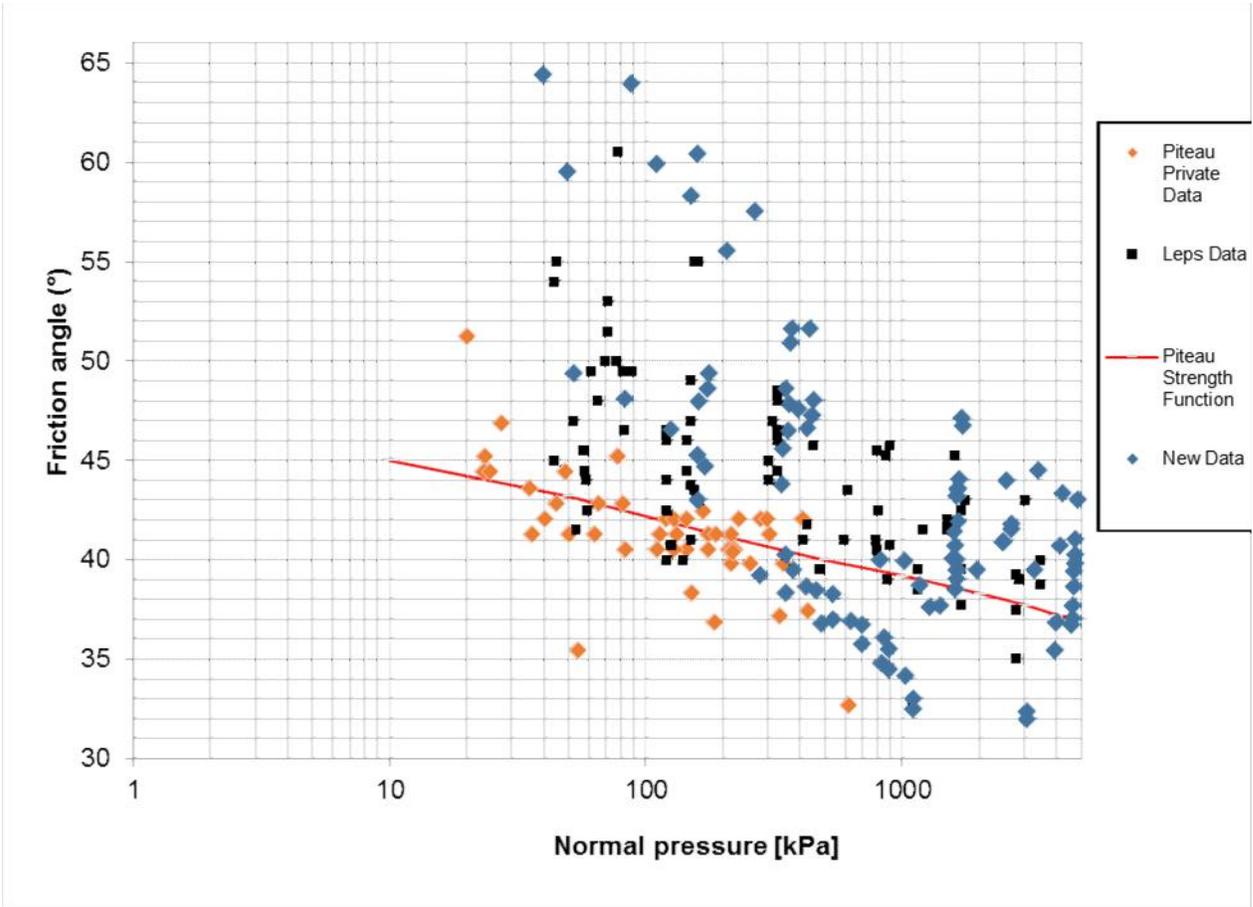


Ilustración 10 – Contraste Datos Privados de Piteau, recolectados por Leps(1970) y para la Memoria

3.2 Ajustes Matemáticos

Con el fin de simular el comportamiento del material de botadero mediante software especializado se hizo necesario un ajuste matemático capaz de encajar satisfactoriamente con los datos recolectados a la fecha, para dicho ajuste se buscó modelar el comportamiento de los datos tanto con ajustes lineales, como con ajustes no lineales.

3.2.1 Línea de tendencias

En primera instancia se ajustaron rectas de manera automática sobre las diferentes series de datos tanto para el Caso 1 como el Caso 2.

Sin embargo aquí es posible señalar que en los datos del Caso 2 con $d_{max} > 80$ (que corresponde a la mayoría de los datos del análisis) se aprecia un comportamiento ligeramente curvo. De igual manera este comportamiento ligeramente curvo parece ser reflejado también en los datos del Caso 1 con $152 < d_{max} < 175$ como en $d_{max} < 200$; $d_{60} < 50$. Los datos y sus respectivas rectas de ajuste se pueden observar en la ilustración 11 para el Caso 1 y en la ilustración 12 para el caso 2.

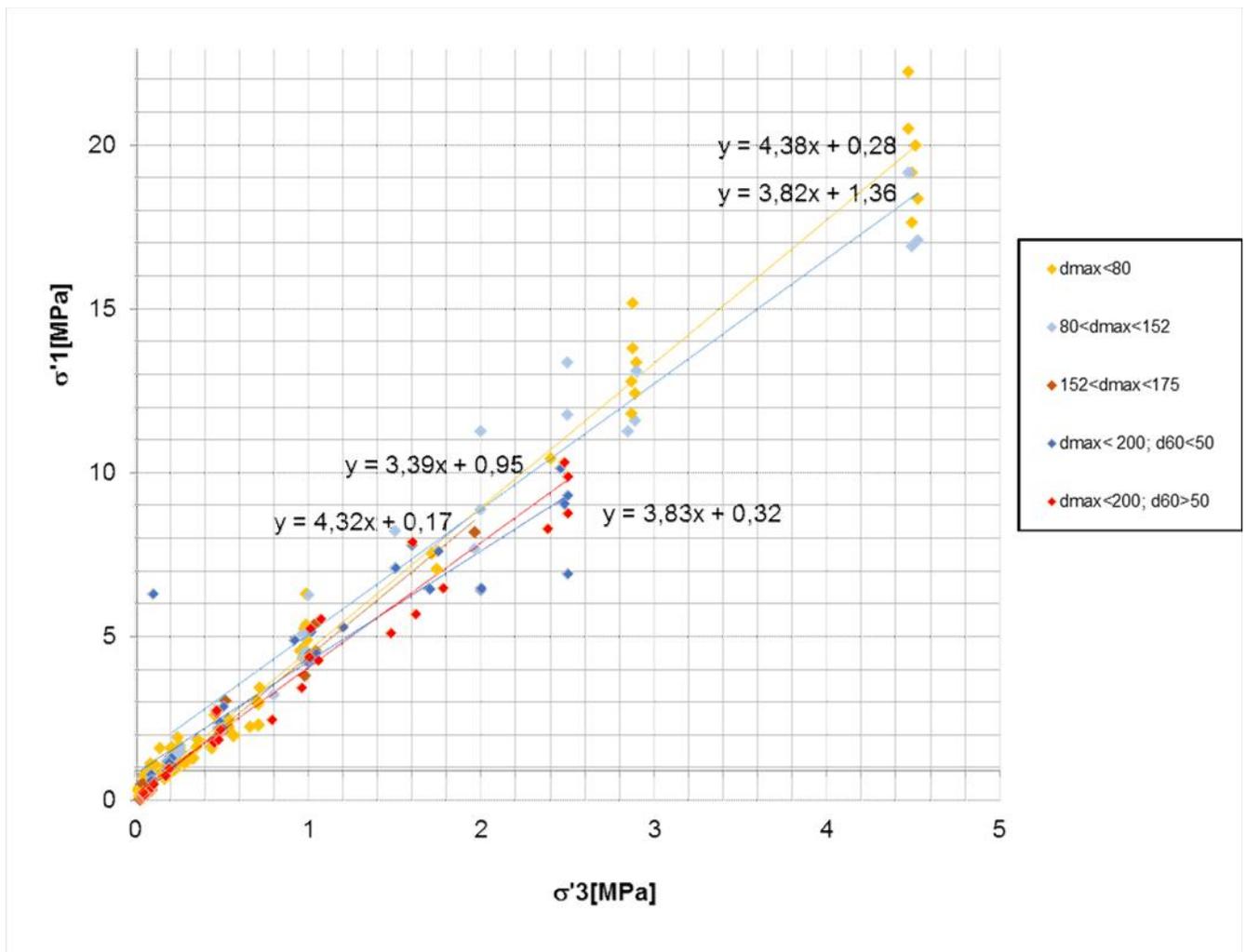


Ilustración 11 – Líneas de Tendencia Caso 1

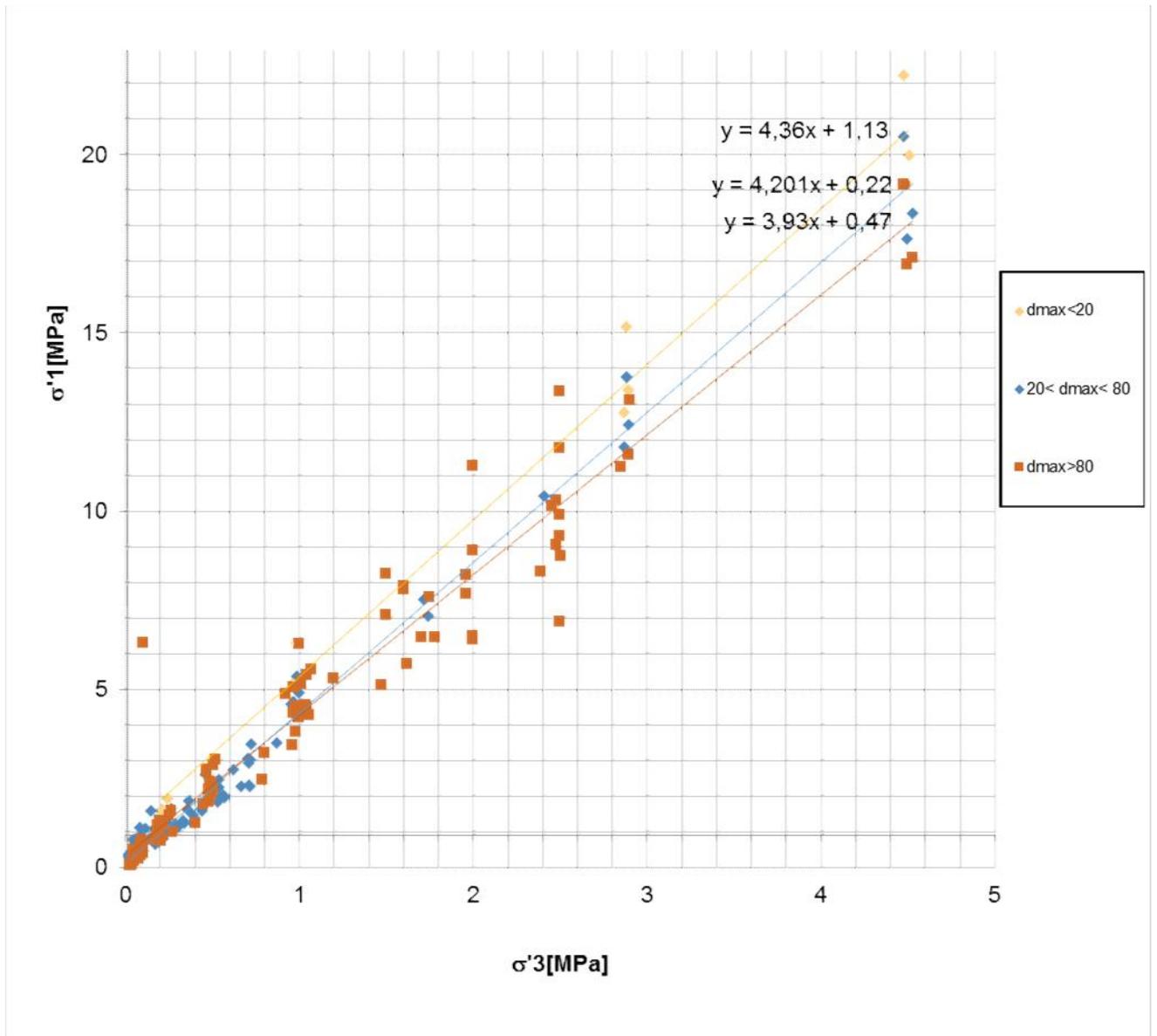


Ilustración 12 – Líneas de Tendencia Caso 2

Cabe destacar que dado que ambos Casos fueron generados usando la misma data pero con distintos criterios de separación, los datos de los Casos 1 con $152 < d_{max} < 175$ y $d_{max} < 200$; $d_{60} < 50$ están contenidos en los datos del Caso 2 con $d_{max} > 80$.

Para corroborar entonces sí conviene estimar el comportamiento de los datos por medio de curvas, en lugar de rectas, se realiza un zoom en los datos del Caso 2, con esto centrando la atención en esfuerzos principales mayores y menores de menor magnitud, cortando en 2,5 MPa. Por limpieza se dejaron fuera los datos correspondientes a $d_{max} < 20$. Dicho zoom puede observarse en la ilustración 13.

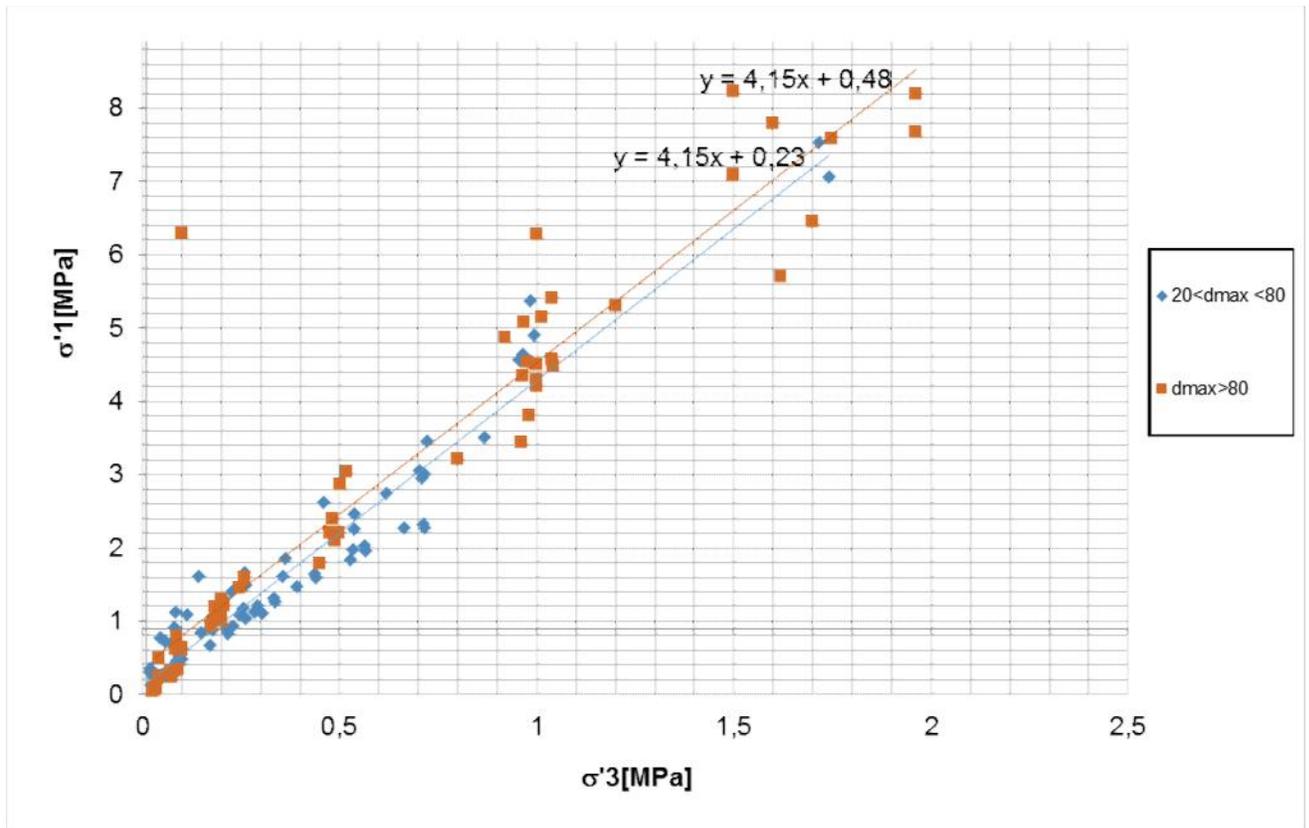


Ilustración 13 – Zoom en Caso2

De esta manera es posible apreciar de mejor forma el comportamiento curvo de los datos, y, a su vez, un aumento del error estadístico entre los datos a medida que incrementamos en el esfuerzo principal menor (σ_3), a este fenómeno se le conoce como heteroscedasticidad y para corregirlo, a la hora de calcular las curvas, se utilizara un Software de análisis de datos TableCurve 2D de Systat Software.

También es importante destacar que el ajuste lineal dio como resultado curvas con intercepto que en algunos casos están muy lejos de 0 (Caso 1 con $80 < d_{max} < 152$, $d_{max} < 200$; $d_{60} < 50$, $d_{max} < 200$; $d_{60} > 50$ y Caso 2 con $d_{max} < 20$). Un intercepto mayor a 0 se traduce físicamente como la existencia de fuerzas de tracción teóricas para condiciones de bajo confinamiento, lo cual carece de sentido físico, por lo que un buen criterio de selección de la curva de ajuste sería un intercepto igual a 0, además de un factor de ajuste cercano a 1.

3.2.2 Curvas de tendencia

Utilizando el software TableCurve, mediante el ingreso de nuestra base de datos, fue posible encontrar distintos ajustes matemáticos. Los datos se ingresaron separando la base de datos en función de los 2 casos discutidos anteriormente, haciendo factible o permitiendo de esta manera el análisis de las tendencias para diferentes agrupaciones de granulometrías.

Para la selección de las curvas, se tomó en consideración la forma de ésta, buscando ajustes que presentaran un crecimiento asintótico, ya que este es el comportamiento típico de la evolución de los esfuerzos dentro de curvas de suelos, y al tratarse de material no consolidado, podemos esperar que tenga un comportamiento similar. A su vez, solo se seleccionaron curvas con factores de ajustes por sobre el 0.9. Para ello fue necesario filtrar la información buscando eliminar los outliers, que en este caso solo correspondió a un único dato, perteneciente a la data de Los Bronces.

Desplegando los distintos datos y sus curvas es posible observar que en la mayoría de los casos las mejores curvas de ajustes corresponden a las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1 – Estimación mediante potencias

$$y = ax^b$$

Ecuación 2 – Estimación mediante Logaritmos

$$\ln y = a + \ln x$$

Ecuación 3 - Estimación mediante raíces cuadradas

$$y^{0.5} = a + bx^{0.5}$$

Ecuación 4 - Estimación mediante polinomio con potencias

$$y = a + be^{cx}$$

Ecuación 5 – Estimación mediante inversos multiplicativos

$$y^{-1} = a + b/x$$

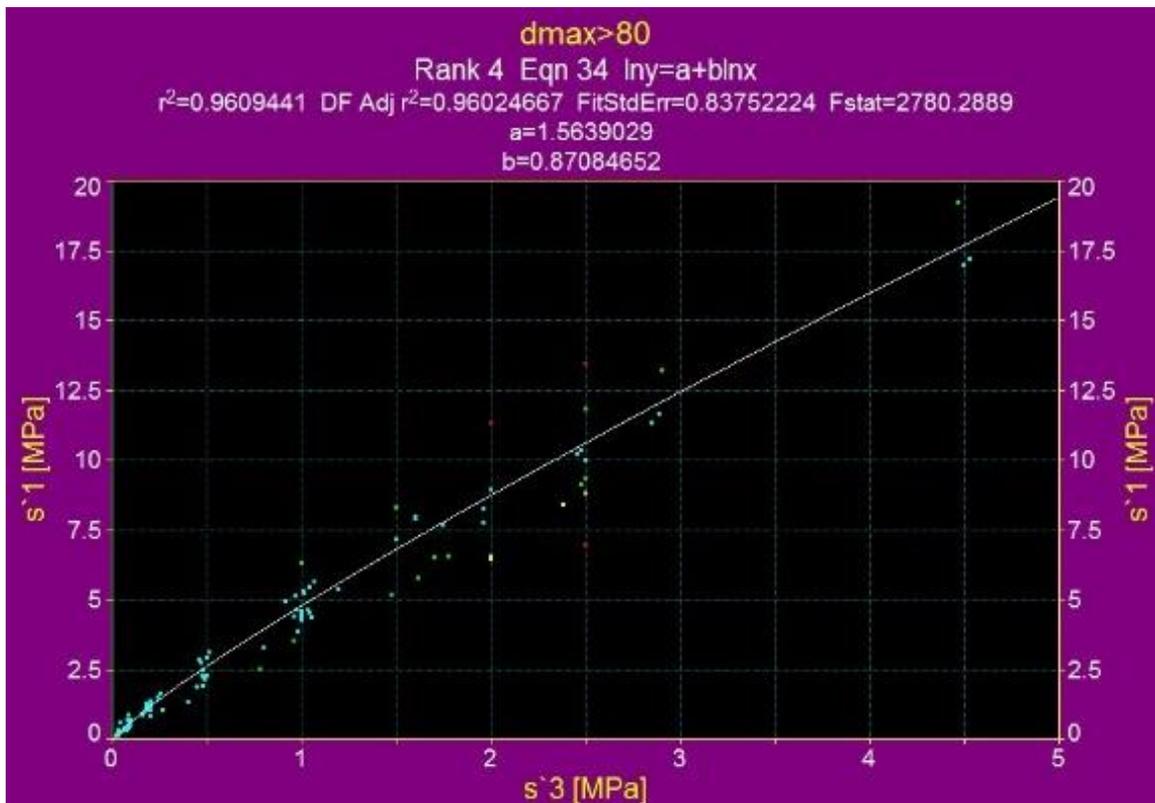


Ilustración 14 - Ejemplos de ecuación 2 en espacio $\uparrow 1$ vs $\uparrow 3$ para Caso 2 con $d_{max} > 80mm$



Ilustración 15 - Ejemplos de ecuación 3 en espacio $\uparrow 1$ vs $\uparrow 3$ para Caso 2 con $d_{max} > 80mm$

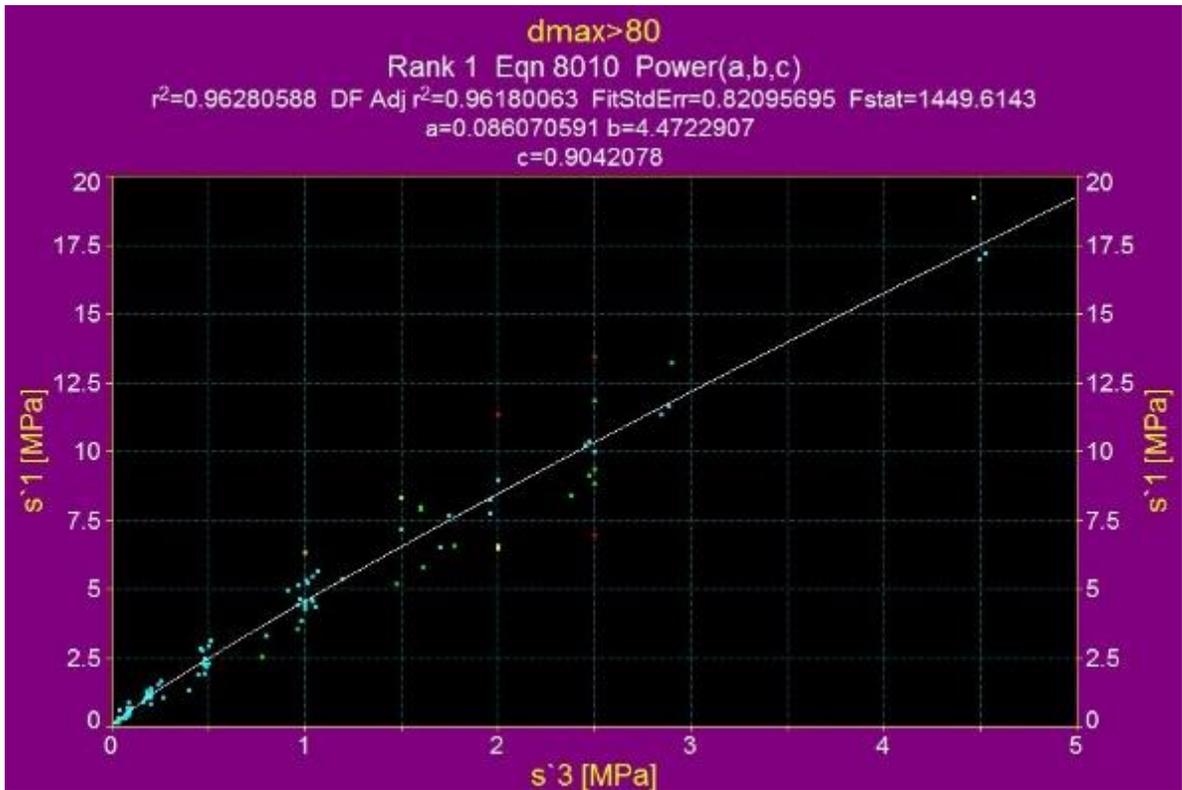


Ilustración 16 - Ejemplos ecuación 4 en espacio τ_1 vs τ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$

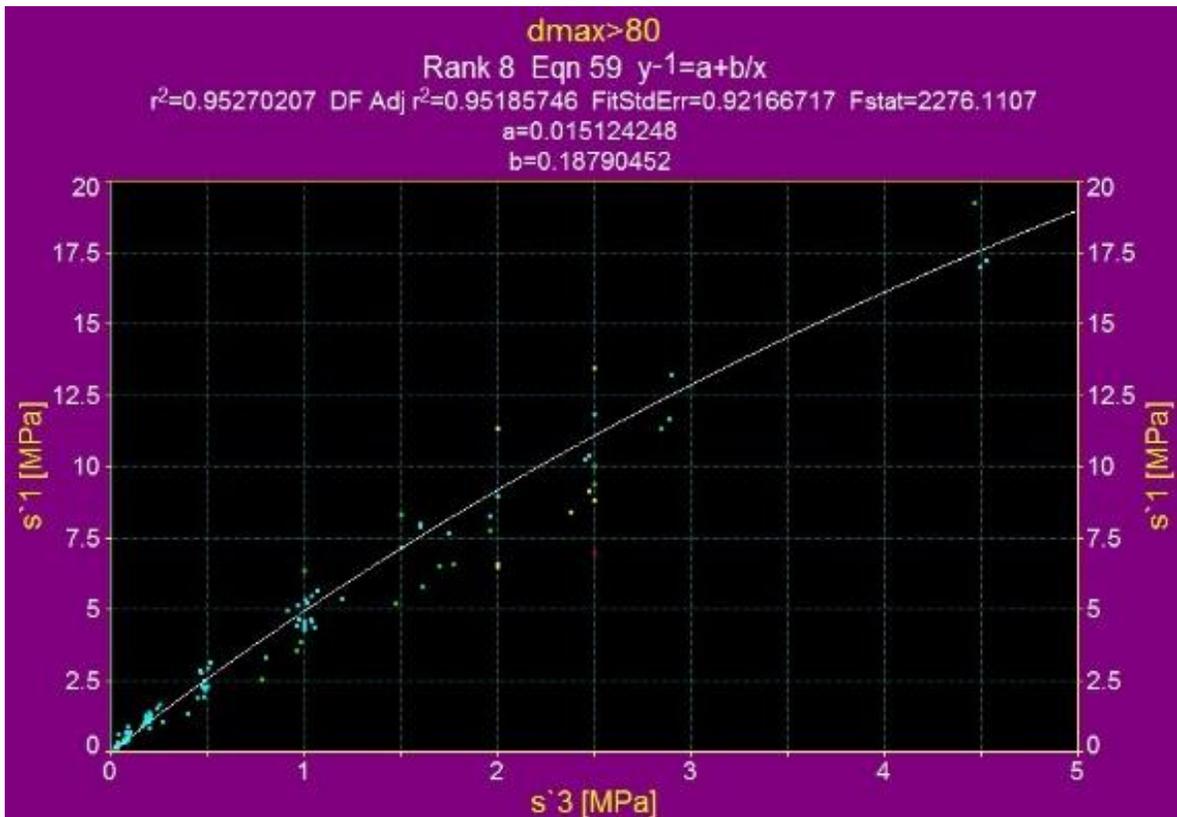


Ilustración 17 - Ejemplos ecuación 5 en espacio τ_1 vs τ_3 para Caso 2 con $d_{max}>80mm$

En los gráficos anteriores el eje de las ordenadas (y) representa el Esfuerzo principal mayor (σ_1) mientras que el eje de las abscisas (x) corresponde al Esfuerzo principal menor (σ_3). Un Resumen de las estimaciones obtenidas junto a su factor de ajuste puede observarse en las tablas 2 y 3, para los casos 1 y 2 respectivamente.

Caso 1					
dmax	Ecuación	a	b	c	Ajuste (r ²)
dmax<80	$y=a+bx^c$	0,19	4,50	0,97	0,99
	$y=ax^b$	4,82	0,94	-	0,99
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,20	2,01	-	0,99
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,63	0,90	-	0,98
	$y^{-1}=a+b/x$	0,01	0,17	-	0,98
80<dmax<152	$y=a+bx^c$	-0,88	6,26	0,73	0,96
	$y=ax^b$	5,38	0,80	-	0,96
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,72	0,78	-	0,96
	$y^{-1}=a+b/x$	0,02	0,16	-	0,96
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,61	1,73	-	0,96
152<dmax<175	$y=a+bx^c$	-0,02	4,63	0,87	0,98
	$y=ax^b$	4,61	0,88	-	0,98
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,55	0,84	-	0,98
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,22	1,92	-	0,98
	$y^{-1}=a+b/x$	0,04	0,16	-	0,98
dmax<200; d60<50	$y=a+bx^c$	-0,28	4,93	0,70	0,96
	$y=ax^b$	4,58	0,76	-	0,96
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,54	0,76	-	0,96
	$y^{-1}=a+b/x$	0,04	0,16	-	0,95
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,46	1,66	-	0,95
dmax<200; d60>50	$y=a+bx^c$	0,04	4,31	0,88	0,97
	$y=ax^b$	4,36	0,87	-	0,97
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,28	1,80	-	0,97
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,51	0,84	-	0,97

Tabla 2 Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 1 (τ_1 vs τ_3)

Caso2					
dmax	Ecuación	a	b	c	Ajuste (r ²)
dmax<20	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,47	1,91	-	0,99
20<dmax<80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,16	1,99	-	0,99
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,56	0,92	-	0,99
	$y^{-1}=a+b/x$	0,01	0,18	-	0,98
dmax>80	$y=a+bx^c$	0,09	4,47	0,90	0,96
	$y=ax^b$	4,58	0,89	-	0,96
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,29	1,86	-	0,96
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	1,56	0,87	-	0,96
	$y^{-1}=a+b/x$	0,02	0,19	-	0,96

Tabla 3 Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 2 (τ_1 vs τ_3)

Para ratificar el comportamiento de los datos, además de generar las curvas de esfuerzo principal mayor y menor para los Casos 1 y 2, también se analizaron los datos en forma de semisuma y semiresta (p vs q). En este nuevo espacio de análisis, la tendencia curva es más notoria, sin embargo los mejores ajustes encontrados son solo 3:

Ecuación 6 - Estimación mediante raíces cuadradas para semisuma vs semirestas

$$y^{0.5} = a + bx^{0.5}$$

Ecuación 7 - Estimación mediante polinomio con potencias para semisuma vs semirestas

$$y = a + bx^c$$

Ecuación 8 - Estimación mediante logaritmos para semisuma vs semirestas

$$\ln y = a + \ln x$$

Una representación visual de las 3 ecuaciones, aplicadas sobre el Caso 2 para un $d_{max} < 80mm$, puede observarse en las ilustraciones 18, 19 y 20.

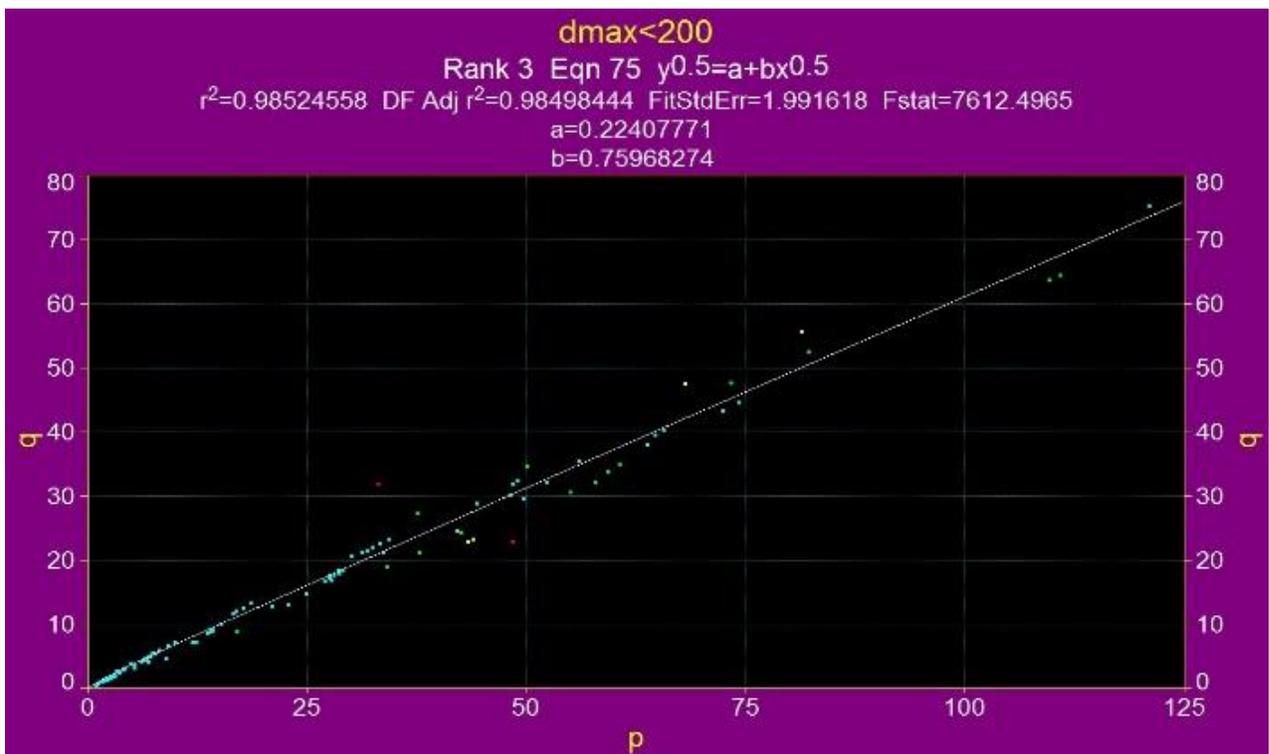


Ilustración 18 – Ejemplo Ecuación 6 aplicada al Caso 2 con $d_{max} > 80mm$

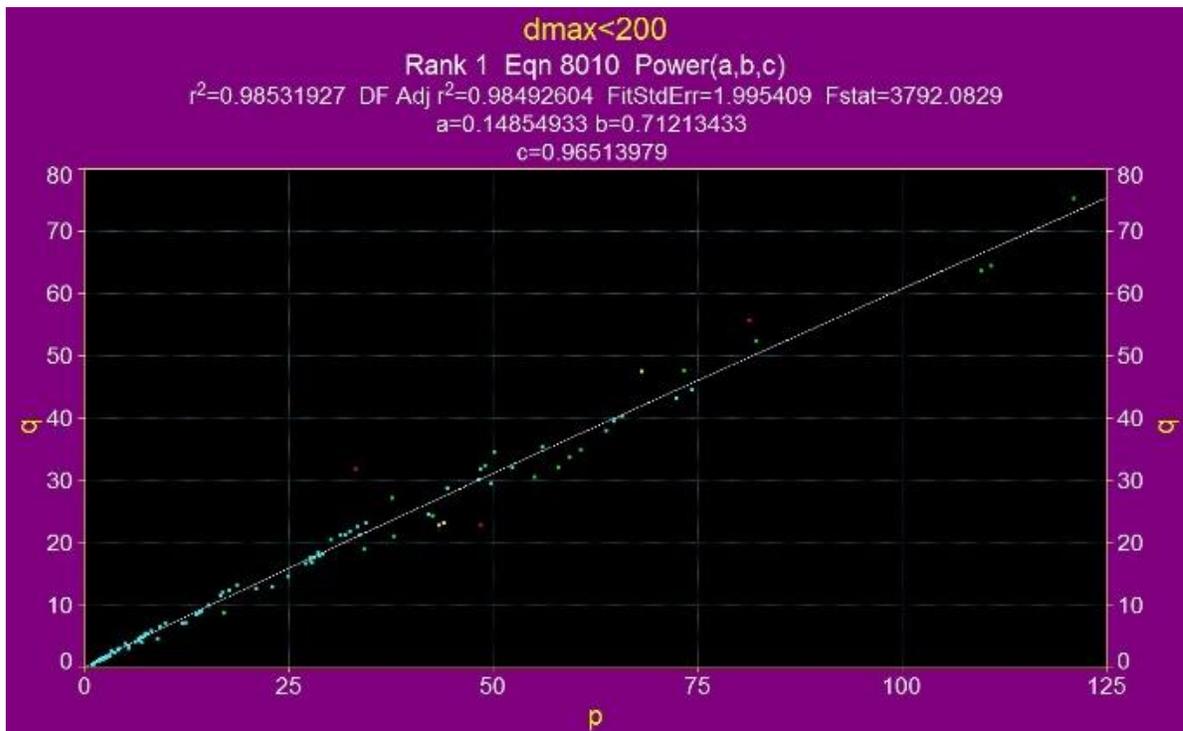


Ilustración 19 - Ejemplo Ecuación 7 aplicada al Caso 2 con $d_{max}>80mm$

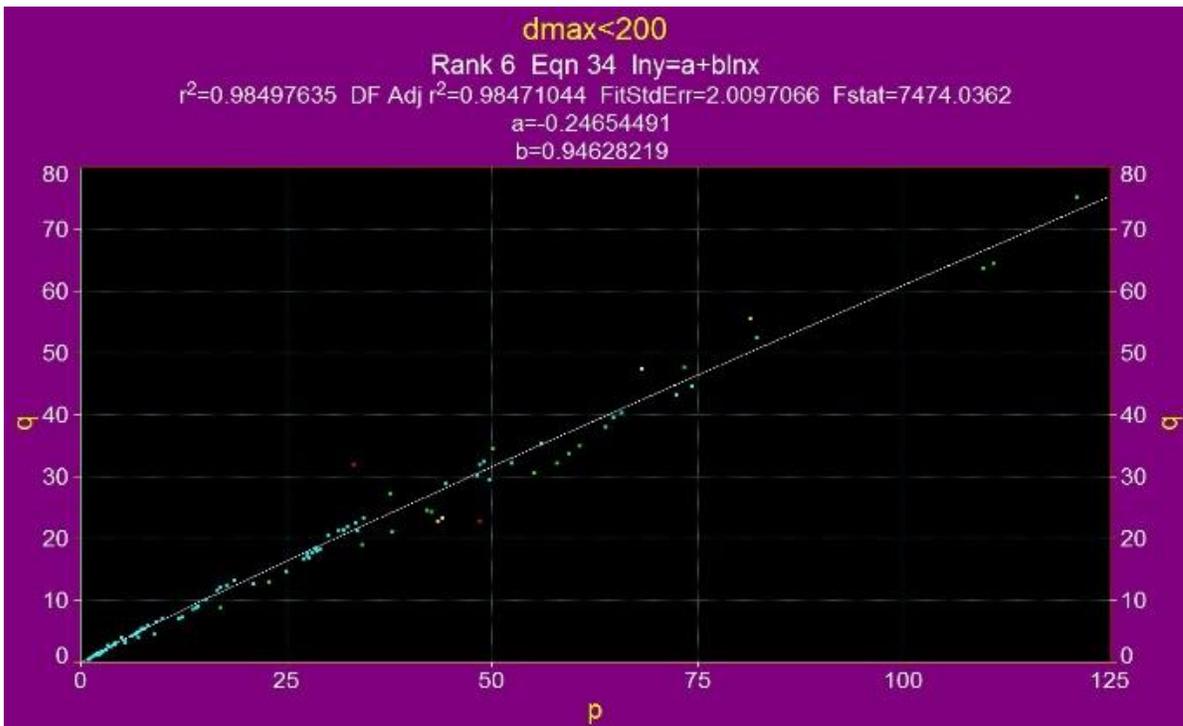


Ilustración 20- Ejemplo Ecuación 8 aplicada al Caso 2 con $d_{max}>80mm$

Un resumen de estas nuevas estimaciones junto a su factor de ajuste puede observarse en las tablas 4 y 5, para los casos 1 y 2 respectivamente.

Caso 1					
dmax	Ecuación	a	b	c	Ajuste (r2)
dmax<80	$y=a+bx^c$	0,31	0,66	0,99	1,00
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,14	0,78	-	1,00
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	0,32	0,97	-	1,00
80<dmax<152	$y=a+bx^c$	-1,90	1,19	0,86	0,99
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	-0,06	0,91	-	0,99
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,49	0,74	-	0,99
152<dmax<175	$y=a+bx^c$	0,09	0,80	0,94	1,00
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	0,24	0,94	-	1,00
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,16	0,77	-	1,00
dmax<200; d60<50	$y=a+bx^c$	-0,84	1,20	0,83	0,96
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,47	0,71	-	0,96
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	0,07	0,86	-	0,96
dmax<200; d60>50	$y=a+bx^c$	0,19	0,68	0,97	0,99
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,19	0,75	-	0,99
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	0,30	0,95	-	0,99

Tabla 4 - Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 1 (q vs p)

Caso 2					
dmax	Ecuación	a	b	c	Ajuste (r2)
dmax<20	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,37	0,77	-	1,00
	$y=a+bx^c$	1,47	0,68	0,98	1,00
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	0,16	0,94	-	1,00
20<dmax<80	$y=a+bx^c$	0,31	0,64	0,99	1,00
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,12	0,78	-	1,00
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	-0,34	0,97	-	1,00
dmax>80	$y=a+bx^c$	0,15	0,71	0,97	0,99
	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,22	0,76	-	0,99
	$\ln(y)=a+b\ln(x)$	-0,25	0,95	-	0,98

Tabla 5 - Ecuaciones de Curvas de Ajuste, Caso 2 (q vs p)

Podemos observar que las 3 ecuaciones de mejor ajuste en el nuevo espacio de análisis corresponden a ecuaciones también obtenidas en el espacio de análisis anterior, sin embargo se nota la ausencia de ecuaciones de la forma:

Ecuación 9 - Ecuación descartada

$$y = ax^b$$

Ecuación 10 - Ecuación descartada

$$y^{-1} = a + b/x$$

Dichas ecuaciones en el nuevo espacio de análisis no entregan factores de ajuste tan satisfactorios como el caso anterior, motivo por el cual son descartadas de análisis posteriores.

3.2.3 Elección de curva

Filtrando a solo 3 posibles ecuaciones para la simulación del material de lastre, se hace necesaria la selección de una única curva. Para la elección se tomaron varias consideraciones:

- Poseer un grado de ajuste cercano a 1
- Ser una ecuación simple y práctica para el uso diario.
- Poseer un intercepto cercano o igual a 0.
- Semejante a ecuaciones conocidas de la literatura.

Como se puede observar en la tabla 6, la que fue construida extrayendo las estimaciones logarítmicas de las tablas 2 y 3, los valores de intercepto para dichas estimaciones siempre están por sobre 1.

Caso 1				
dmax	Ecuación	Intercepto	b	Ajuste (r ²)
dmax<80	ln(y)=a+bln(x)	1,63	0,90	0,98
80<dmax<152	ln(y)=a+bln(x)	1,72	0,78	0,96
152<dmax<175	ln(y)=a+bln(x)	1,55	0,84	0,98
dmax<200; d60<50	ln(y)=a+bln(x)	1,54	0,76	0,96
dmax<200; d60>50	ln(y)=a+bln(x)	1,51	0,84	0,97
Caso2				
dmax	Ecuación	Intercepto	b	Ajuste (r ²)
dmax<80	ln(y)=a+bln(x)	1,56	0,92	0,99
dmax>80	ln(y)=a+bln(x)	1,56	0,87	0,96

Tabla 6 - Intercepto en funciones Logarítmicas

Por lo anterior, los ajustes Logarítmicos son descartados, de ser utilizados para el ajuste de los valores. Así, las ecuaciones candidatas se reducen solo a 2:

Ecuación 11 - Ecuación candidata a ajuste

$$y^{0.5} = a + bx^{0.5}$$

Ecuación 12 - Ecuación candidata a ajuste

$$y = a + be^{cx}$$

De la literatura tenemos que el criterio generalizado de Hoek y Brown(2002), la cual es ampliamente utilizada en la geotecnia para determinar estabilidad de taludes, está representado por la ecuación 13.

Ecuación 13 - Ecuación de Hoek y Brown(2002)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Donde:

- σ'_1 y σ'_3 son los esfuerzos principales efectivos mayor y menor.
- σ_{ci} corresponde a la Resistencia a la compresión uniaxial (UCS) para la roca
- mb es un factor reducido (del macizo rocoso) de la constante mi del material (de la roca intacta)
- s y a son constantes que dependen de la roca

La constante a en la mayoría de los casos es un factor cercano y aproximable a 0.5, por lo que es fácil ver que al linealizar nuestras ecuaciones presentarán una forma similar a la de dicha ecuación, teniendo la siguiente forma:

Ecuación 14 - Desarrollo de Estimación mediante raíces cuadradas

$$\sigma_1'^{0.5} = a + b\sigma_3'^{0.5} \rightarrow \sigma_1' = a^2 + 2ab\sigma_3'^{0.5} + b^2\sigma_3'$$

La que con un poco de desarrollo algebraico podría llegar a una forma muy similar a la presentada por la ecuación 13. Lo anterior resulta clave para la elección de nuestra curva a utilizar para la simulación del material de botaderos. Así, y por todo lo anterior, la ecuación seleccionada será la planteada por la ecuación 11.

3.2.4 Selección de Caso a Modelar

Una vez seleccionada la ecuación a utilizar, podemos contrastar las distintas curvas generadas en función de los datos utilizados para su determinación. En la Ilustración 21, podemos observar la forma de dichas curvas para cada subgrupo granulométrico dentro del caso 1, y de igual manera, puede observarse lo mismo para el caso 2 en la ilustración 22.

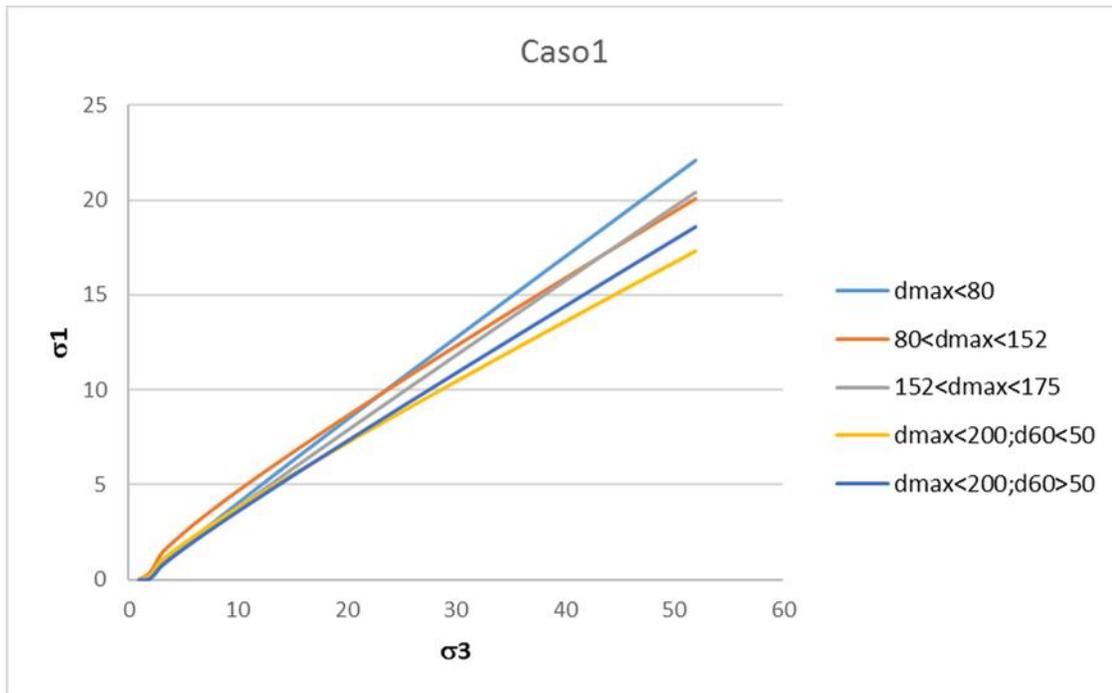


Ilustración 21 - Representación gráfica de ecuaciones del Caso 1

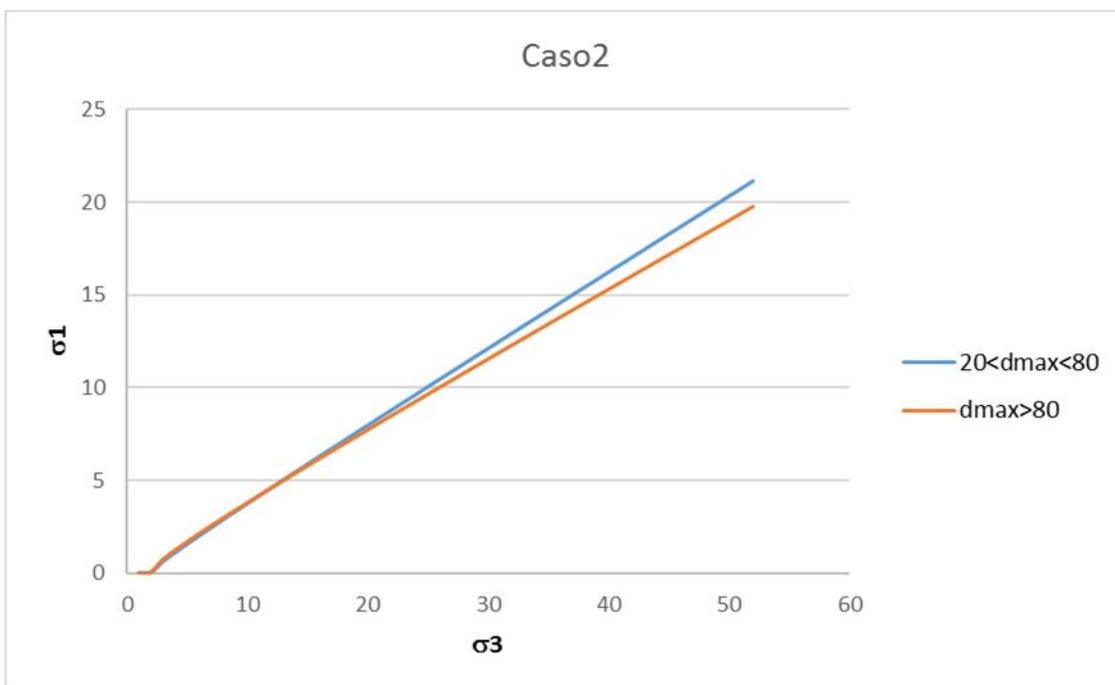


Ilustración 22- Representación gráfica de ecuaciones del Caso 2

En la tabla 7 es posible observar las diferentes formas que tomarán cada estimación en función de los subgrupos granulométricos y el factor de ajuste para cada escenario.

Caso 1				
dmax	Ecuación	a	b	Ajuste
dmax<80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,20	2,01	0,99
80<dmax<152	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,61	1,73	0,96
152<dmax<175	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,22	1,92	0,98
dmax<200; d60<50	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,46	1,66	0,95
dmax<200; d60>50	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,28	1,80	0,97
Caso 2				
dmax	Ecuación	a	b	Ajuste
dmax<20	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,47	1,92	0,99
dmax<80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,16	1,99	0,96
dmax>80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,29	1,86	0,99

Tabla 7 – Ecuaciones seleccionadas y sus diferentes factores

De la tabla anterior es posible realizar ciertas comparaciones entre los factores de ajustes.

Podemos observar que en el Caso1, para un subgrupo granulométrico con dmax<80, los datos utilizados son los mismos que para el Caso2, para los subgrupos granulométricos dmax<20 y 20<dmax<80 tomados como conjunto. Comparando los factores de ajustes en ambos casos, se hace conveniente la simplificación y es por esto que se opta por la agrupación de las subgranulometrias planteadas por el Caso1, ya que abarca mayor cantidad de datos entregando un mejor factor de ajuste.

Los datos utilizados para los escenarios de 80<dmax<152, 152<dmax<174, dmax<200 (con d60<50) y dmax<200 (con 50<d60<110) para el Caso 1, a su vez, corresponden a los mismos datos usados para el análisis de 80<dmax<200 del Caso 2. De sus factores de ajuste podemos notar que para el escenario del Caso 2 el factor de ajuste es muy superior para las alternativas analizadas individualmente en el Caso1, por lo que, de igual manera, se hará más beneficioso para el análisis de los datos usar dicho escenario.

Así, la data completa puede simplificarse en solo 2 escenarios agrupando netamente en función del tamaño máximo, el caso en que los datos presenten un tamaño de partícula máximo de 80mm y el caso donde presenten un tamaño de partícula mínimo de 80mm (dmax>80 y dmax<80). Dicha separación en los nuevos subgrupos y las ecuaciones de ajuste correspondientes, pueden ser observadas en la tabla 8.

Caso Final				
dmax	Ecuación	a	b	Ajuste
dmax<80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,20	2,01	0,99
dmax>80	$y^{0.5}=a+bx^{0.5}$	0,29	1,86	0,99

Tabla 8 - Ecuaciones Para Caso Final a analizar

3.2.5 Test de Hipótesis

De las curvas anteriores fue posible notar que los ajustes encontrados para los datos analizados mayoritariamente exigían un intercepto mayor a 0 en la mayoría de los casos.

Dado que el trabajo trata sobre material, en la situación teórica de existir esfuerzos de confinación muy bajos, las ecuaciones reflejarían la existencia de esfuerzos de tracción dentro del botadero. Dicho escenario carece de sentido Físicos dadas las condiciones en las que se encuentra el material a simular (material no confinado con esfuerzos verticales generados por su propio peso).

Con el fin de corregir las ecuaciones encontradas, de comprobar sí es posible imponer satisfactoriamente la condición de intersección igual a 0 se aplica un test de hipótesis.

Para lo anterior se linealizaron los datos, para ello basto con trabajar con la raíz cuadrada de los esfuerzos principales mayor y menor.

Ecuación 15 – Liberalización de la Estimación planteada.

$$\sigma_1^{0.5} = a + b\sigma_3^{0.5} \rightarrow y = a + bx \quad (y = \sigma_1^{0.5}; x = \sigma_3^{0.5})$$

Sin embargo es necesario conocer del error estándar del intersección, para lo cual la ecuación se recalcula con las raíz cuadrada de datos (es decir linealizada), para lo que se utilizó Excel, programa que permite realizar la estimación lineal asumiendo o rechazando un intercepto 0. Del cálculo es directa la extracción de los factores de ajuste de las nuevas curvas obtenidas y el error estándar de los interceptos distintos de 0. Como resultado se obtienen 4 nuevas ecuaciones similares a las ecuaciones generadas por TableCurve. Las discrepancias entre las ecuaciones de TableCurve 2d y Excel depende principalmente de los algoritmos de búsqueda utilizados, ya que TableCurve busca factores tales que ajusten una ecuación de raíces cuadradas, mientras que Excel toma dichas raíces como datos a e impone un ajuste lineal. Una comparación entre las ecuaciones puede ser observada en la tabla 9. Por otra Parte, el Error Estándar del intercepto estimado puede observarse en la tabla 10.

Caso Final						
dmax	Ecuación (TableCurve)	Ajuste	Ecuación (Excel con intercepto)	Ajuste	Ecuación (Excel sin intercepto)	Ajuste
dmax<80	$\sigma_1^{0.5}=0,20+2,01\sigma_3^{0.5}$	0,99	$\sigma_1^{0.5}=0,19+2,00\sigma_3^{0.5}$	0,98	$\sigma_1^{0.5}=2,15\sigma_3^{0.5}$	0,99
dmax>80	$\sigma_1^{0.5}=0,29+1,86\sigma_3^{0.5}$	0,99	$\sigma_1^{0.5}=0,12+1,96\sigma_3^{0.5}$	0,98	$\sigma_1^{0.5}=2,08\sigma_3^{0.5}$	0,99

Tabla 9 - Ecuaciones de TableCurve 2d y Excel con y sin intercepto

Caso Final		
dmax	Intercepto Estimado	Error Estándar Intersección Estimado
dmax<80	0,20	0,03
dmax>80	0,29	0,03

Tabla 10 - Errores Estándar de los Interceptos Estimados

De las tablas anteriores es posible notar que los mejores ajustes son entregados por las ecuaciones de TableCurve y Excel con la imposición de intercepto igual a 0, sin embargo la pendiente de los datos con intercepto diferente a 0 es más cercana a las pendientes de las estimaciones de TableCurve. Por lo que, se procede a imponer una hipótesis nula de intercepto igual a 0 para dichas ecuaciones.

Dado que para las ecuaciones se usaron distintos tipos de datos y distintas condiciones, los grados de libertad para generar dichas ecuaciones también son diferentes. Los grados de libertad para cada caso se pueden observar de la Tabla 10.

Caso Final			
dmax	Nº Datos Utilizados	Grados de Libertad (con intercepto)	Grados de Libertad (sin intercepto)
dmax<80	84	82	83
dmax>80	173	171	172

Tabla 11 - Grados de Libertad Caso final

Según el Test de hipótesis la hipótesis nula se valida cuando se cumple:

Ecuación 16- Test de Hipótesis

$$t = \frac{\bar{\beta}_1 - \beta}{\hat{\sigma}_{\beta_1}} \sim t_{\text{grados de libertad}}$$

Donde

β : Corresponde a nuestra hipótesis nula, en este caso un intersepto igual a 0

$\bar{\beta}_1$: Corresponde a la estimación del intersepto

$\hat{\sigma}_{\beta_1}$: El error estándar del intersepto estimado

Tomando como ejemplo el escenario de dmax< 80, el valor de la T-Student para 82 grados de libertad con una confiabilidad del 95% ($T_{82}^{0.05}$) es de 1.99.

Sin embargo del desarrollo de la ecuación tenemos que:

Ecuación 17 - Desarrollo Test de Hipotesis

$$\frac{0,20 - 0}{0,03} = 6,67$$

Ecuación 18 - Criterio de Comparación del Test de Hipótesis

$$6,67 > 1,99 = T_{82}^{0,05}$$

Por lo que dicha hipótesis nula es rechazada.

A modo de confirmación sabemos que el intervalo de confianza para una estimación del 95% estará dado por la ecuación 19.

Ecuación 19 - Intervalo de Confianza para el Test de Hipótesis

$$-T_c^p < \frac{\beta_1 - \beta}{\hat{\sigma}_{\beta_1}} < T_c^p$$

Donde

- p corresponde al grado de confianza (donde usaremos una confianza del 95% es decir de un 0.05)
- c corresponde a los grados de libertad.

Con un poco de algebra la ecuación es desarrollada para mostrar el intervalo en el cual nuestro test de hipótesis será aceptado:

Ecuación 20 - Desarrollo de intervalo de confianza

$$[\hat{\beta}_1 - T_c^p \hat{\sigma}_{\beta_1}, \hat{\beta}_1 + T_c^p \hat{\sigma}_{\beta_1}] \rightarrow [0,13, 0,25]$$

De la Ecuación 20 se corrobora la invalidez de nuestra hipótesis nula dado que el valor 0 no se encuentra dentro de dicho intervalo.

3.2.6 Curvas Seleccionadas para Simulaciones

Dado los factores de ajustes similares, por la necesidad de imponer intercepto igual a 0 a la hora de modelar matemáticamente, las curvas seleccionadas para las simulaciones son las presentes en la tabla 12.

dmax	Ecuación	Ajuste
dmax<80	$\sigma_1^{0.5}=2,15\sigma_3^{0.5}$	0,99
dmax>80	$\sigma_1^{0.5}=2,08\sigma_3^{0.5}$	0,99

Tabla 12 - Ecuaciones Finales para simulación

Por la similitud de ambas ecuaciones y sus factores de ajuste, se plantea un tercer caso que vendría a representar un caso intermedio entre ambas curvas dado por la ecuación:

Ecuación 21 - Estimación propuesta base de datos completa (sin separación por granulometría)

$$\sigma_1^{0.5} = 2.1\sigma_3^{0.5}$$

Ecuación que será posible validar siempre y cuando el factor de seguridad de las 3 curvas sea invariante hasta el segundo decimal.

3.3 Simulaciones

Con el fin de comprobar si nuestras curvas permiten predecir el comportamiento del material lastre será necesario recrear escenarios en los cuales, dada la configuración del botadero, éste se mantenga estable o bien falle en función de la data histórica.

Para ello se utilizará el Software Slide 6.0 de Rocscience, un software de análisis de estabilidad de taludes, mediante el cual es posible analizar todo tipo de suelos y taludes de roca. Cuenta con análisis de filtración de agua mediante elementos para condiciones estáticas y transientes. Además tiene amplias capacidades de análisis probabilístico, pudiendo asignar distribuciones estadísticas a casi cualquier parámetro de entrada, ya sean materiales, cargas o ubicación de niveles freáticos.

3.3.1 Construcción de los perfiles

Para la construcción de los perfiles Piteau Associates Chile facilitó información de su base de datos de clientes que solicitaron análisis de botaderos en el pasado y actualmente se conoce el comportamiento de dichos botaderos por la data histórica de estos. La información utilizada es la siguiente:

- Triangulaciones o curvas de nivel de la topografía del botadero en cuestión
- Triangulaciones o curvas de nivel de la topografía nativa (para determinar la altura del botadero)
- Modelos de bloques de mineralización, litología y alteración
- Modelo de Fallas
- Nivel freático
- Ubicación de la zona de falla (en caso de ser el botadero que se busca que falle)

Un ejemplo de cómo se ven, en software Autocad, la superposición de los distintos modelos de bloques y el nivel freático se puede observar en la ilustración 23.

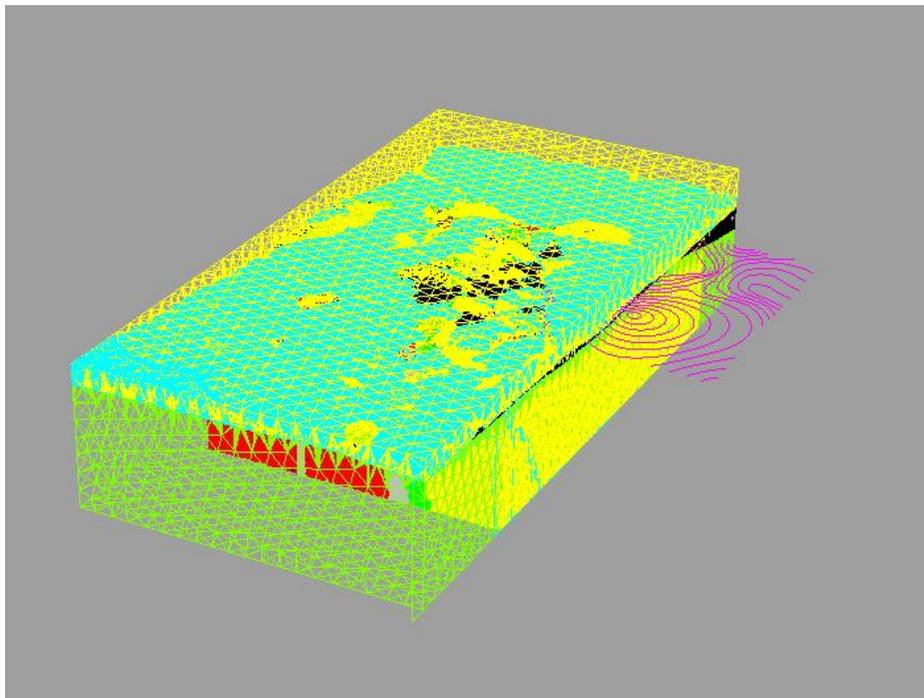


Ilustración 23 - Vista Isométrica de triangulaciones de Litología, Mineralización, Alteración y Nivel Freático para construcción de material de Fundación (bajo el botadero) en Rhinoceros 5

Una vez recolectada dicha información es necesario cortar el modelo 3D en secciones de interés que sean en lo posible perpendiculares al talud del botadero. Un ejemplo de la vista en planta de botaderos de Quebrada Blanca se observa en la ilustración 24. Las líneas rojas representan las secciones escogidas a cortar dada su perpendicularidad con los bancos.

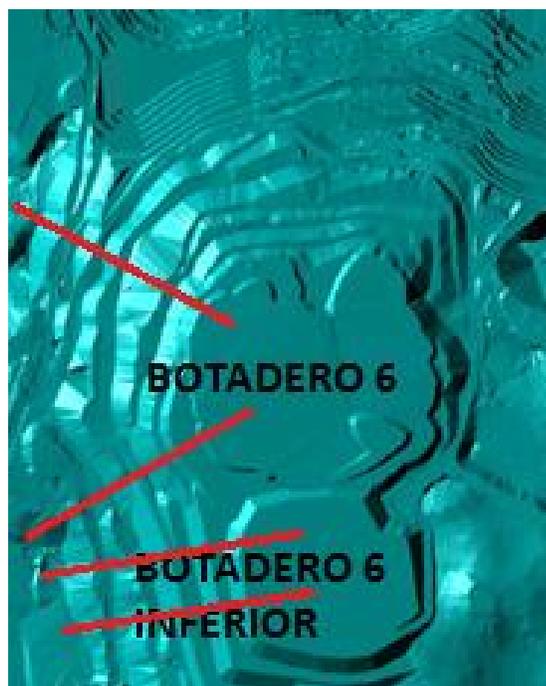


Ilustración 24- Vista Planta Topografía de Botaderos y secciones a cortar

Con los cortes es posible la construcción mediante Autocad los perfiles a exportar a Slide. Los materiales a utilizar en el modelo se conocen previamente de data histórica de la empresa, siendo únicamente el material de botadero la variable manipulada. Un ejemplo de una sección construida y con sus diferentes materiales implementados puede observarse en la ilustración 25.

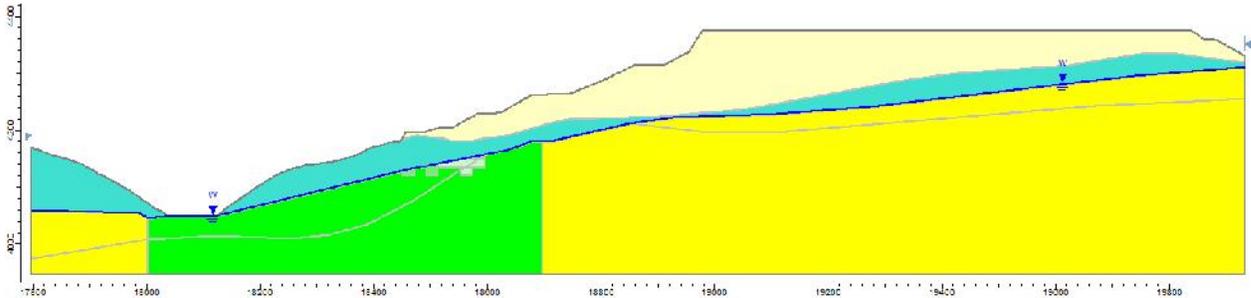


Ilustración 25- Perfil de Análisis en Slide con Materiales de Fundación incorporados

3.3.2 Material de Botadero Simulado

Para la construcción del material de botadero, es necesario incorporar un material cuyas propiedades estén definidas por medio de las curvas de ajuste simuladas. Si bien Slide no cuenta con la opción de ingresar funciones directamente, la alternativa utilizada es desplegar dicha información como una tabla de datos de Cizalle versus Esfuerzo Normal en Kilo Pascales.

De la literatura tenemos las ecuaciones 22, 23 y 24, correspondientes a la conversión de esfuerzos principales a esfuerzo normal y cizalle.

Ecuación 22 – Obtención de Esfuerzo Normal

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \text{sen}(\varphi)$$

Ecuación 23 – Obtención de Cizalle

$$\tau = 2 \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \text{cos}(\varphi)$$

Ecuación 24 - Obtención de ángulo de fricción

$$\tau = \arcsen\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}\right)$$

Aplicando dichas transformaciones en las 3 curvas de ajuste se obtienen las curvas planteadas en las ilustraciones 26,27 y 28.

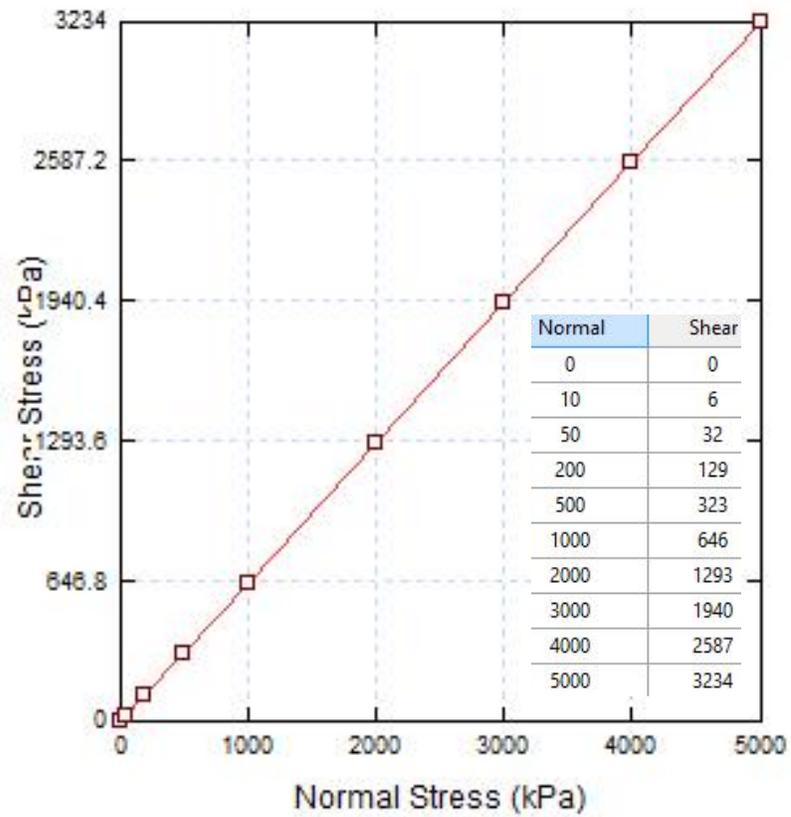


Ilustración 26- Curva de Ajuste para $d_{max} < 80$

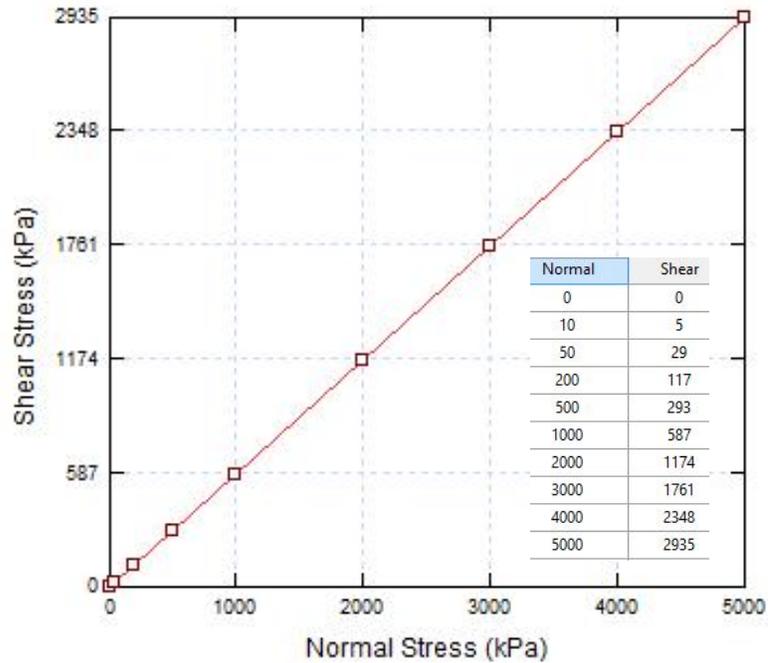


Ilustración 27 - Curva de Ajuste para $d_{max} > 80$

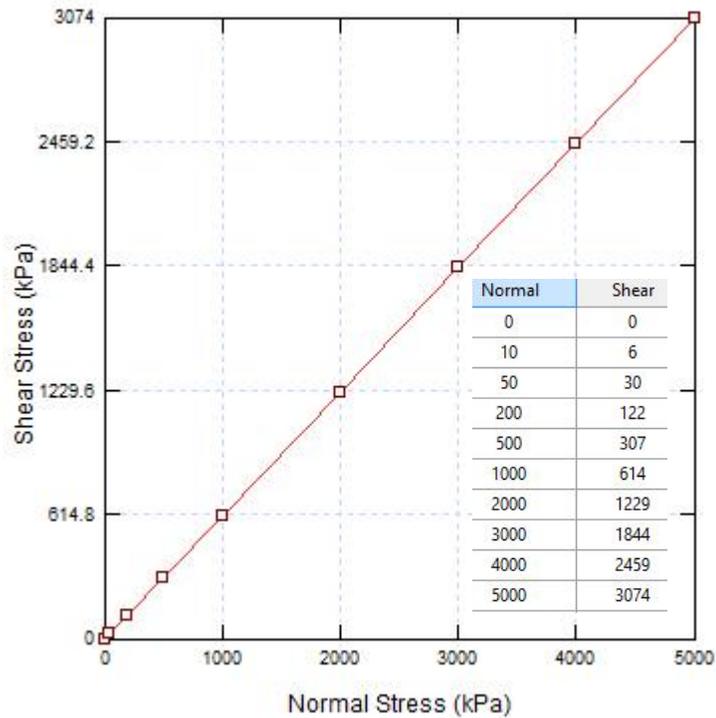


Ilustración 28- Curva de Ajuste para base de datos completa

Además de las curvas de Ajuste en el espacio Esfuerzo normal versus Cizalle se hace necesaria la densidad aparente del botadero, valor con el que se contó para la construcción de cada caso a simular y varió desde los 18.5 a 20 kN/m^3 dependiendo de cada caso.

3.3.3 Selección de método de análisis y simulación

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones utilizaron el software especializado en la búsqueda de superficies de falla Slide en su versión 6.036 de Rockscience.

Dicho software cuenta con varios métodos de búsqueda separándose a groso modo en la generación de superficies circulares y no circulares.

Búsqueda de superficies circulares:

- Grid Search : Se fija una región destinada a albergar el centro de las superficies circulares y los límites de la superficie buscada
- Slope Search: solo se fijan los límites de las superficies.

Búsqueda de superficies no circulares:

- Block Search: se fijan los límites de la superficie y además se utilizan “cajas” que representaran los distintos quiebres de la superficie no circular (vértices).
- Path Search: Se fijan solo los límites de la superficie y da la opción de admitir o rechazar superficies convexas.
- Simulated Annealing: Se fijan solo los límites de la superficie y da la opción de admitir o rechazar superficies convexas, además permite fijar el número de vértices de la superficie.

Si bien, a priori, todos los métodos enumerados anteriormente entregan un ajuste similar, cabe destacar que los factores de seguridad obtenidos por éstos varían en función de la forma de la superficie y los tiempos de computación son bastante distintos, pudiendo ser de segundos a horas, en función de la opción seleccionada.

Si bien de la literatura se sabe que los botaderos, al ser material no consolidado, fallan por medio de deslizamientos, los que presentan una geometría circular, sin embargo, dichos métodos de búsqueda están pensados para fallas en suelos, donde el tamaño de partículas es mucho menor al encontrado en botaderos. Teniendo lo anterior en consideración, superficies similares y de mejor ajuste pueden ser obtenidas al utilizar métodos de búsqueda no circulares de varios vértices, ya que entre otras cosas estas no están limitados por un centro de curvatura predefinido.

Por experiencia en la utilización de este software, se optó por la selección del método de Path Search, dado que su tiempo de computación no es excesivo y permite limitar de mejor manera las superficies de falla, lo que permite evitar la duplicidad de análisis en caso de existir bancos con bermas muy pequeñas, ya que al no delimitar la superficie el software encontraría dos veces la misma superficie al analizar los bancos por separado.

La configuración de este tipo de búsqueda se fijó para comparar 5000 superficies, sin tolerar superficies convexas (dado que la convexidad es típica de macizo rocoso y no de material no confinado) y optimizado para tolerar diferencias de factores de seguridad hasta el cuarto decimal. La interface configurada puede apreciarse en la ilustración 29.

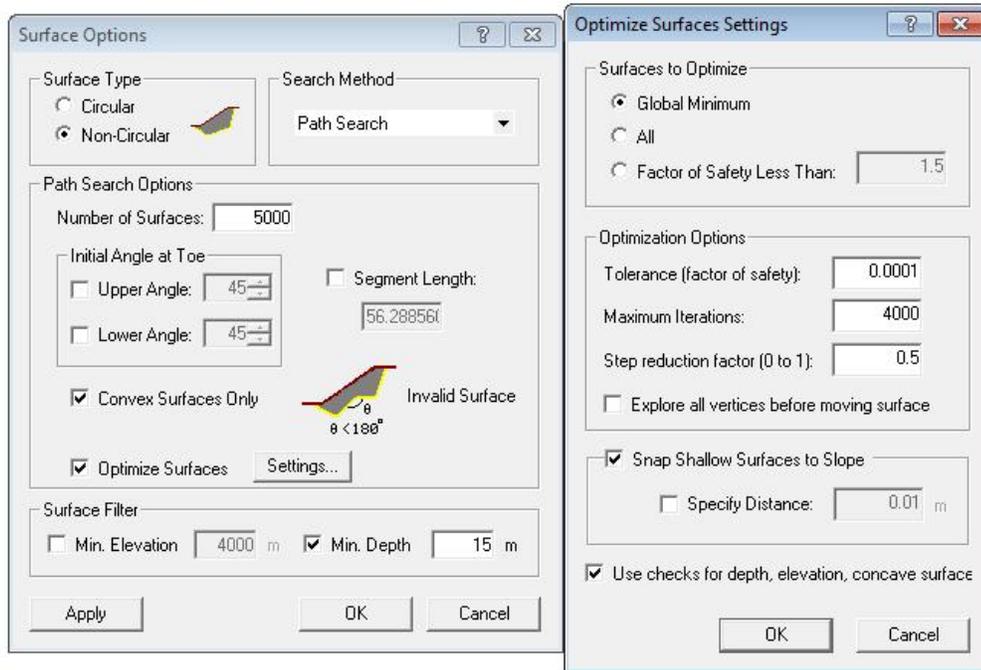


Ilustración 29- Ventanas de configuración de Path Search

3.3.4 Superficies a analizar

Dada la construcción de los distintos botaderos obtenidos para la simulación, es posible notar que muchos de estos poseen varios bancos, por lo que se plantea un análisis que engloba cada superficie de falla que pudiese acontecer.

Para esto se generó archivos para un banco, dos o más bancos y finalmente el caso global. La nomenclatura utilizada para el despliegue en tablas se puede entender de la ilustración 30.

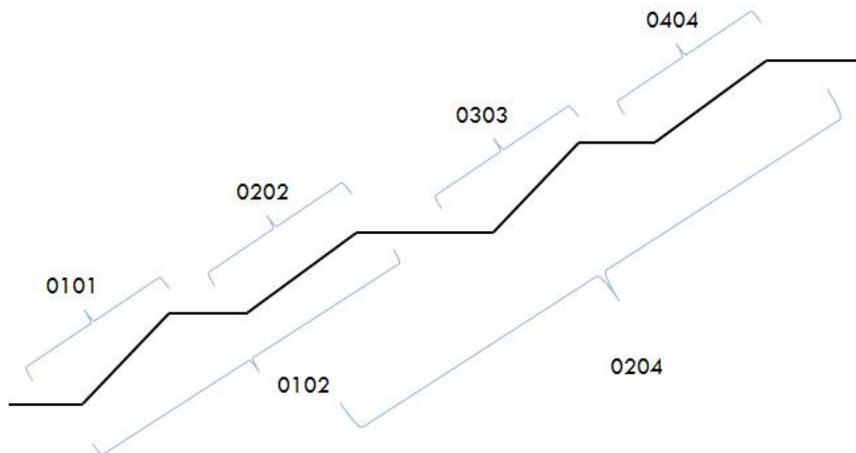


Ilustración 30 - Nomenclatura para bancos

Al finalizar el análisis el software despliega el contorno de la superficie más propensa a caer y el factor de seguridad de esta. Dicho factor de seguridad al ser mayor que 1 se interpreta como una superficie estable y por el contrario, al entregar un valor menor a uno se traduce como un inminente desprendimiento de roca o falla con la forma de la superficie simulada.

Si bien, en teoría, basta con obtener factores de seguridad de 1 para inferir que dicha superficie es estable (pues el Software siempre nos entregará el peor caso) por motivos de seguridad, y experiencia en la empresa Piteau, se busca que las superficies estables estén por encima de un factor de seguridad de 1.10, criterio que se replicara en este trabajo.

En la tabla 13 se hace un desglose de las superficies a analizar. Estas provienen de diversas fuentes y se pueden agrupar en 2 grupos, aquellas que de data histórica se sabe que no deben fallar y aquellas que se sabe que deben fallar.

Fuente	Condición	Numero de Secciones	Numero de Superficies
Botadero 6 - Quebrada Blanca	No falla	4	22
Antamina	No falla	1	1
Line Creek	Falla	5	5

Tabla 13- Origen de Secciones y Numero de Superficies Simuladas

4 Resultados

Comparando las 3 curvas obtenidas en un espacio de Esfuerzo normal versus Cizalle (σ_n vs τ) es posible notar que para los 2 de los 3 casos simulados se observan valores de cizalle menores a los utilizados actualmente por la industria geotécnica y en particular por Piteau Associates Chile, tanto en las forma de curva modelada con la información de Leps, como con la curva corregida de Leps-Fair, curva privada de la empresa corregida con información recolectada en las oficinas de Piteau Vancouver. Una superposición de las 5 curvas puede observarse en la ilustración 31.

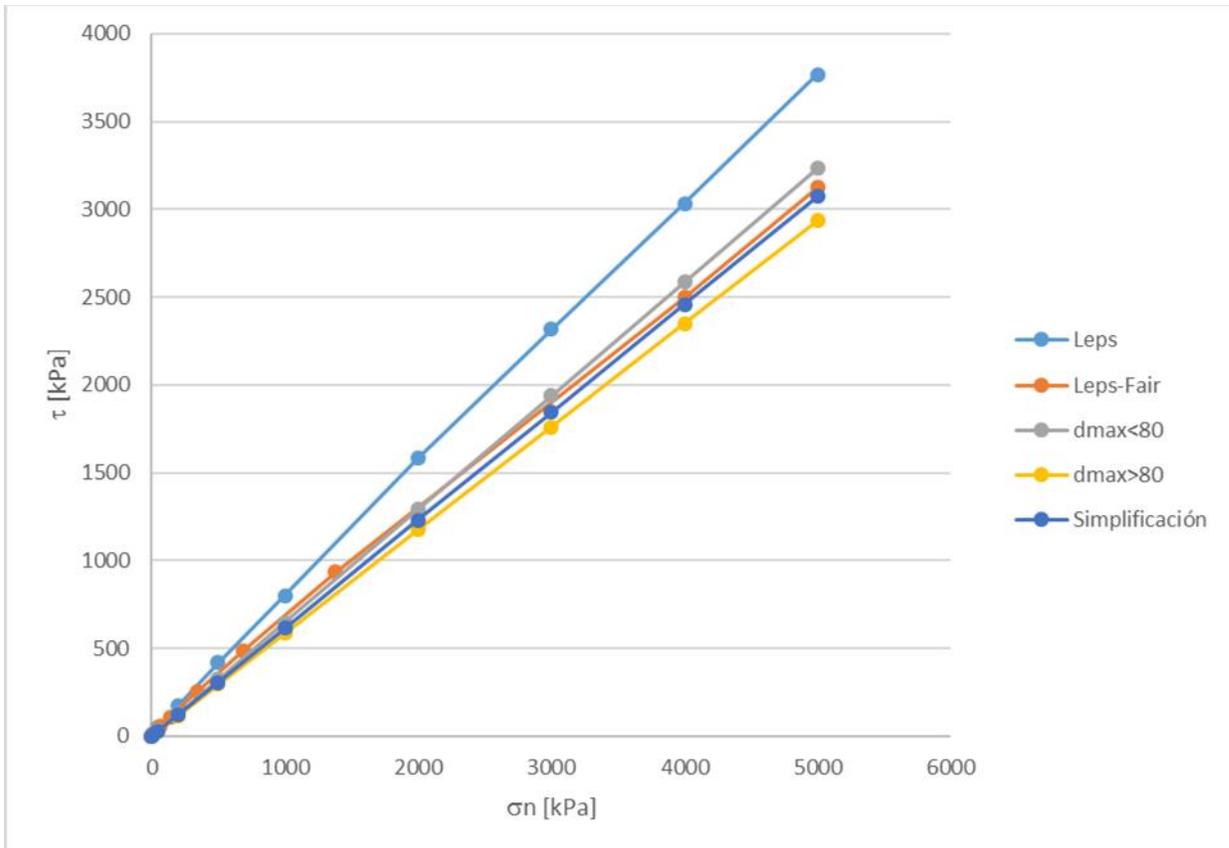


Ilustración 31 - Comparación Curvas actuales y propuestas

Los resultados obtenidos de las simulaciones son desplegados a en las tablas 14 y 15.

No Fallan					
Origen	Sección	Superficie	PS (<80)	PS (>80)	PS
Quebrada Blanca Botadero 6	1	0101	1,92	1,69	1,82
		0102	2,21	1,94	2,14
		0103	1,91	1,72	1,81
		0202	2,09	1,90	1,99
		0203	1,49	1,35	1,41
		0303	0,61	0,55	0,57
	2	0202	1,49	1,35	1,44
		0203	1,86	1,69	1,77
		0204	1,99	1,81	1,89
		0303	1,46	1,33	1,38
		0304	1,94	1,69	1,77
		0404	2,63	2,39	2,50
	3	0101	1,56	1,51	1,55
		0202	2,23	2,19	2,38
		0303	1,30	1,18	1,19
		0304	1,65	1,49	1,56
		0404	1,38	1,26	1,30
	4	0101	2,66	2,43	2,53
		0202	1,55	1,40	1,47
		0203	1,73	1,57	1,64
0303		1,53	1,39	1,44	
Antamina	1	0101	1,67	1,59	1,63

Tabla 14 – Resultados Simulación en superficies que no deben fallar

Falla					
Origen	Sección	Superficie	PS (<80)	PS (>80)	PS
Line Creek	1	0101	0,93	0,84	0,87
	2	0101	0,91	0,82	0,85
	3	0101	0,91	0,82	0,86
	4	0101	0,88	0,80	0,83
	5	0101	0,84	0,80	0,82

Tabla 15 - Resultados Simulación en superficies que no deben fallar

De las tablas 14 y 15 es posible notar que la mayoría de los casos replicados tuvieron resultados satisfactorios. Ejemplos de casos satisfactorios se pueden observar en la ilustración 32.

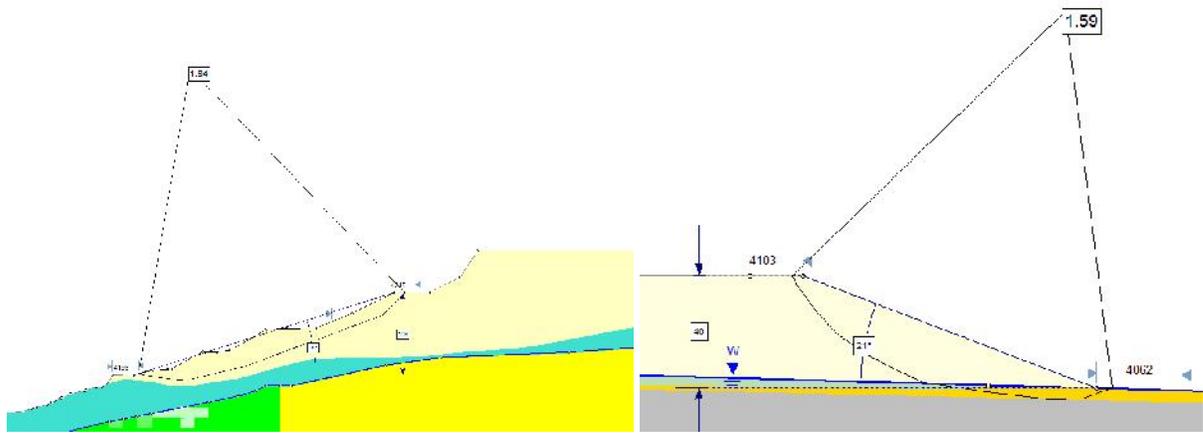


Ilustración 32- Ejemplos superficies estables en Quebrada Blanca y Antamina respectivamente

La única excepción a simple vista corresponde al banco 0303 de la sección 1 del Botadero 6 de Quebrada Blanca. Dicha superficie corresponde a la Ilustración 33, la cual muestra su comportamiento para las 3 simulaciones.

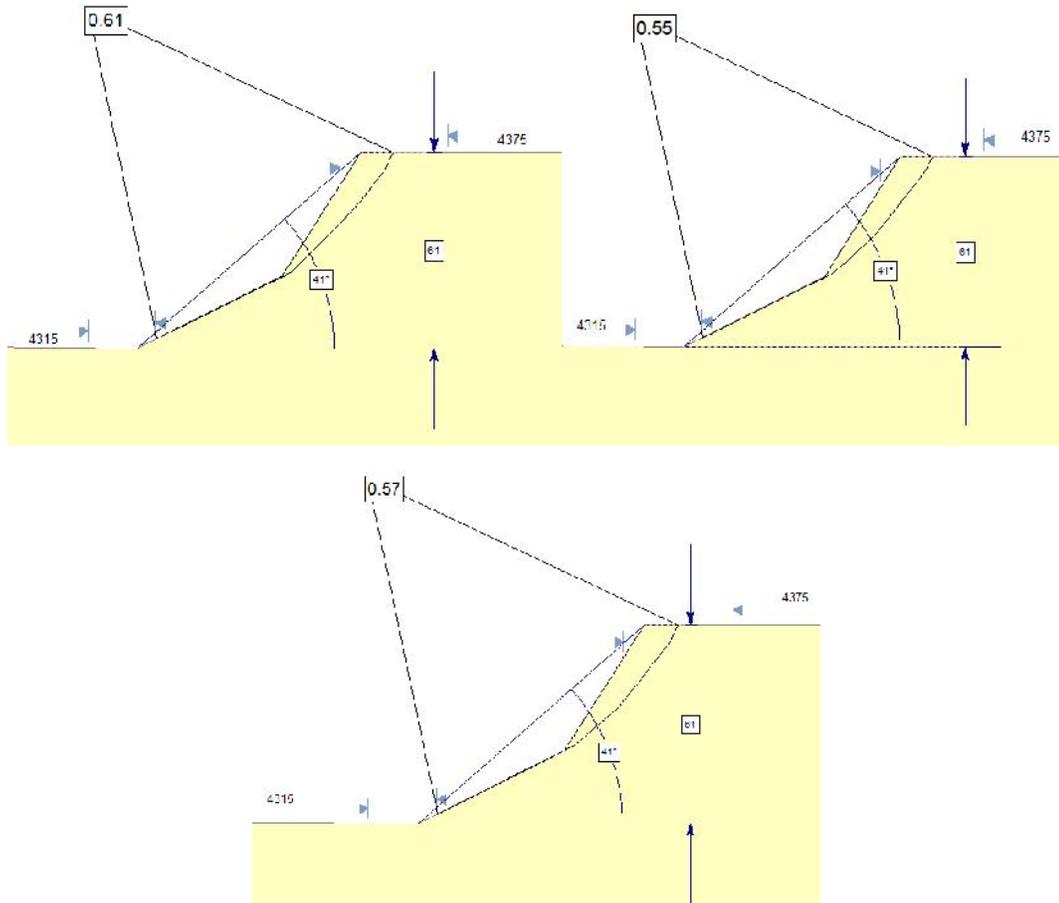


Ilustración 33 - Superficies de Falla para banco 0303 casos $d_{max} < 80$, $d_{max} > 80$ y caso simplificación

Es posible apreciar que, para las 3 simulaciones, existirá desprendimiento de material debido al elevado ángulo pata-cresta existente en dicho banco. Además, con la ilustración 34, es posible notar que el talud presenta un claro desprendimiento de material de antemano y es por esto que la forma del talud es irregular, presentando 2 ángulos superpuestos.

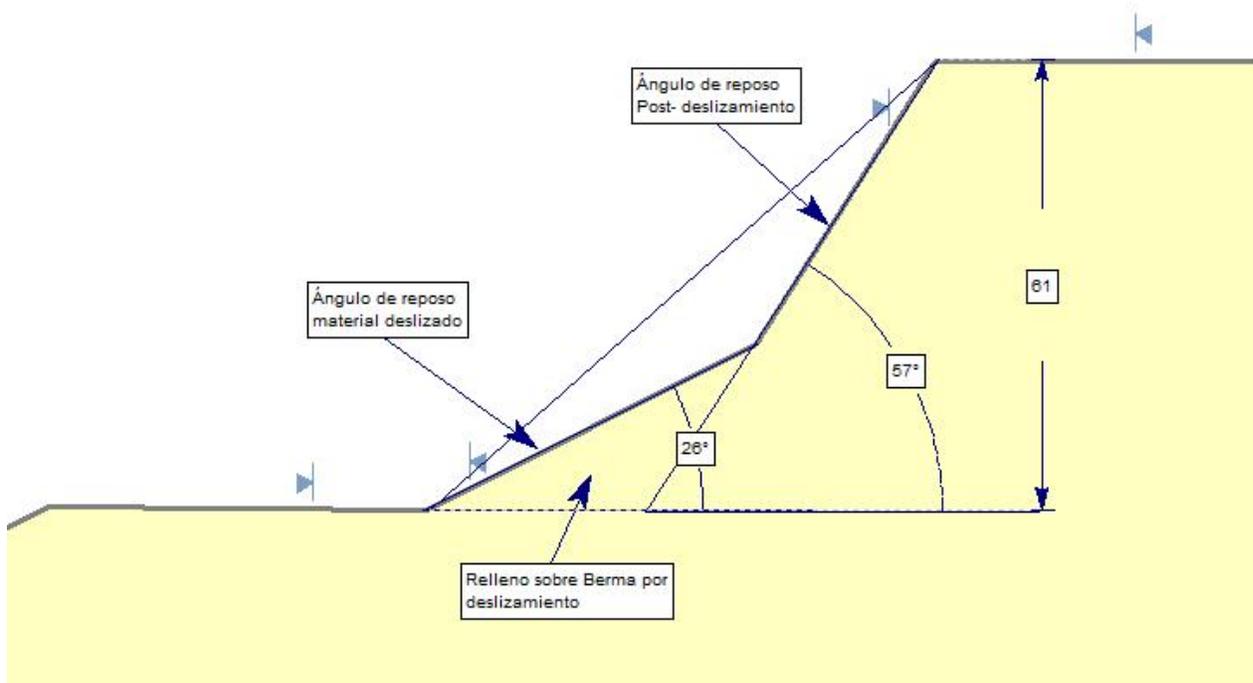


Ilustración 34- Elementos de banco con deslizamiento

El ángulo típico de construcción de botaderos es de aproximadamente 37°, por ser este el ángulo de reposo típico de materiales no confinados observado en diferentes faenas. La explicación para la existencia de un ángulo pata-cresta superior en el banco 0303 se debería a un estado transitorio post-deslizamiento, y este deslizamiento tendría como origen la combinación de la altura de construcción de dicho banco de botadero, 61 metros, y la existencia de una gran cantidad de material no confinado utilizado como material de fundación, pues bajo el banco 0303 existen 2 bancos más de botadero. De la ilustración 35 se observa que existen 145 metros de material no confinado desde la pata del banco hasta el material de gravas (material color cyan), lo que se traduce en cerca de 84 metros de material de botadero bajo el banco en cuestión.

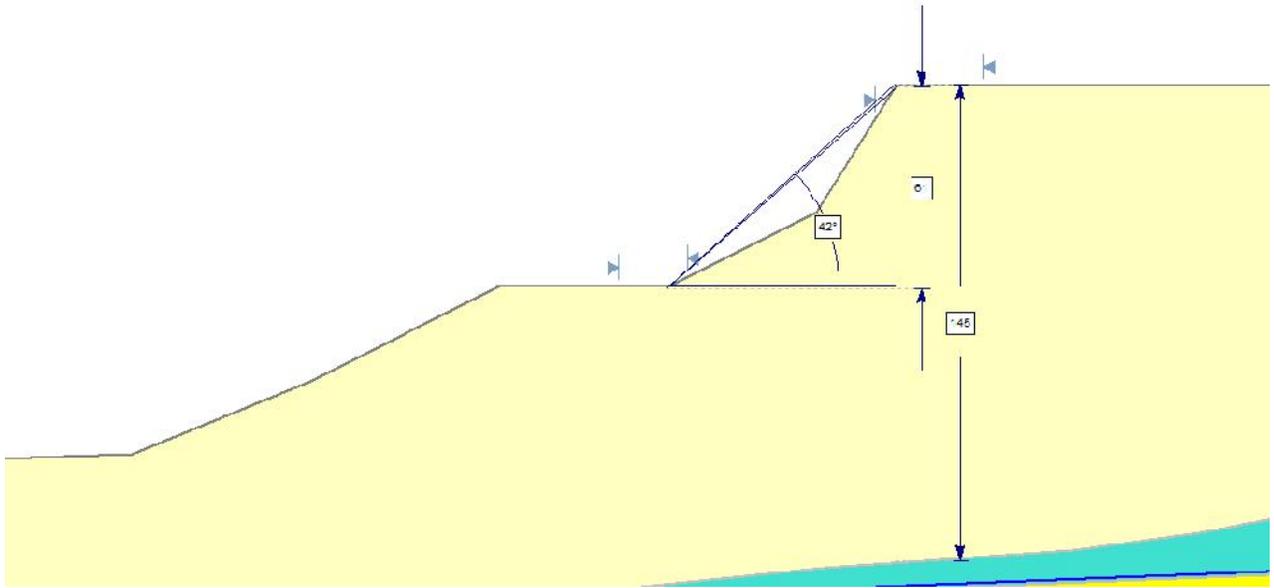


Ilustración 35- Material bajo sección 0303

Para la altura en la que se encuentra dicho banco, por construcción del botadero, no existirán riesgos si tan solo desliza el banco 0303 ya que la berma proporcionada por el banco proporcionado subyacente (0202). De la simulación es posible notar que la superficie 0203, como se observa en la ilustración 36, presenta factores de seguridad por sobre 1.35, dicha superficie abarca un teórico deslizamiento que abarca desde el banco 0202 al banco 0303. De lo anterior es posible concluir que si bien existe seguridad de que el banco 0303 deslice, dada la construcción del botadero dicho deslizamiento no afectaría mayormente el botadero, por lo que a pesar de existir deslizamiento este no será reportable dentro de la data histórica por ser un deslizamiento esperable.

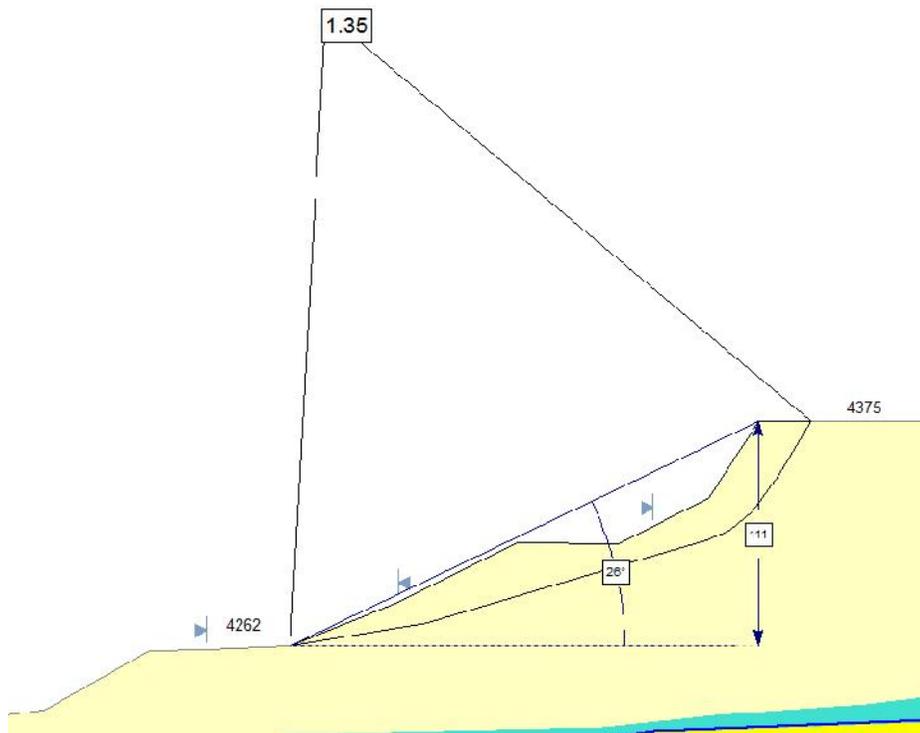


Ilustración 36- Superficie 0203 responsable de minimizar efectos de deslizamiento en 0303

Por otra parte, se observa en aquellos bancos que se esperó la manifestación de deslizamientos, en cada caso y para todas las superficies de análisis, el factor de seguridad siempre fue inferior a 1. Algunos ejemplos de superficies con deslizamiento pueden observarse en la ilustración 37.

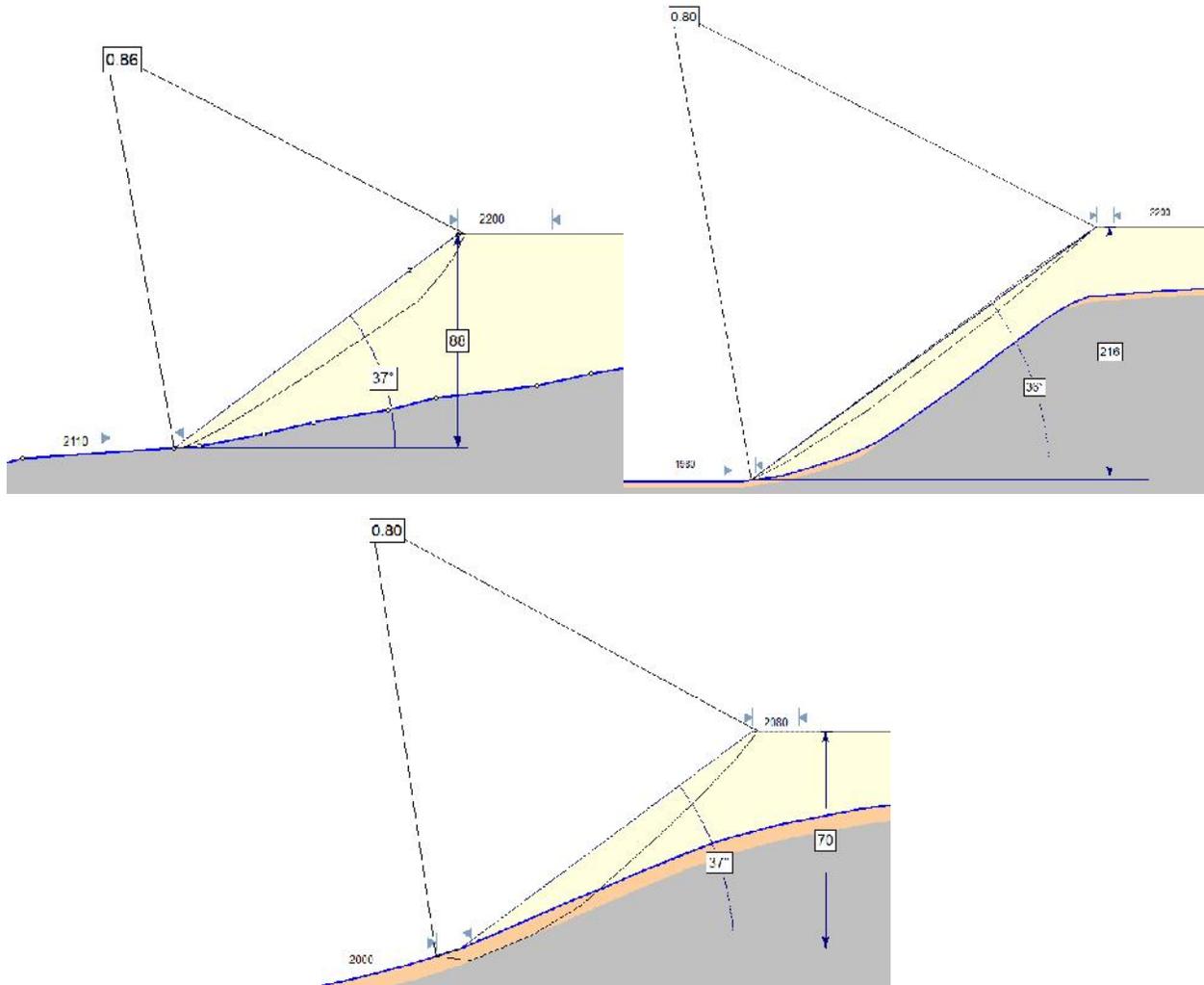


Ilustración 37 - Ejemplos de secciones de botadero que falló en Line Creek

De las superficies que fallan, es fácil notar que el motivo por el cual estas deslizaron es debido a la gran altura de los bancos, cercanos al centenar de metros y construidos mediante un único banco. Se sabe por construcción que el material bajo los botaderos proporcionados por Line Creek presenta mejores condiciones de estabilidad que los botaderos de Quebrada Blanca. Así es posible comparar condiciones similares en bancos similares como se observa en la ilustración 38.

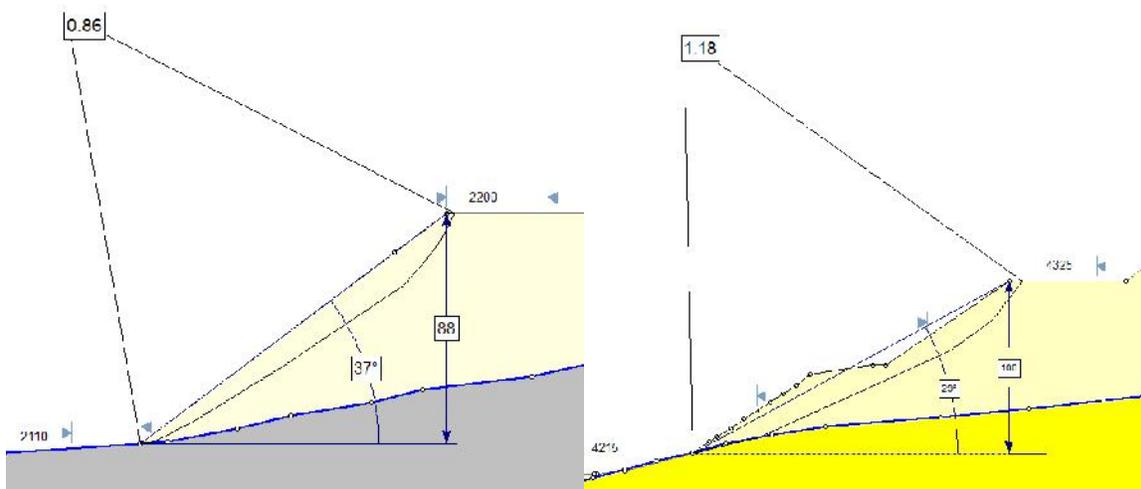


Ilustración 38 - Comparación entre condiciones similares para botaderos de Line Creek y Quebrada Blanca

La recomendación entonces, para este tipo de casos será la utilización de varios bancos de menor altura que en su conjunto alcancen o superen la altura requerida, siempre y cuando exista una extensión de berma capaz de soportar los deslizamientos de los bancos superiores.

Analizando críticamente los resultados, cabe destacar que a pesar de lograr simularse los escenarios planteados de manera satisfactoria, no fue posible realizar una separación granulométrica 100% confiable, dado que muchos de las publicaciones exponían resultados, pero no así la curva granulométrica completa, y es por esto que algunos materiales tuvieron que agruparse con aquellos similares que disponían una información completa.

A su vez, dada la escasa información de botaderos con deslizamientos reportados, generados sola y exclusivamente por condiciones geomecánicas del material en función de la geometría del depósito, no fue posible realizar un mayor número de simulaciones y por ende no se podrá asegurar de manera fidedigna que dicho modelo matemático esté exento de excepciones o casos en los que sean necesarios ponderadores para ajustar el modelo al comportamiento esperable.

También es necesario apuntar que en el afán de encontrar un modelo matemático simple e imponer un intercepto igual a 0, se está dejando de lado parte de la información. Si bien dicha imposición se sustenta en el sentido común, lo ideal sería conseguir información cercana para que dicha conclusión sea extraíble de los datos y no de la imposición de un modelo matemático más cómodo.

5 Conclusión y Discusión

Si bien es posible notar que las 3 curvas propuestas cumplen satisfactoriamente los requerimientos de la simulación, se hace hincapié en que sus factores de seguridad observados en la tabla 12 y 13 varían hasta en 0.2 en su factor de seguridad. De lo anterior se desprende la inviabilidad de la aproximación de ambos casos ($d_{max}<80$ y $d_{max}>80$) como un único escenario, por lo que el uso de la curva simplificada pasa a ser descartada.

Comparando las 2 curvas de ajuste un espacio de esfuerzo normal versus cizalle (σ_n vs τ) es posible notar que para ambos casos se observan valores de cizalle menores a los utilizados actualmente por la industria geotécnica (Leps, 1970) y en particular por Piteau Associates Chile. Dicho resultado es esperable al tratarse de información con granulometría y condiciones más similares a las esperables en terreno. Si bien lo ideal sería extraer del análisis la data planteada por Leps (1970), dada que no se cuenta con una base de datos posterior suficientemente robusta, dichos datos siguen siendo necesarios aún cuando queda en evidencia que dicha información sobreestima las propiedades del material.

A su vez, si bien ambos casos ($d_{max}<80$ y $d_{max}>80$) modelan satisfactoriamente las condiciones esperables en función de la data histórica, cabe destacar que la curva propuesta para ambos casos responde a ajustes de materiales con diferente granulometría. Mientras que la curva propuesta para la información recolectada con tamaños máximos de partícula inferiores a 80 mm presenta los mayores factores de seguridad, se recomienda utilizar la curva modelada con los datos de mayor tamaño de partícula, pues como se comprobó ambas ecuaciones difieren lo suficiente como para inferir que a menores tamaños de partícula el comportamiento de la curva de ajuste determinada no se condecirá con los tamaños de partículas presentes en la realidad.

Así se recomienda a la hora de simular botaderos mediante las curvas propuestas siempre utilizar el caso construido en base a los datos con granulometrías por sobre los 80mm, por incluir materiales con tamaños más cercanos a lo apreciable en terreno y por entregar resultados más conservadores en cuanto a sus factores de seguridad.

Dado el constante avance tecnológico, se deja abierta la posibilidad de futuras actualizaciones en el ajuste de esta curva de simulación de propiedades del material lastre. La construcción de equipos más grandes para el ensayo de gigantes triaxiales permitirá la inclusión de tamaños de partícula superiores y con ello se espera que las ecuaciones de ajuste cambien recreando la realidad de manera aún más satisfactoria.

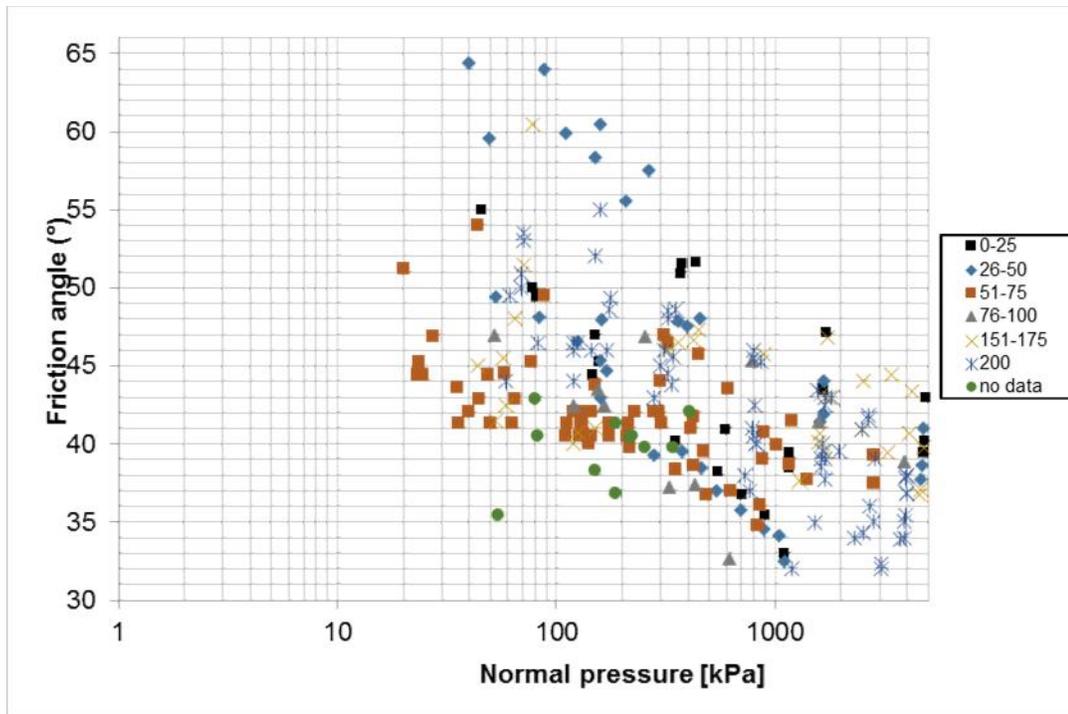
También cabe destacar que existen múltiples factores que inciden en el comportamiento del enrocado además del tamaño de partícula, como es el tipo de material depositado. Distintos tipos de roca tendrán distintos comportamientos y dado que se modeló botaderos ya existentes, no fue posible una separación más rigurosa en este ámbito pues en la realidad los diferentes materiales ya se encuentran mezclados.

Con nuevos estudios y nuevas curvas de ajuste para diferentes tipos de materiales se hace posible el ordenamiento de los materiales extraídos y depositados en botaderos con lo que será factible una optimización del espacio utilizado y una disminución en los riesgos de trabajo y de deslizamientos de material.

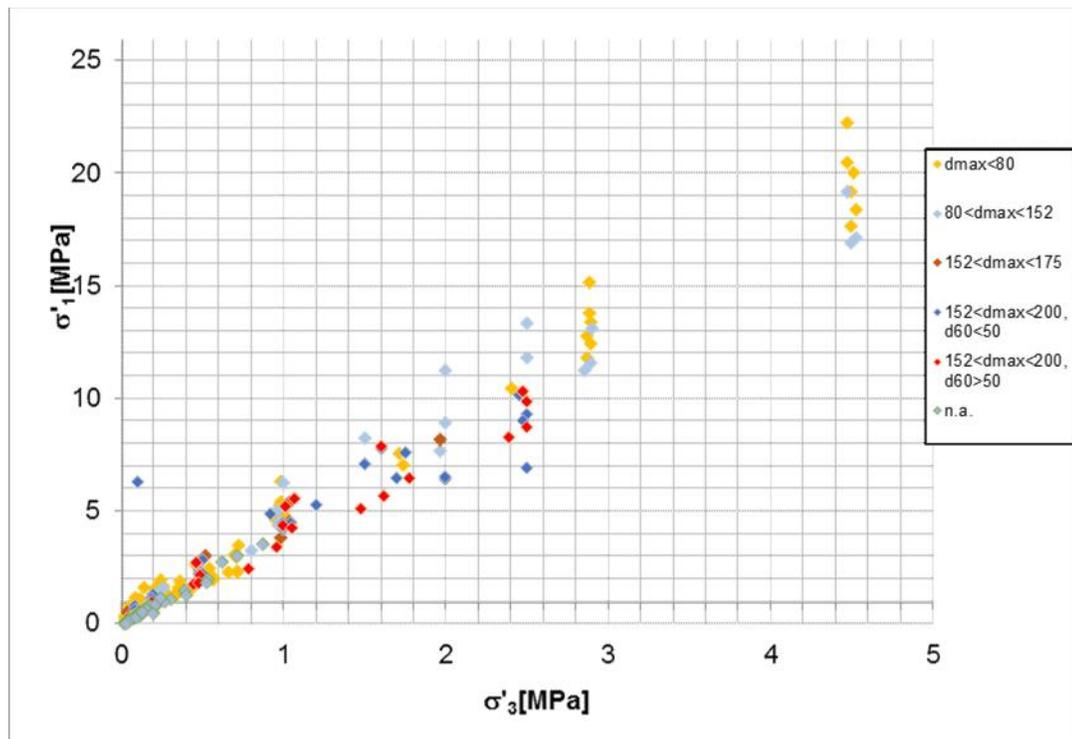
6 Bibliografía

- Leps, M., ASCE, F. 1970. Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 96 (4): 1159-1170.
- Palma, C., Linero, S., Apablaza, R. 2007. Geotechnical Characterization of Waste Material in Very High Dumps with Large Scale Triaxial and Odometer Testing. *International Symposium on Rock Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australia
- Marachi, D., Chan, C., Seed, H. 1972. Evaluation of Properties of Rockfill Materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 98 (1): 95-114.
- Marsal, R. 1967. Large Scale Testing of Rockfill Material. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93 (2): 27-43.
- Marsal, R. 1973. Mechanical Properties of Rockfill. In *Embankment-Dam Engineering, Casagrande Volume* (Hirschfeld, R., Poulos, S.; editors). John Wiley and Sons: 109-200. New York.
- Marsal, R. 1975. Resistencia y compresibilidad de enrocamientos y gravas. In *Presas de tierra y enrocamiento* (Marsal, R., Resendiz, D.; editors). Limusa: 221-267. Mexico.
- Barton, N., B. Kjaernsli, B. 1981. Shear Strength of Rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 107 (7): 873-891.
- Indraratna, I., Wijewardena, L.S.S., Balasubramaniam, A.S. 1993. Large-scale triaxial testing of Greywacke rockfill. *Geotechnique* 43 (1): 37-51.
- Verdugo R., de la Hoz, K. 2006. Caracterización geomecánica de suelos granulares gruesos. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil* 6 (2):199-213.

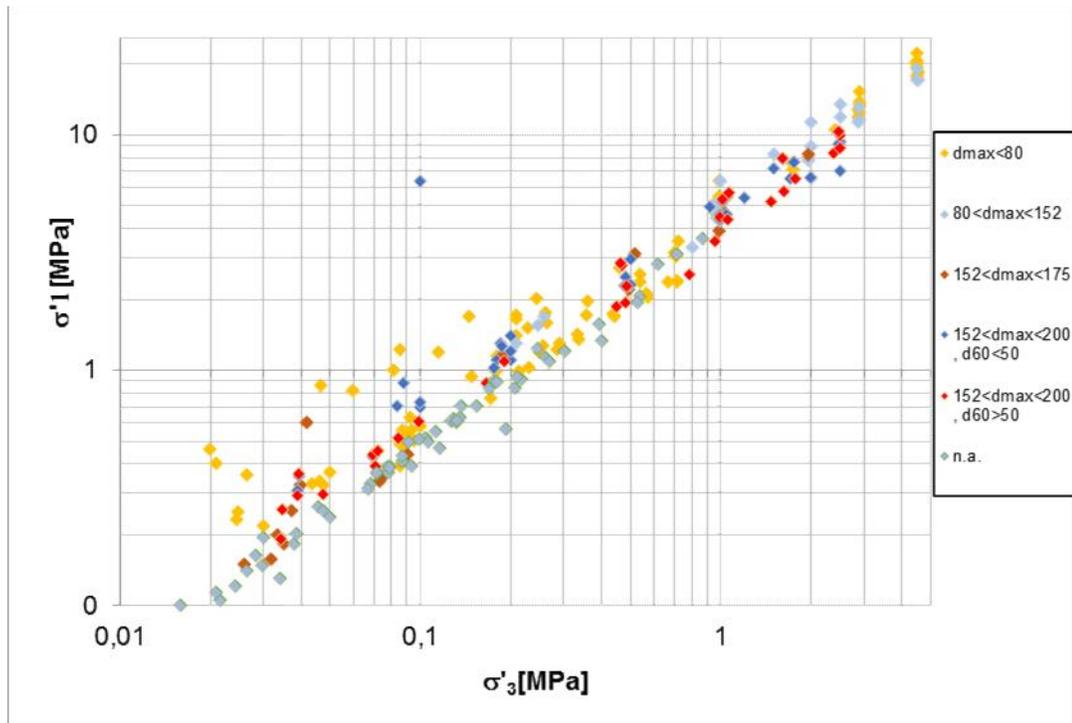
7 Anexo y Apéndices



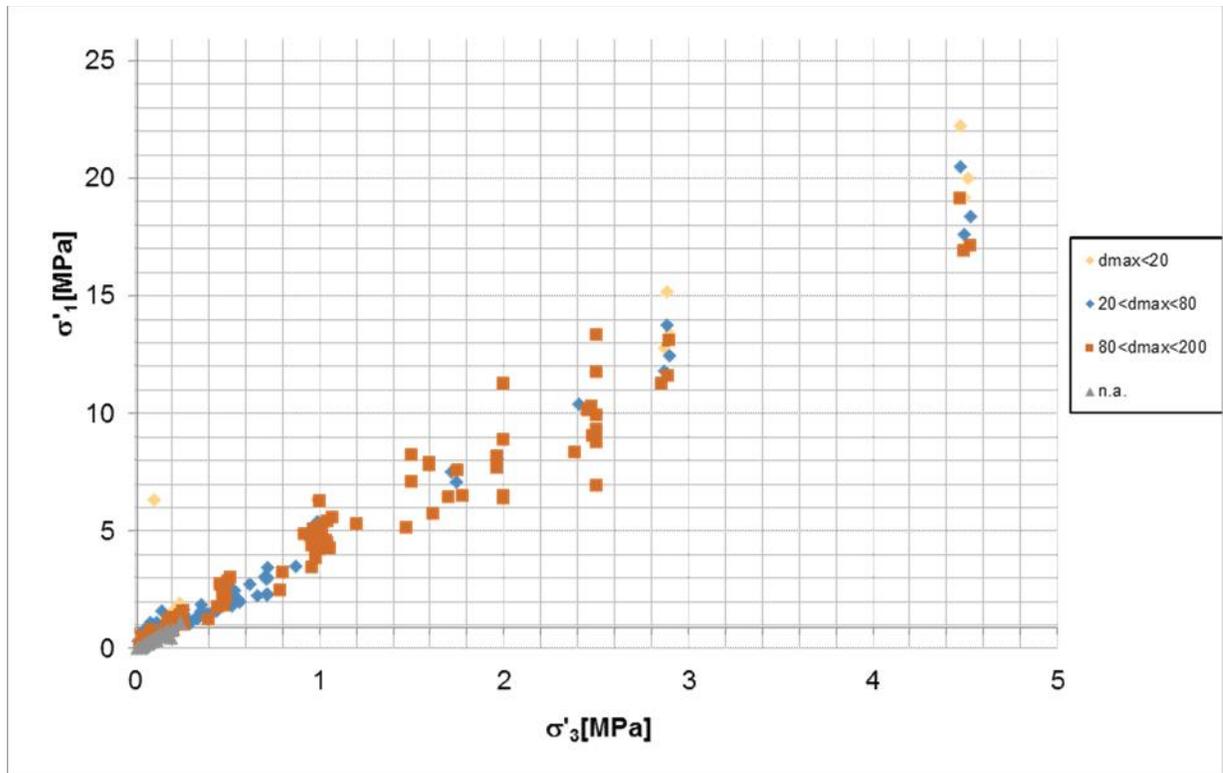
Anexo 1 – Gráfico semi-Logarítmico en espacio τ_n vs w ,



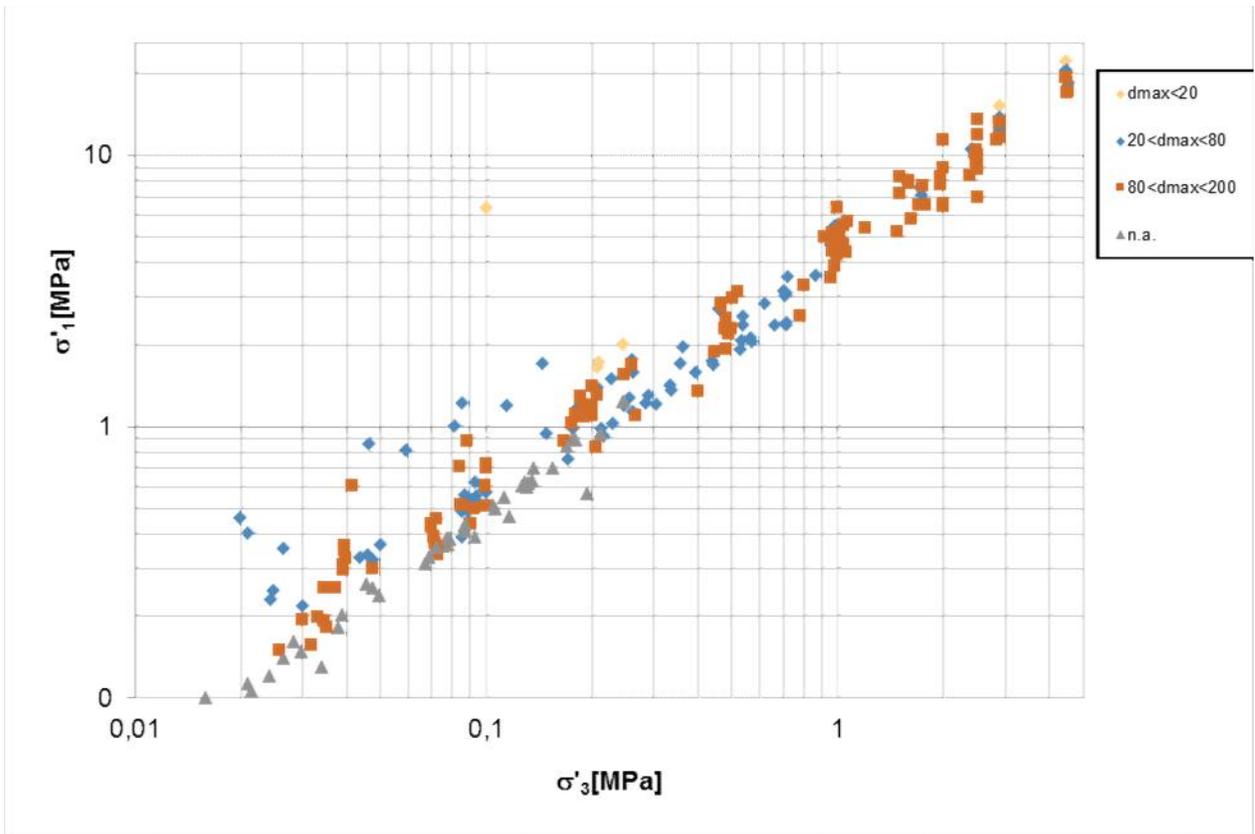
Anexo 2 – Gráfico espacio τ_1 vs τ_3 , Caso1



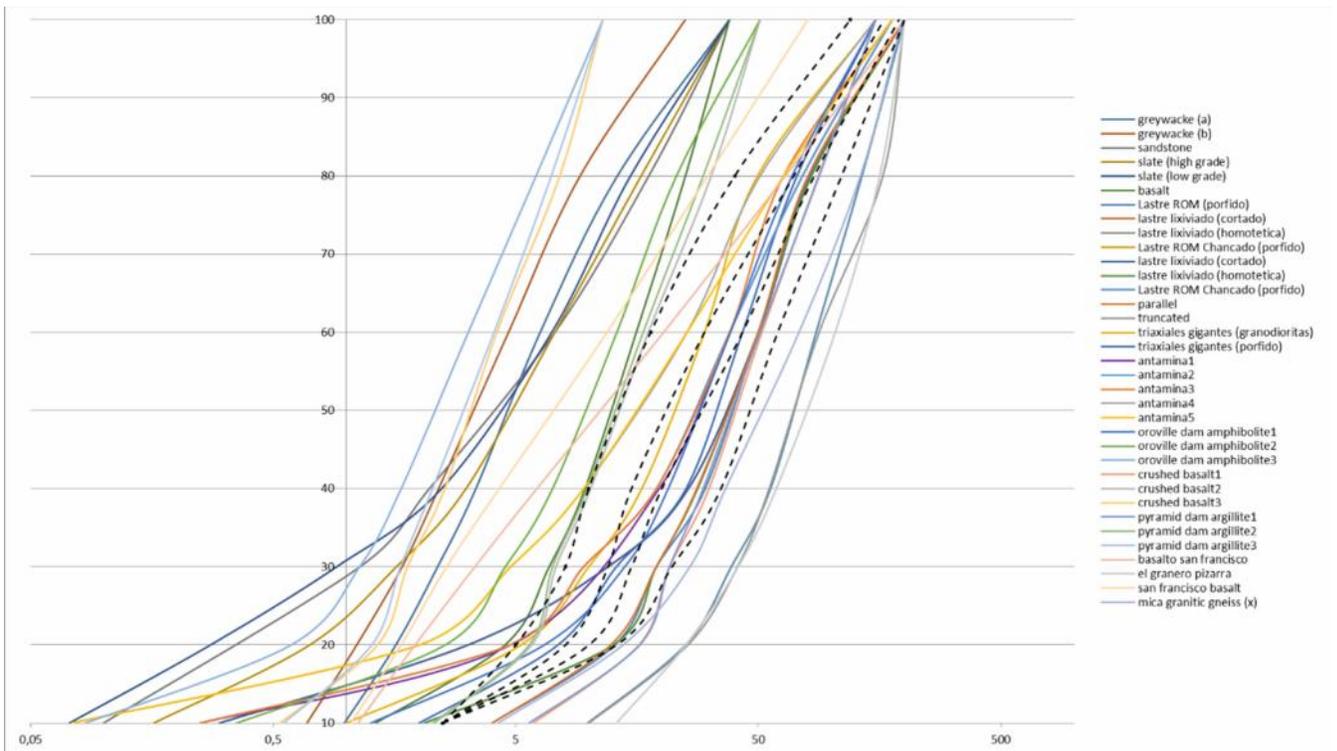
Anexo 3 – Gráfico Logarítmico en espacio τ_1 vs τ_3 , Caso1



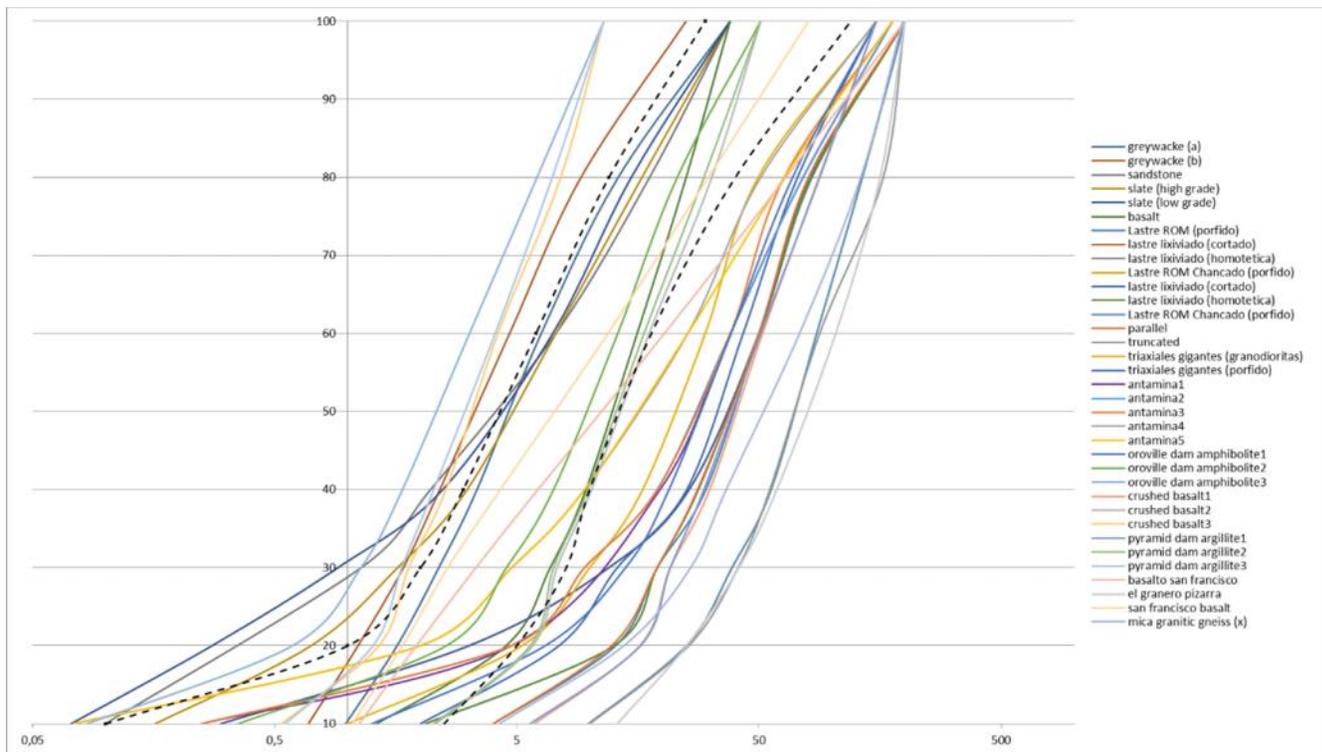
Anexo 4 – Gráfico en Espacio τ_1 vs τ_3 , Caso2



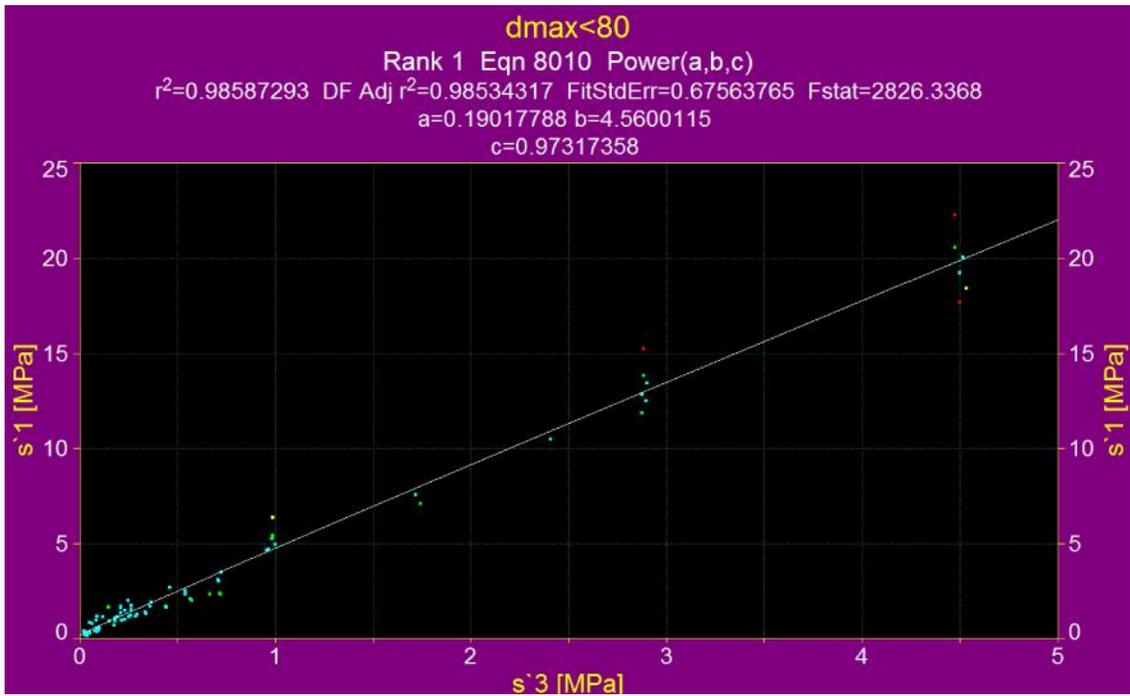
Anexo 5 – Gráfico Logarítmico en espacio τ_1 vs τ_3 , Caso2



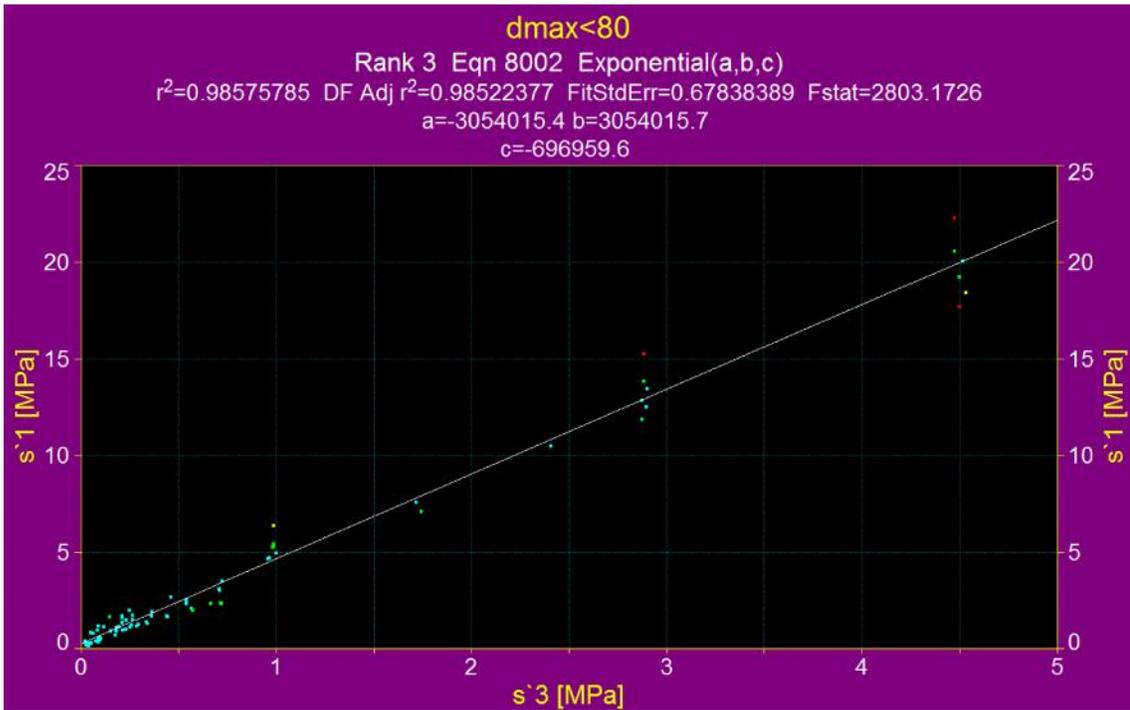
Anexo 6 - Granulometría Caso 1



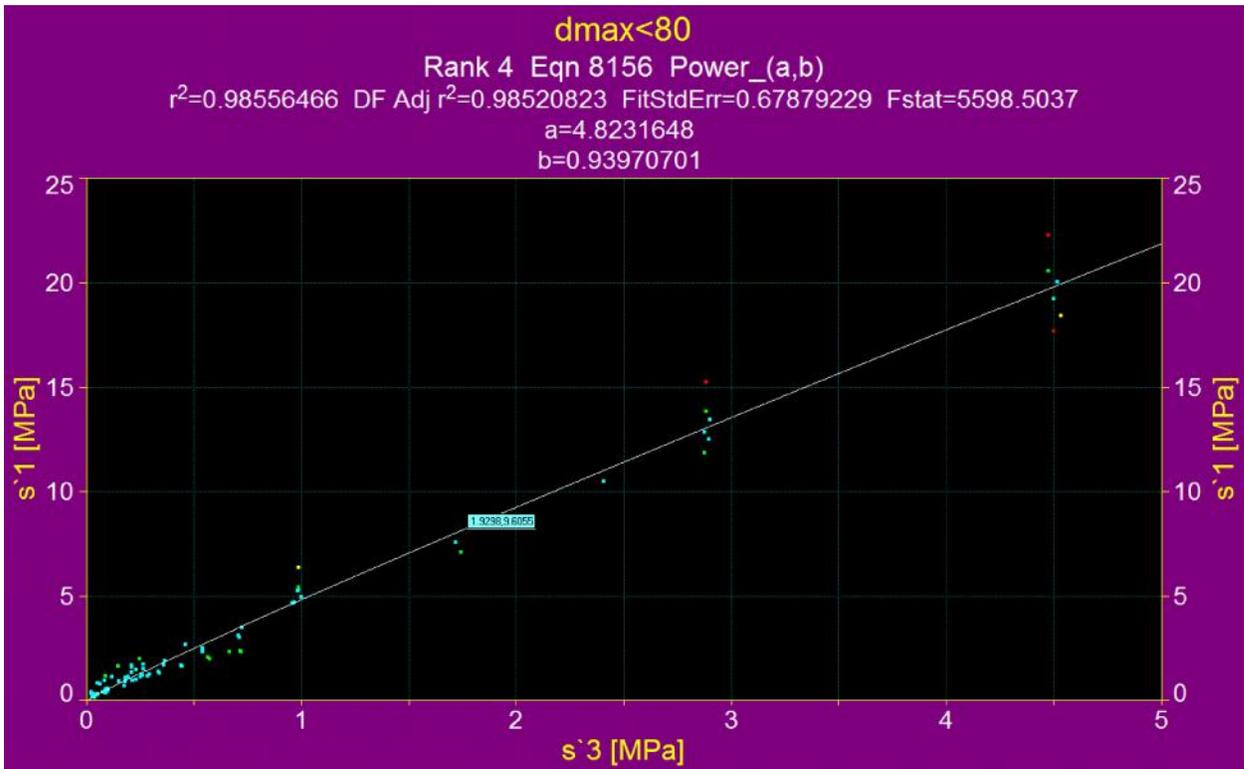
Anexo 7 – Granulometría Caso 2



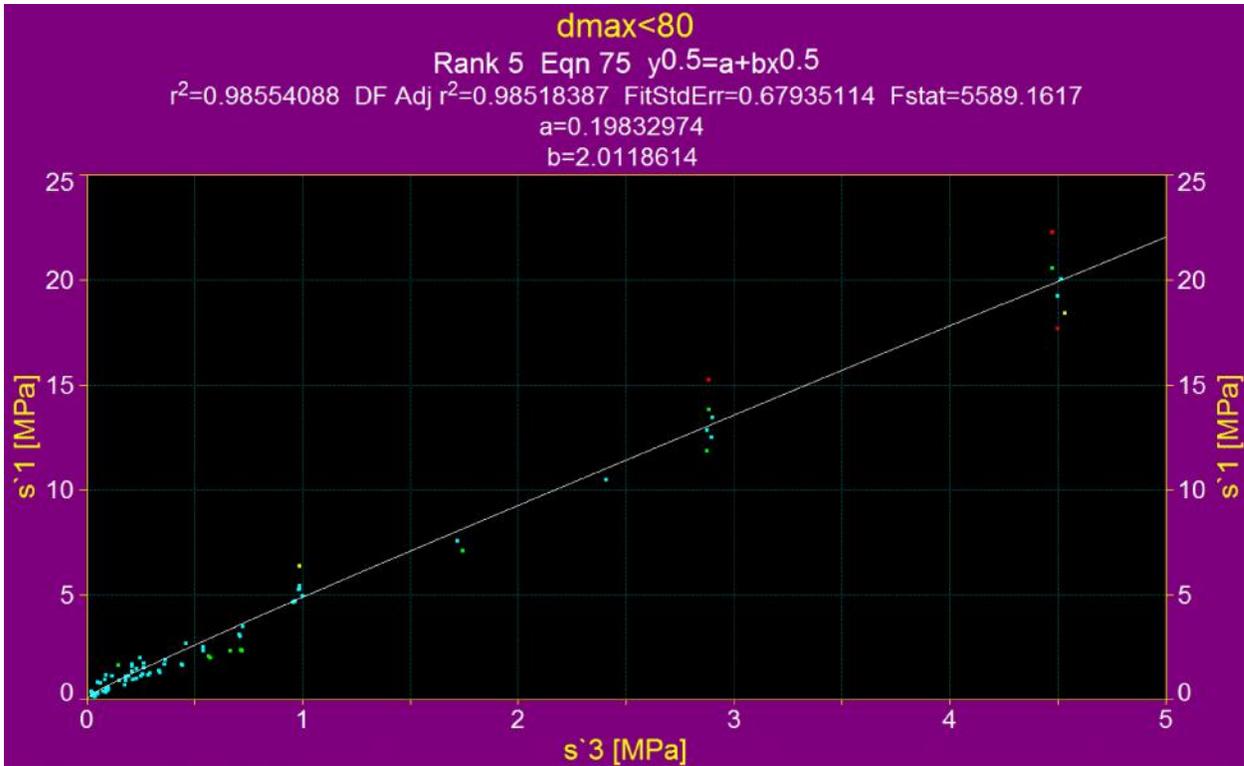
Anexo 8 – Caso 1, Escenario $d_{max}<80$ mm, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$



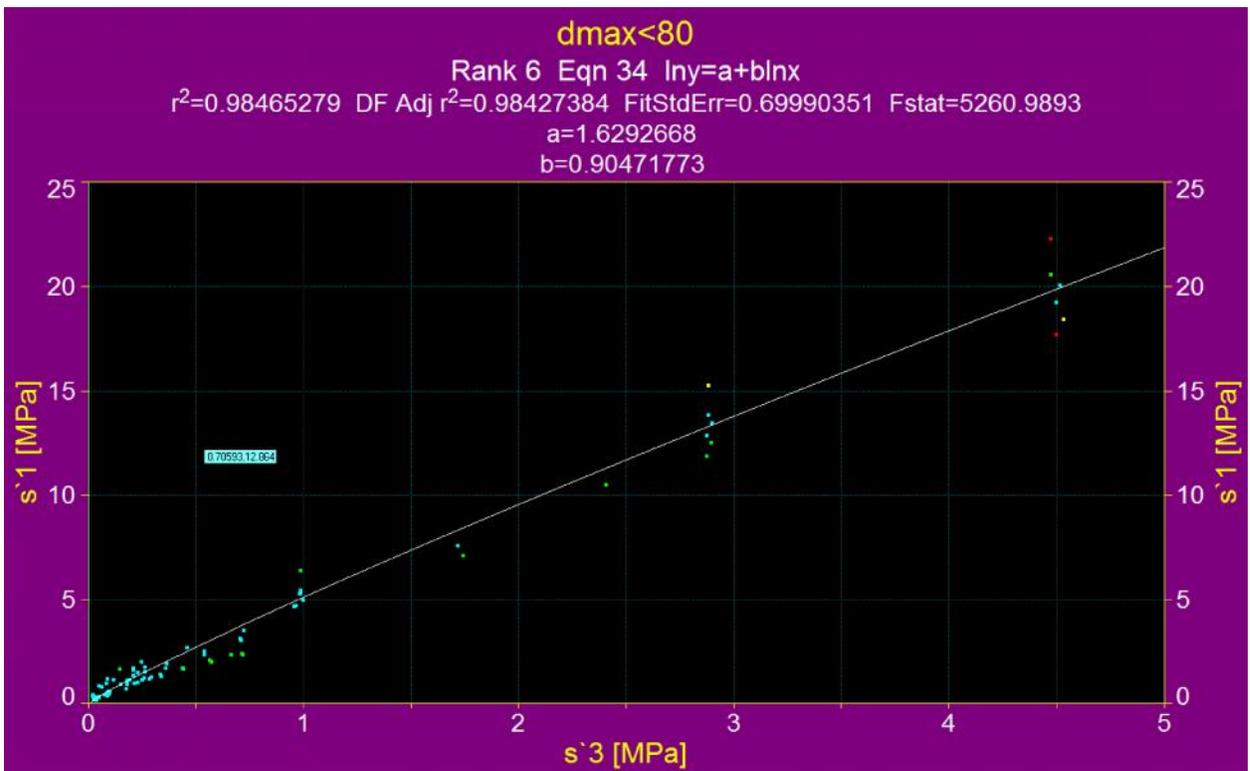
Anexo 9 - Caso 1, Escenario $d_{max}<80$ mm, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y=a+bex^c$



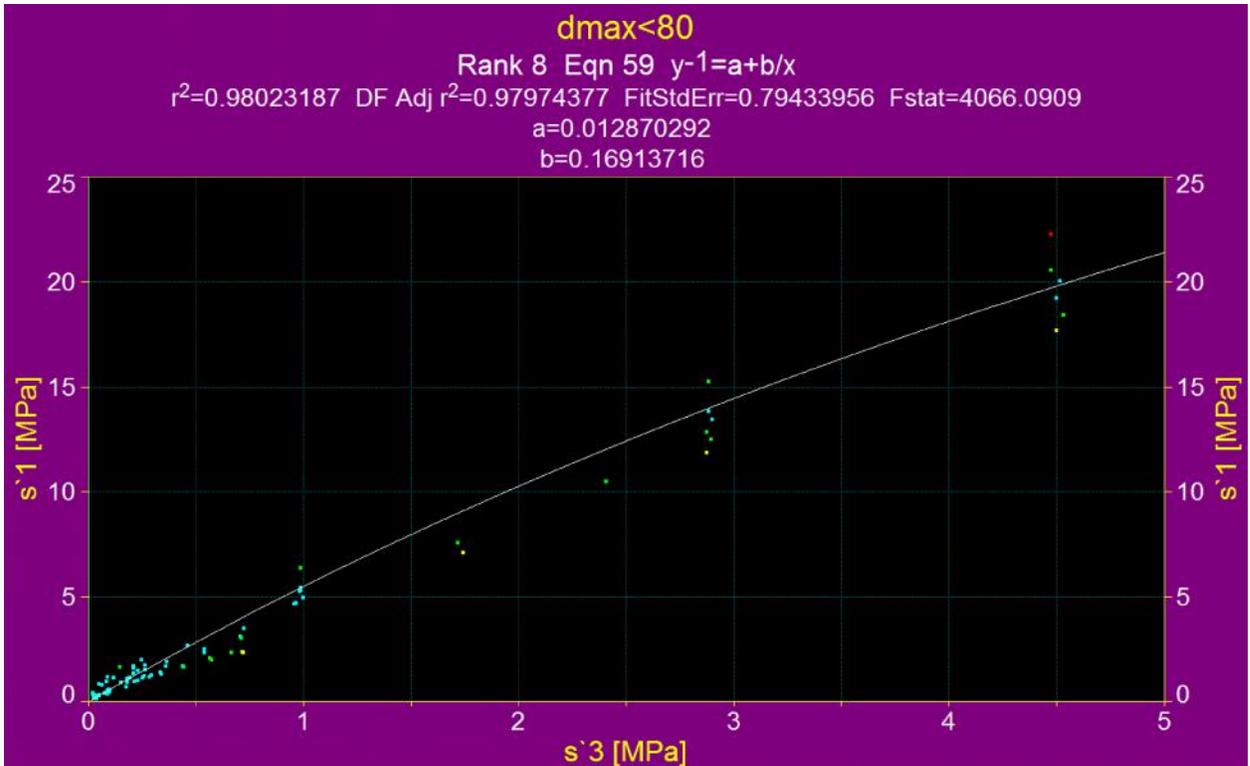
Anexo 10 - Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=ax^b$



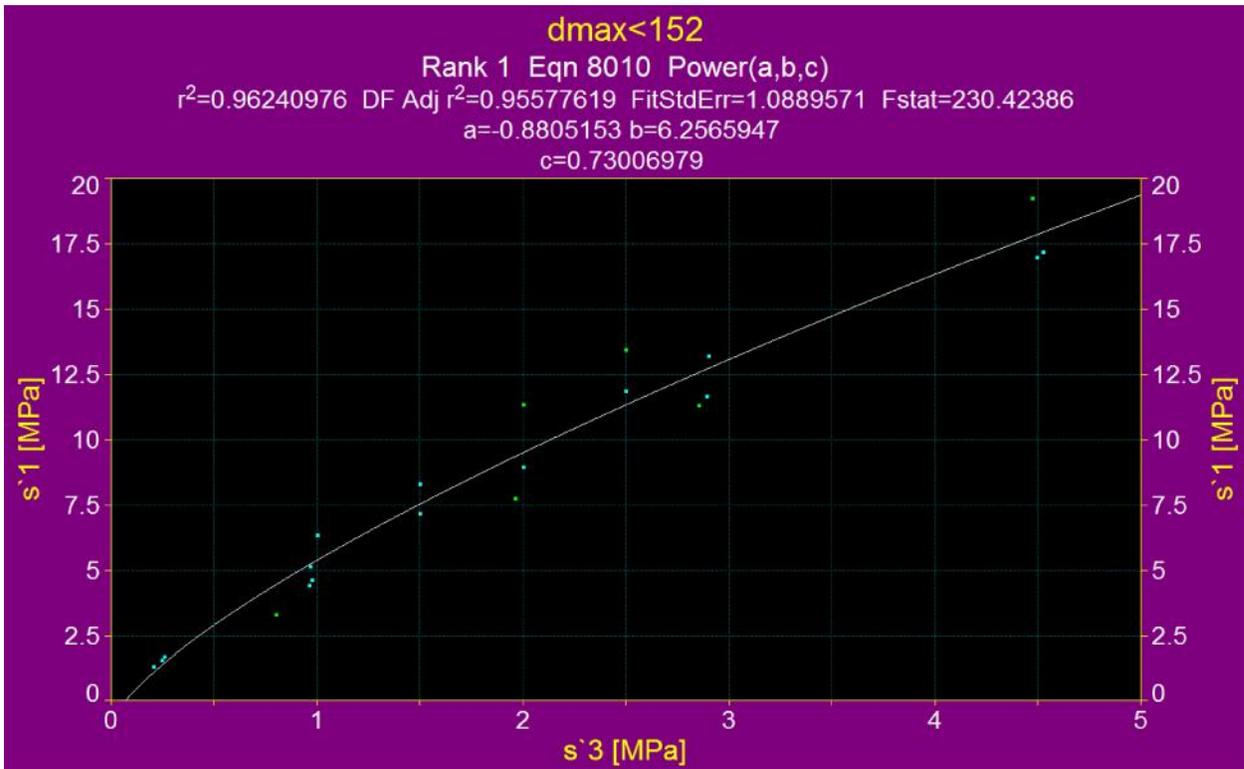
Anexo 11 - Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



Anexo 12 - Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y) = a + b \ln(x)$



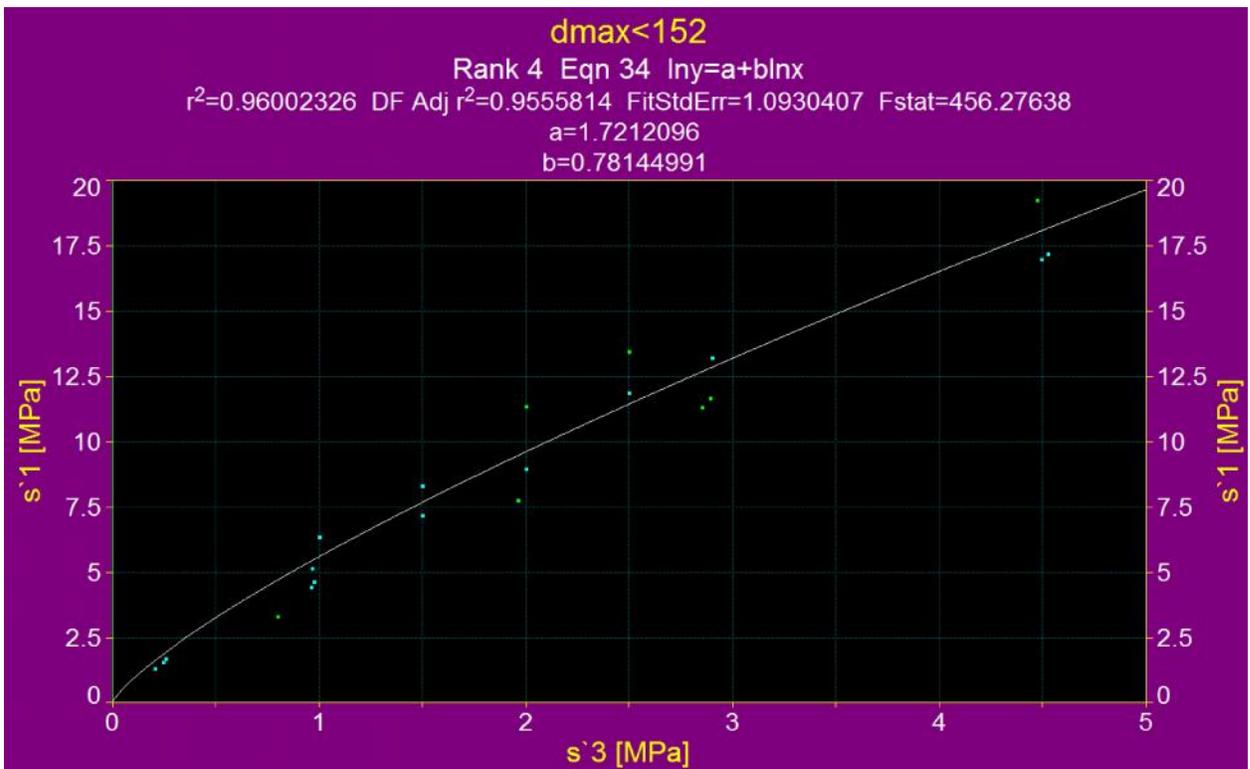
Anexo 13 - Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{-1} = a + b/x$



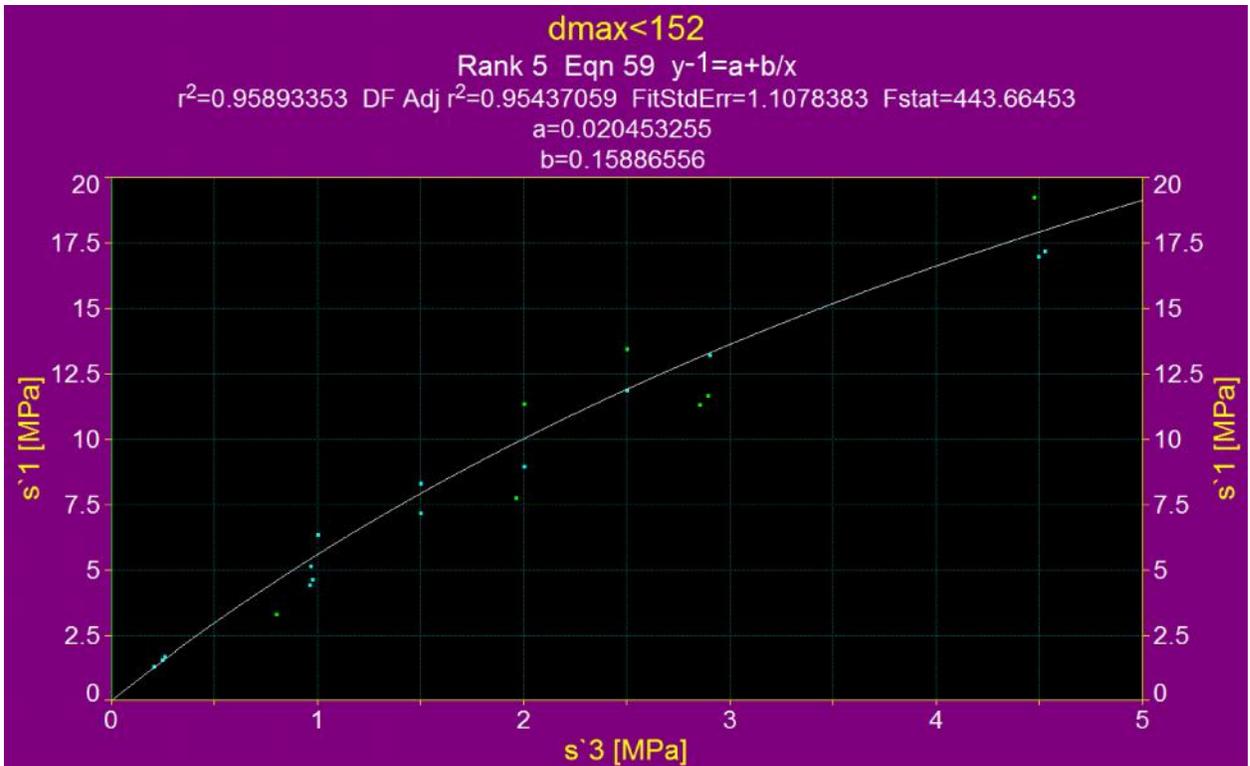
Anexo 14 - Caso 1, Escenario 80mm<dmax<152mm, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$



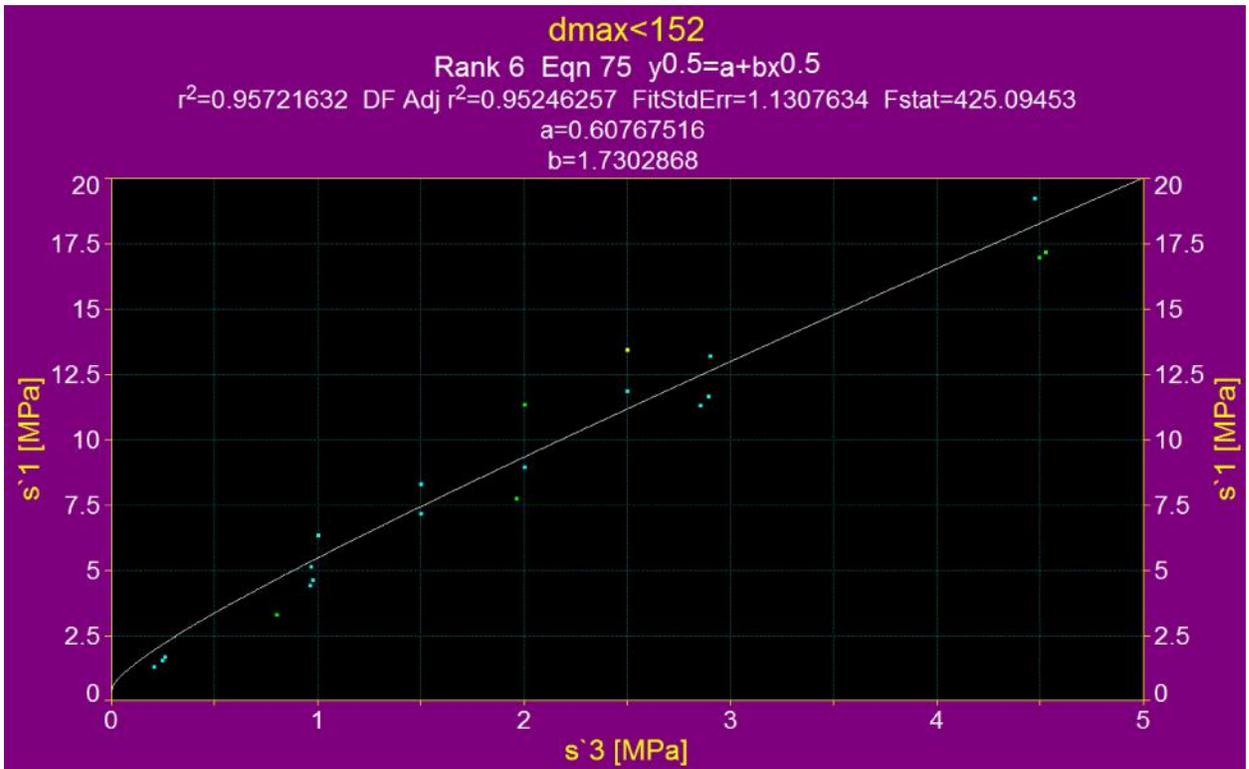
Anexo 15 - Caso 1, Escenario 80mm<dmax<152mm, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$



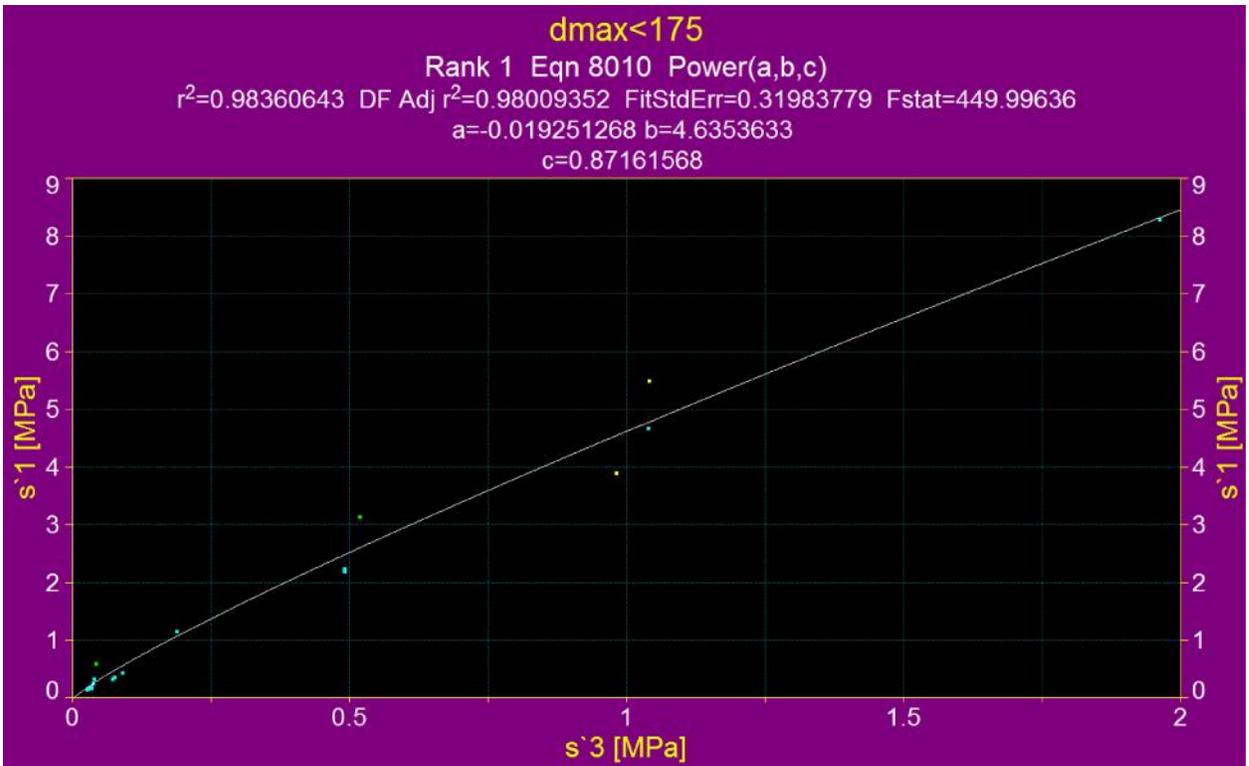
Anexo 16 - Caso 1, Escenario 80mm<dmax<152mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y) = a + \ln(x)$



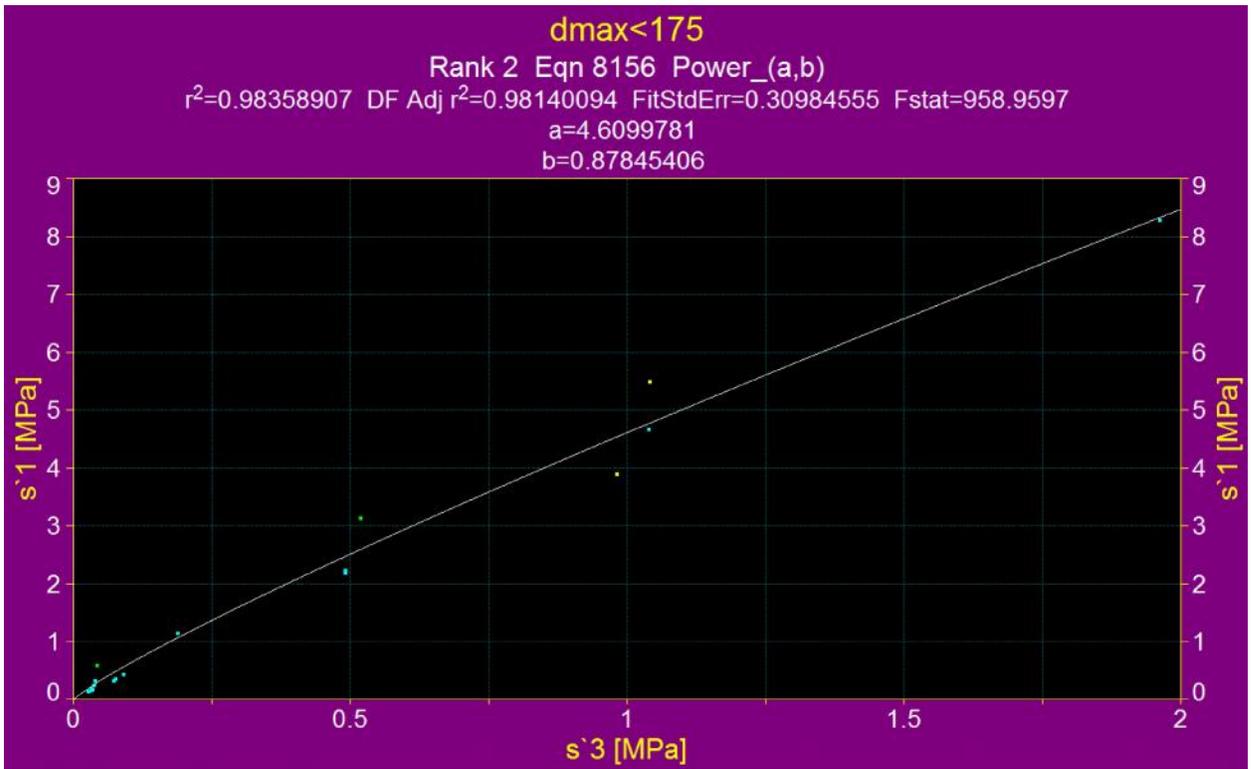
Anexo 17 - Caso 1, Escenario 80mm<dmax<152mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{-1} = a + b/x$



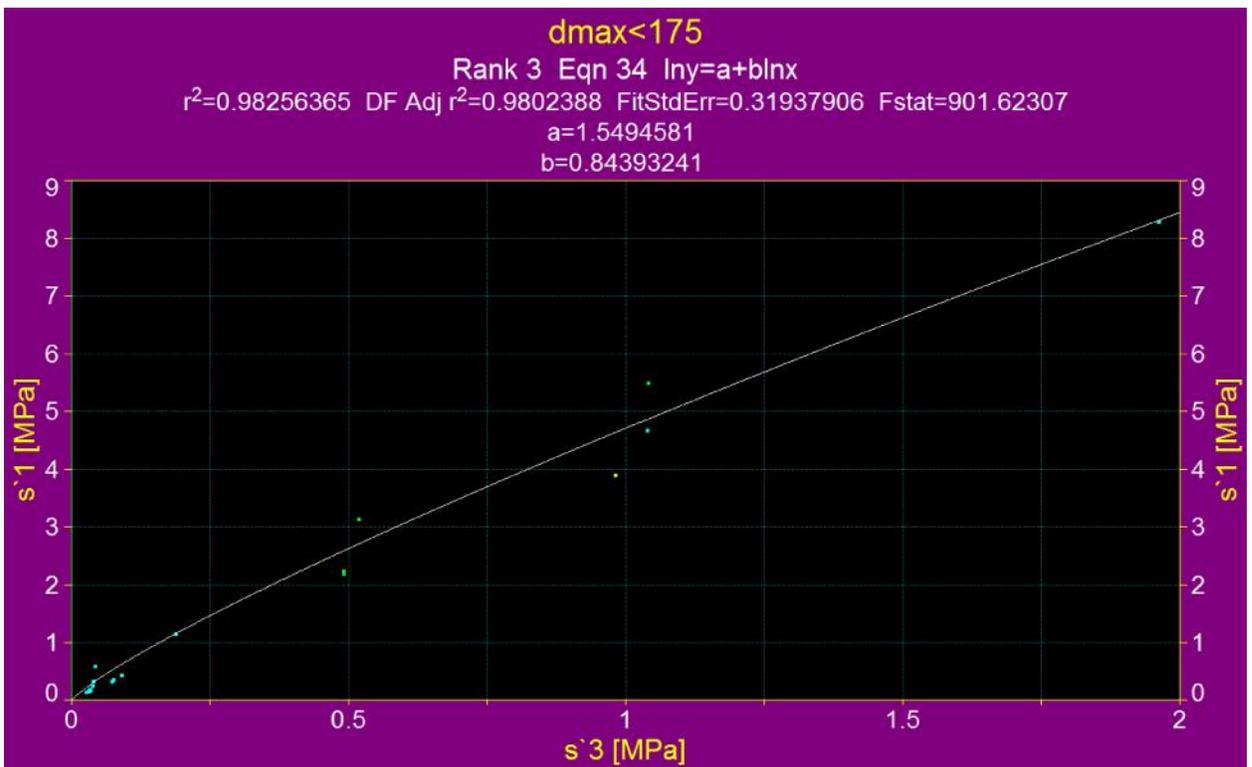
Anexo 18 - Caso 1, Escenario 80mm<dmax<152mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$



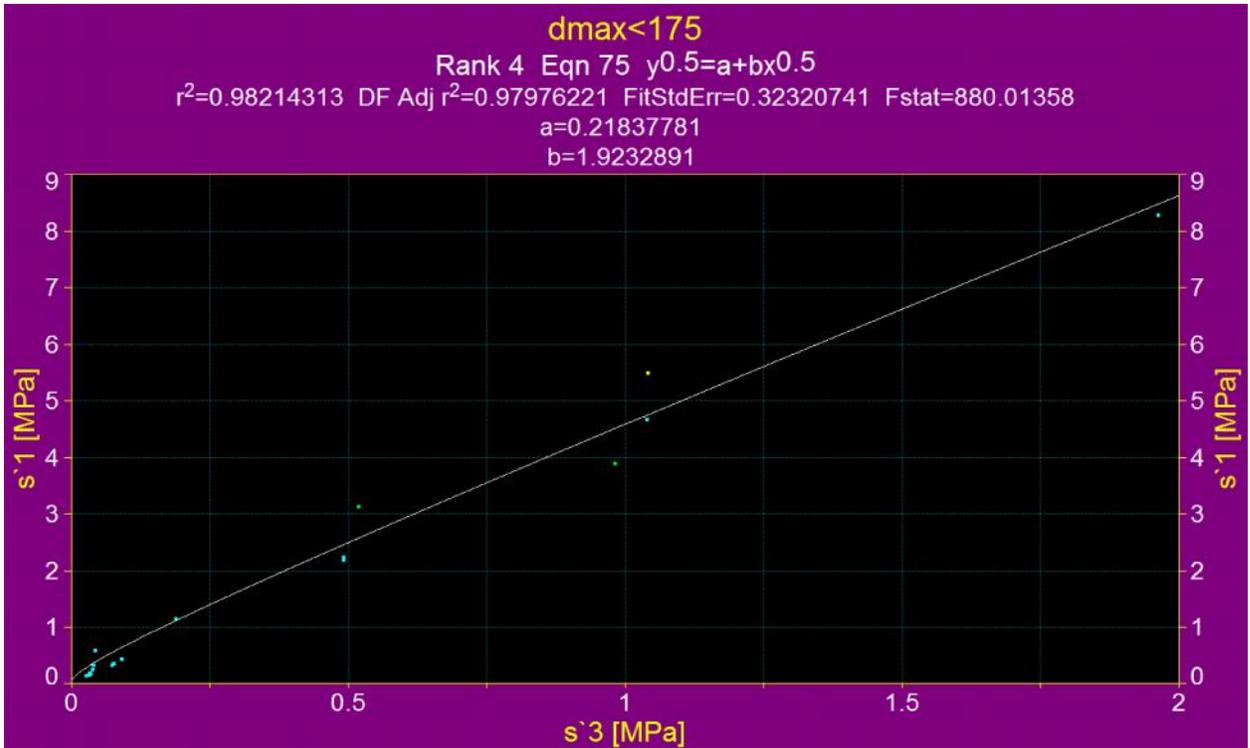
Anexo 19 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+be^{xc}$



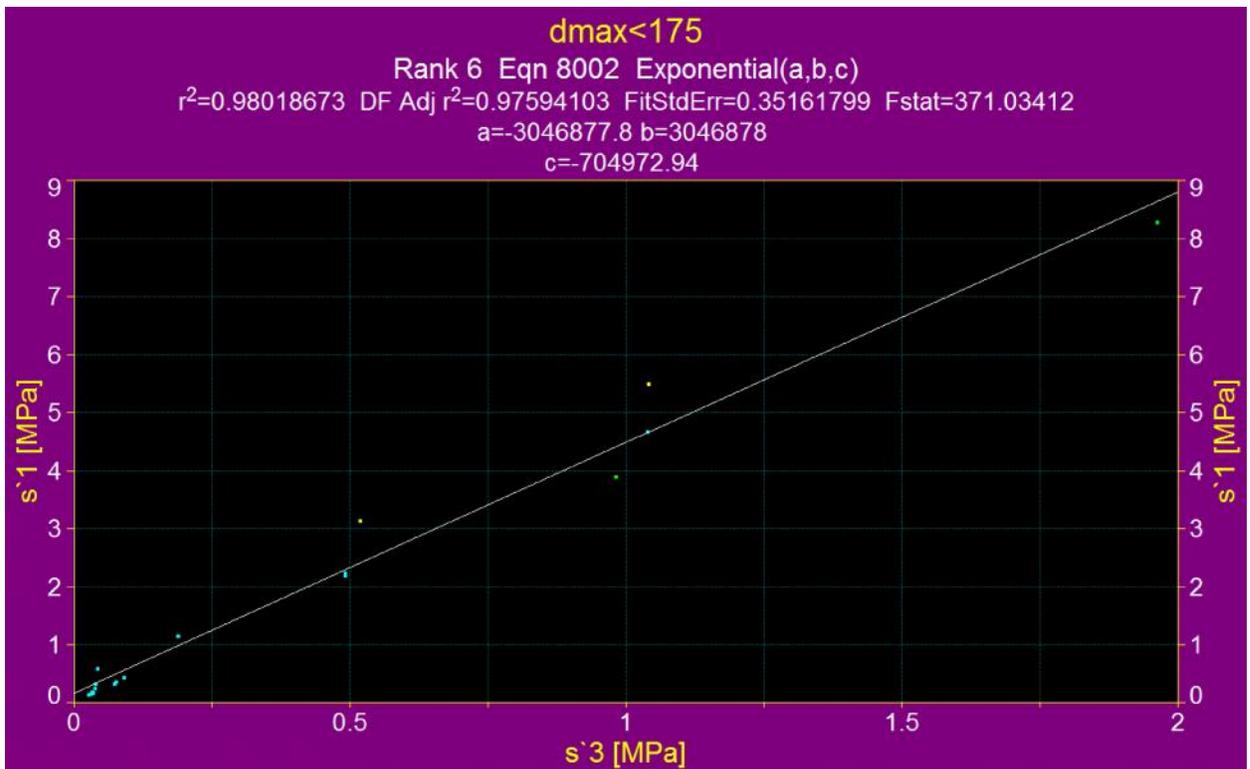
Anexo 20 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$



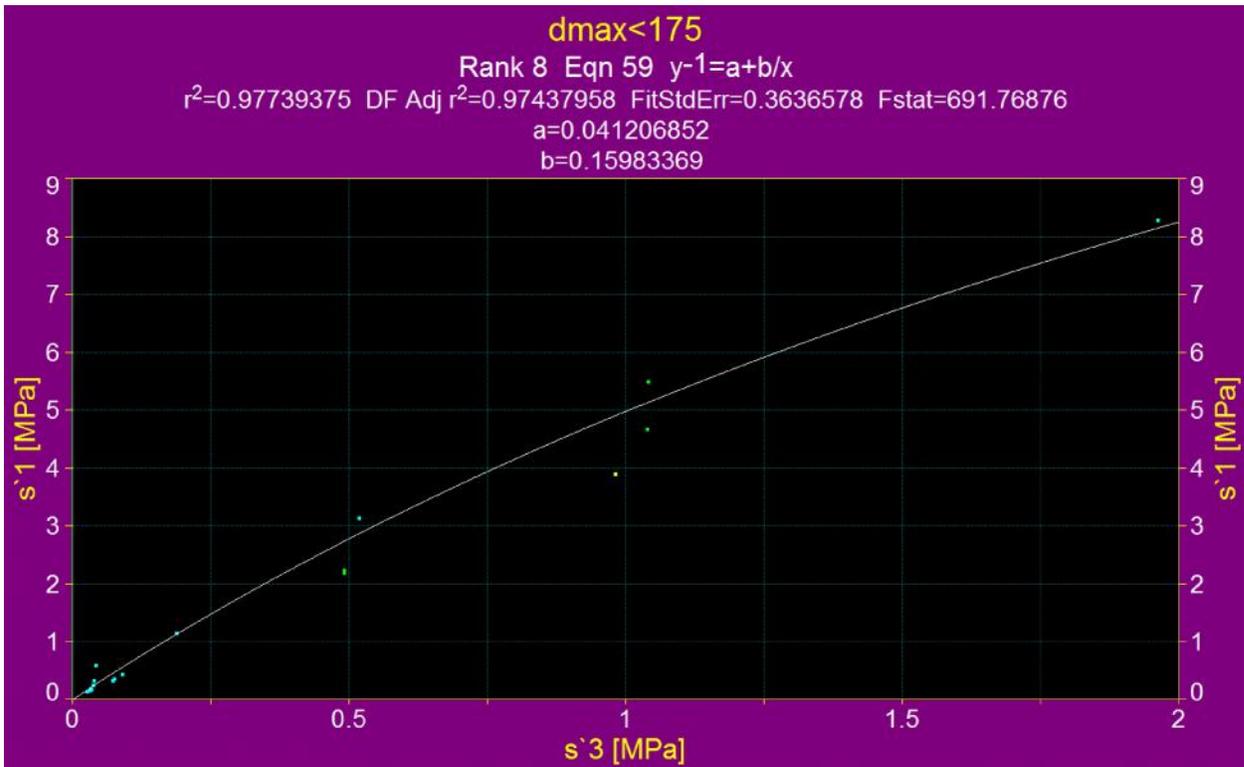
Anexo 21 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b \ln(x)$



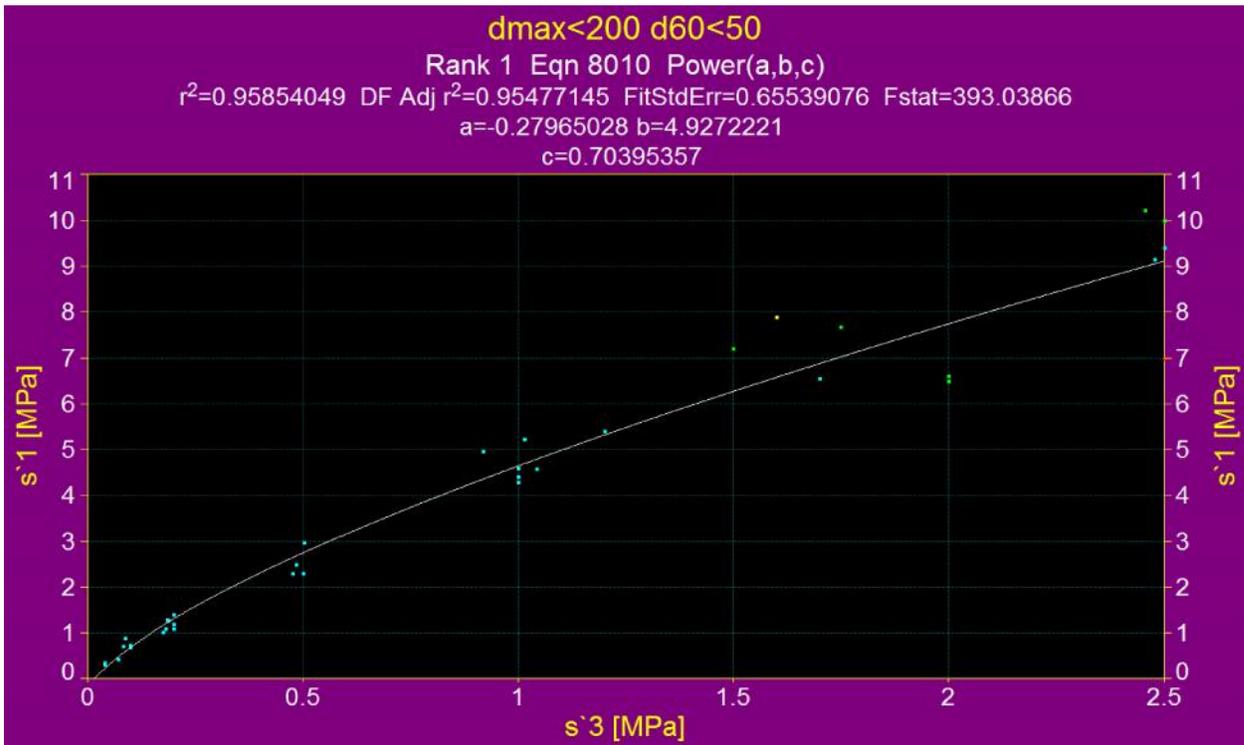
Anexo 22 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$



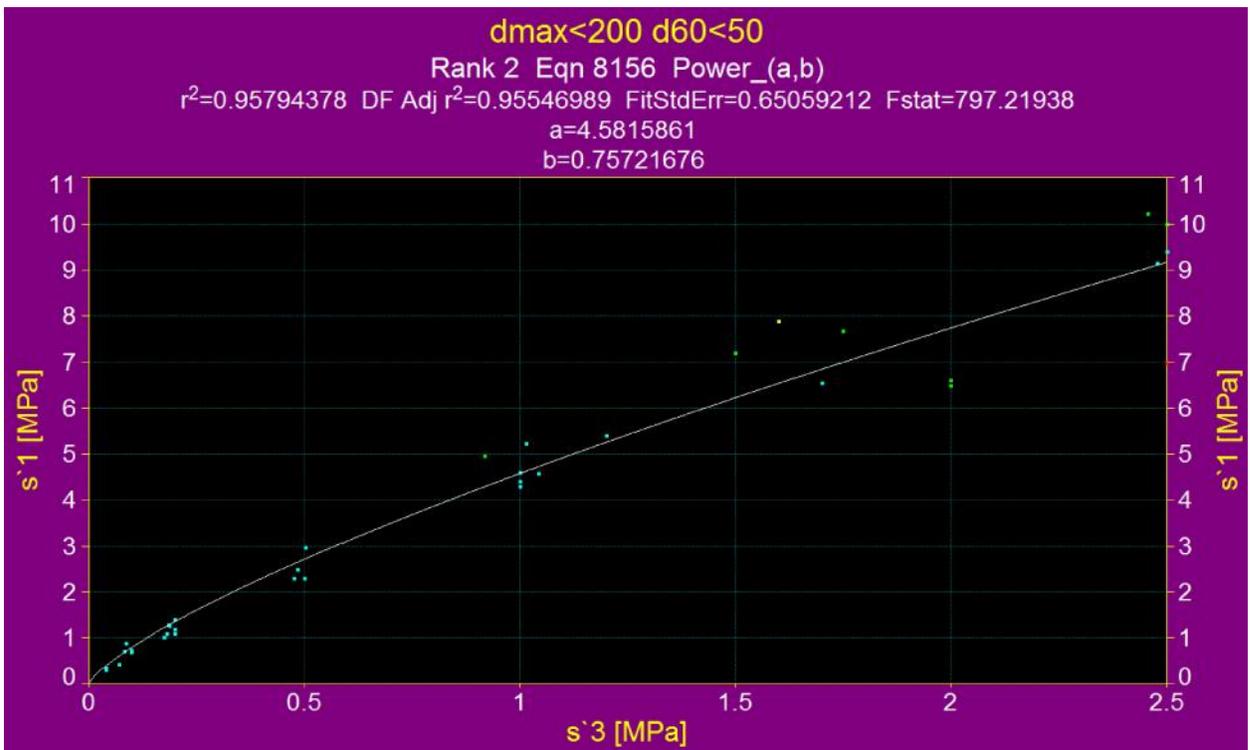
Anexo 23 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+be^{xc}$



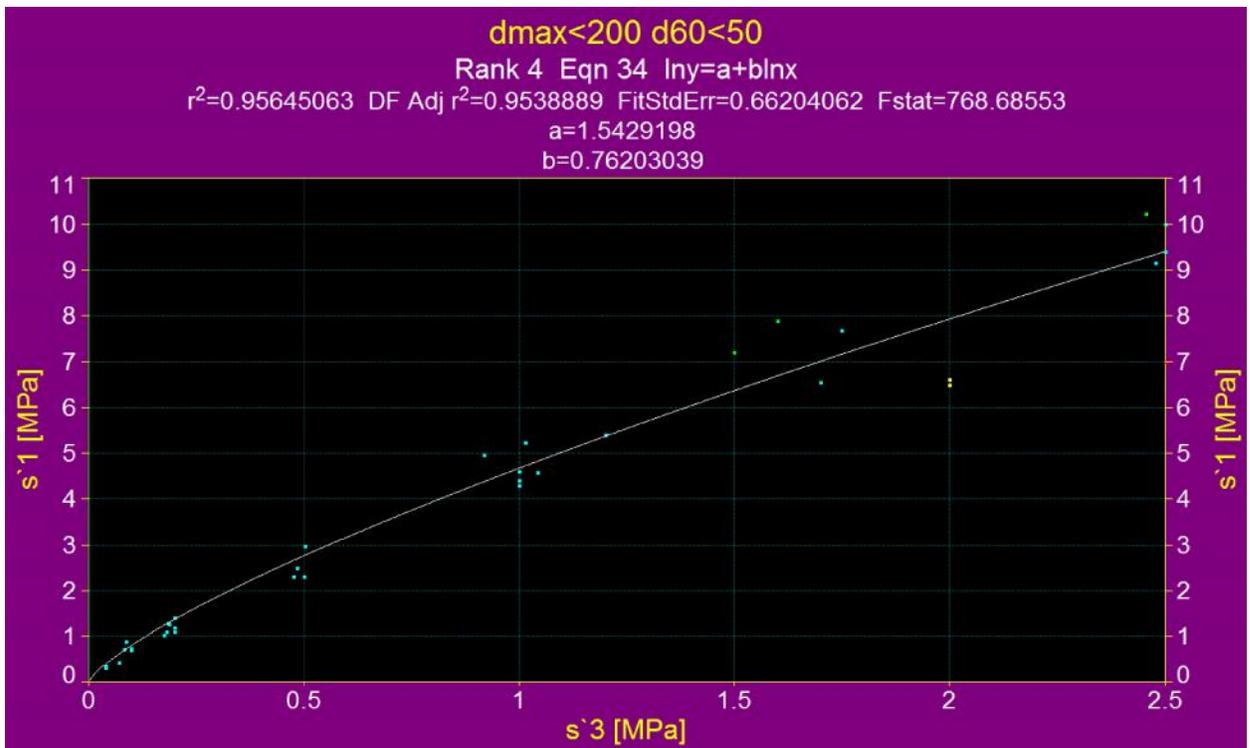
Anexo 24 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$



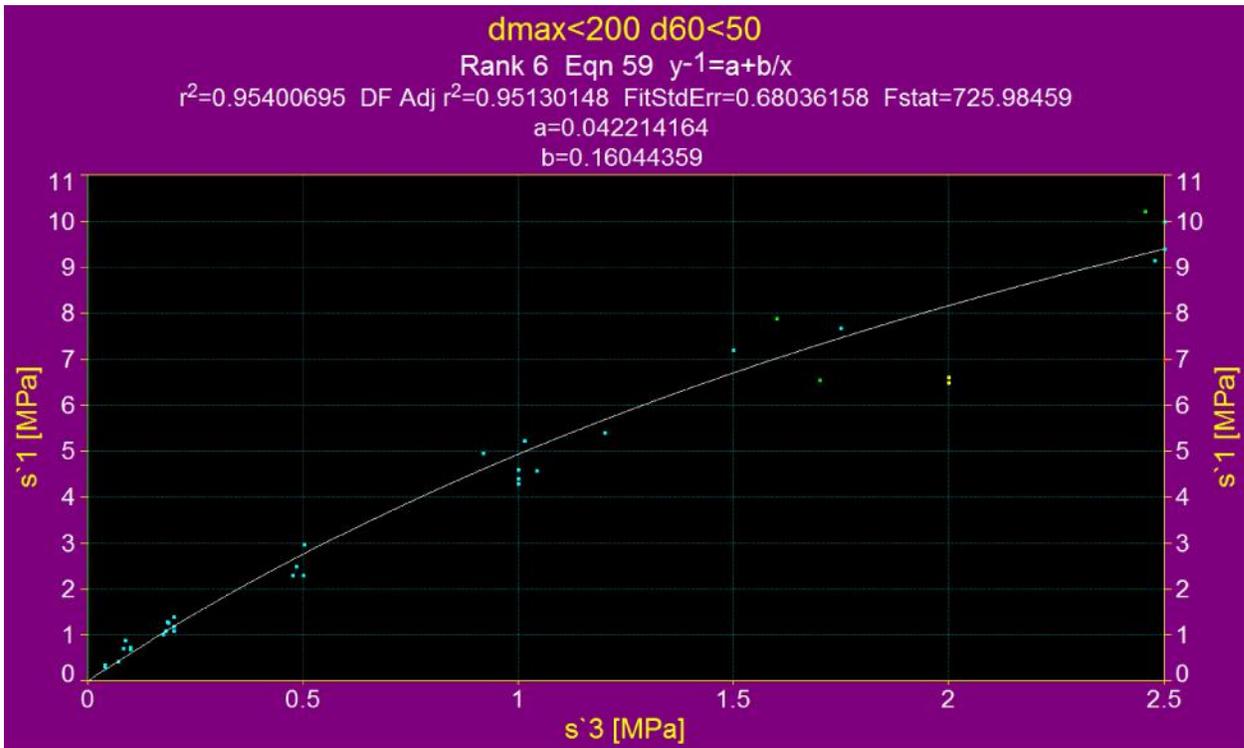
Anexo 25 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$



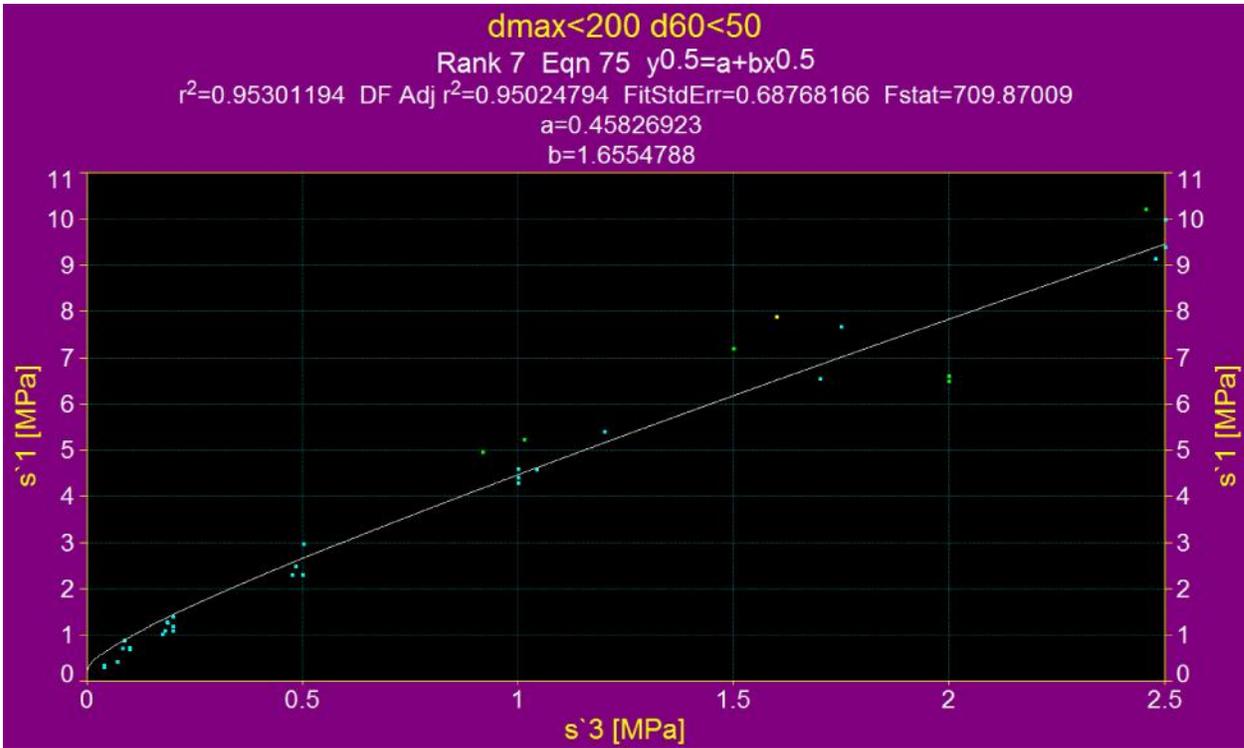
Anexo 26 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$



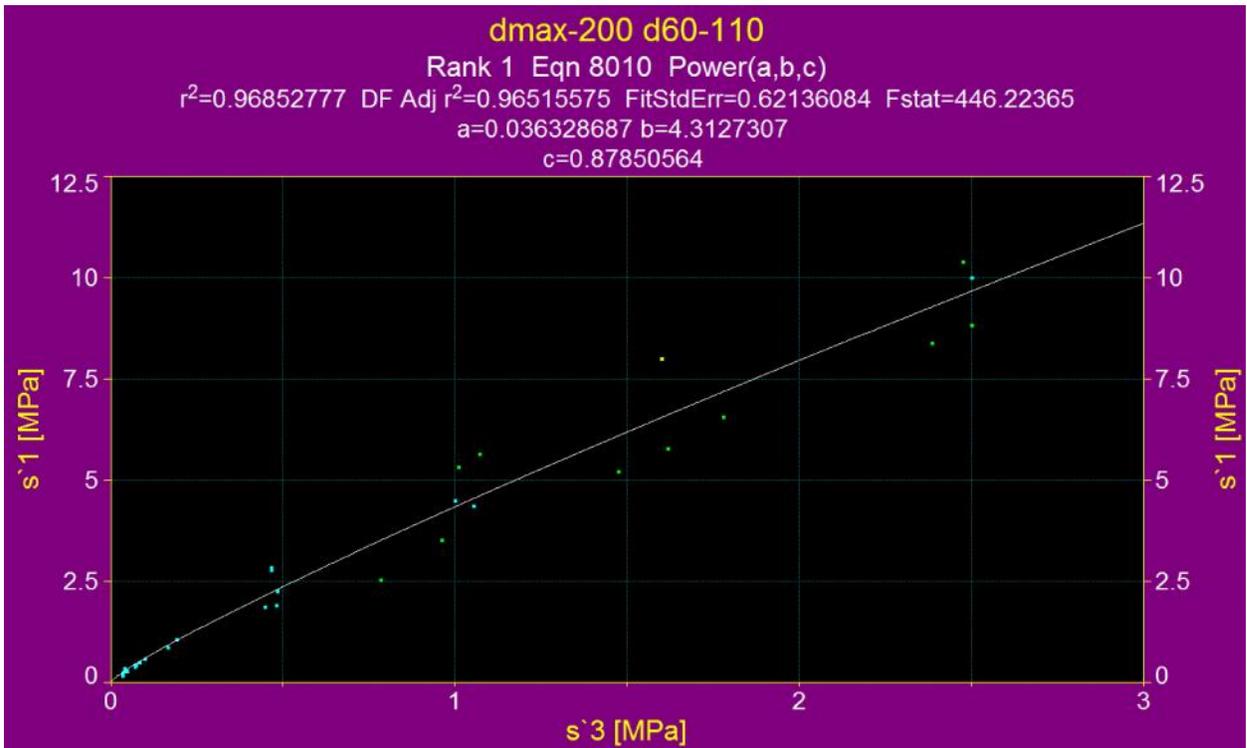
Anexo 27 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$



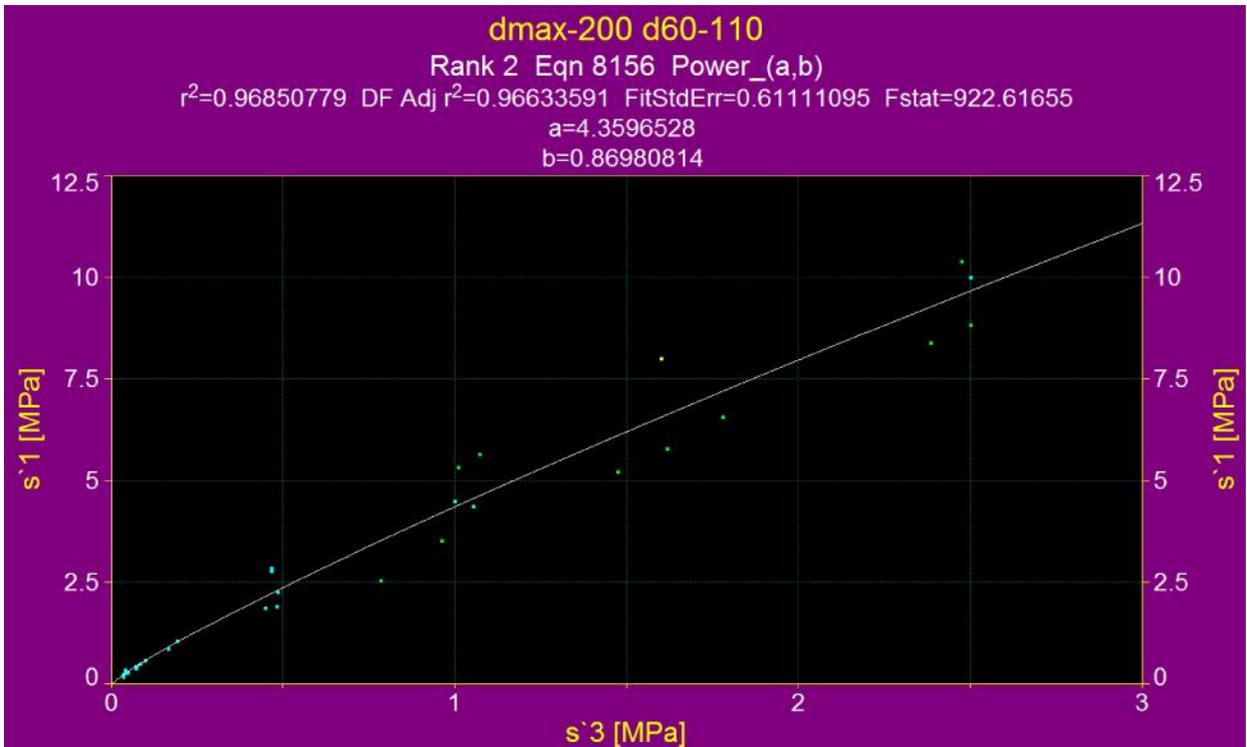
Anexo 28 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$



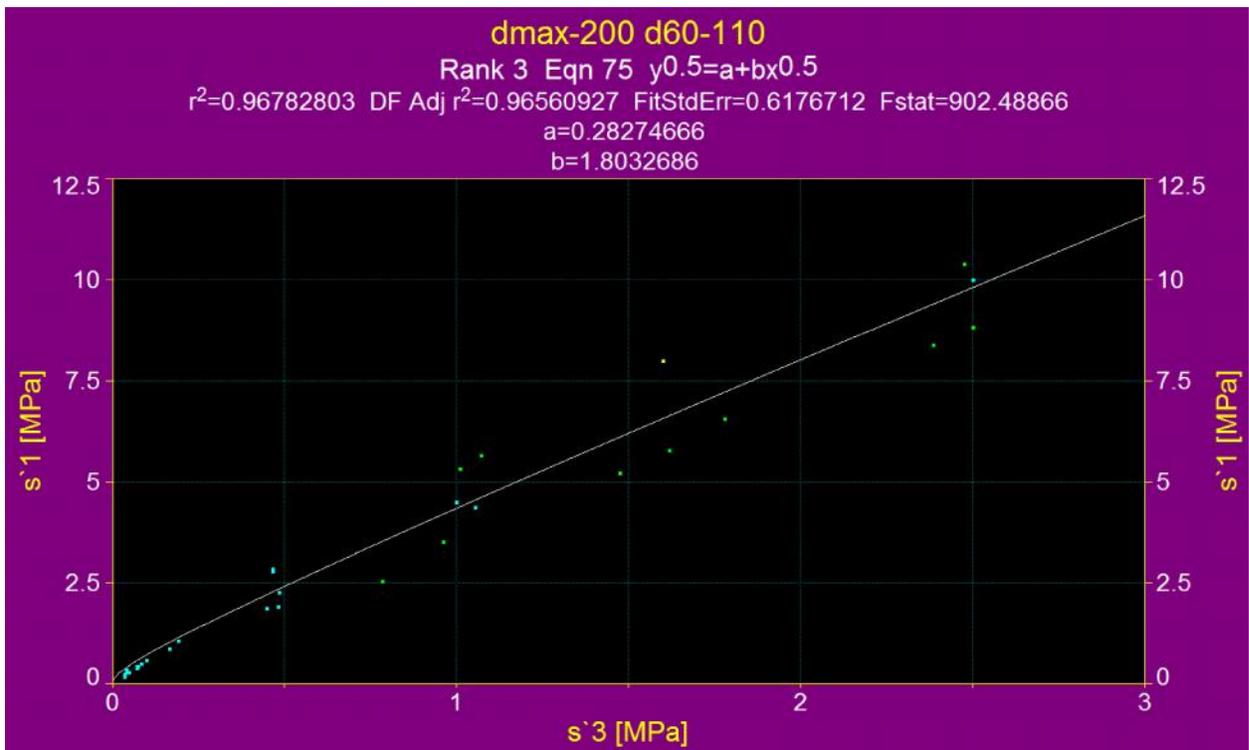
Anexo 29 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



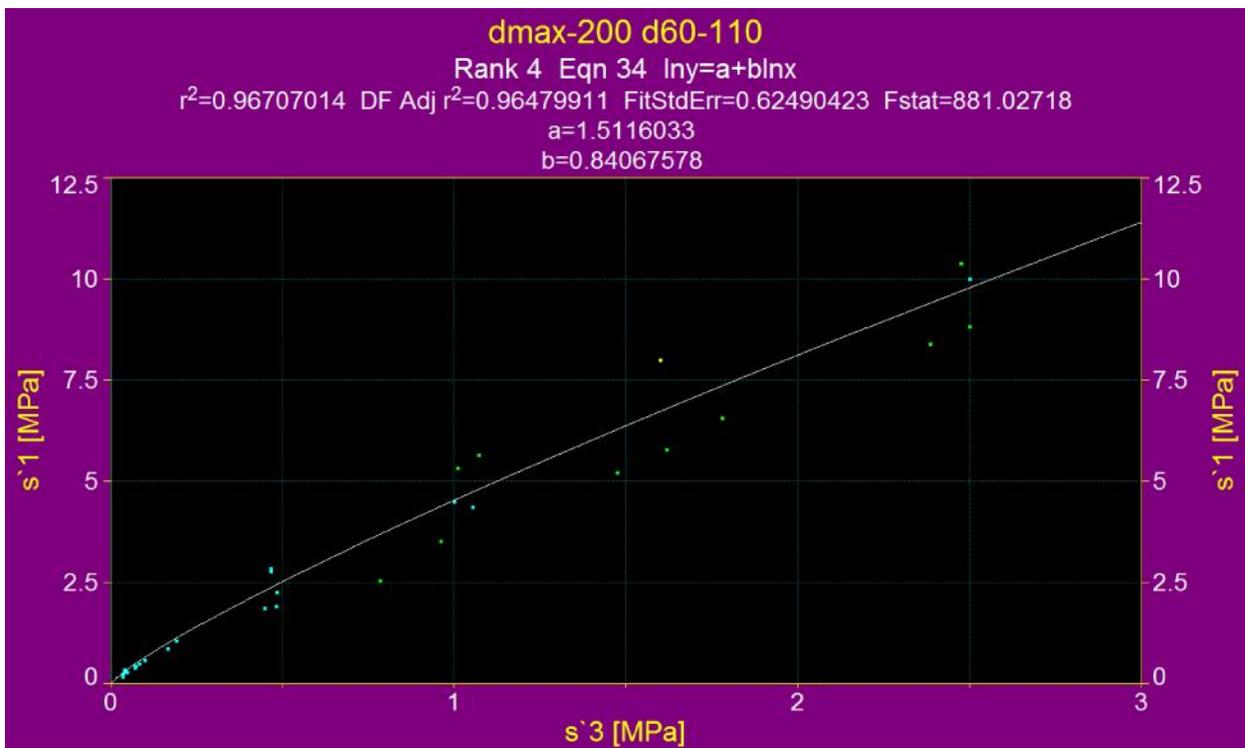
Anexo 30 - Caso 1, Escenario $175\text{mm} < d_{\text{max}} < 200\text{mm}$ y $d_{60} > 50$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+bx^c$



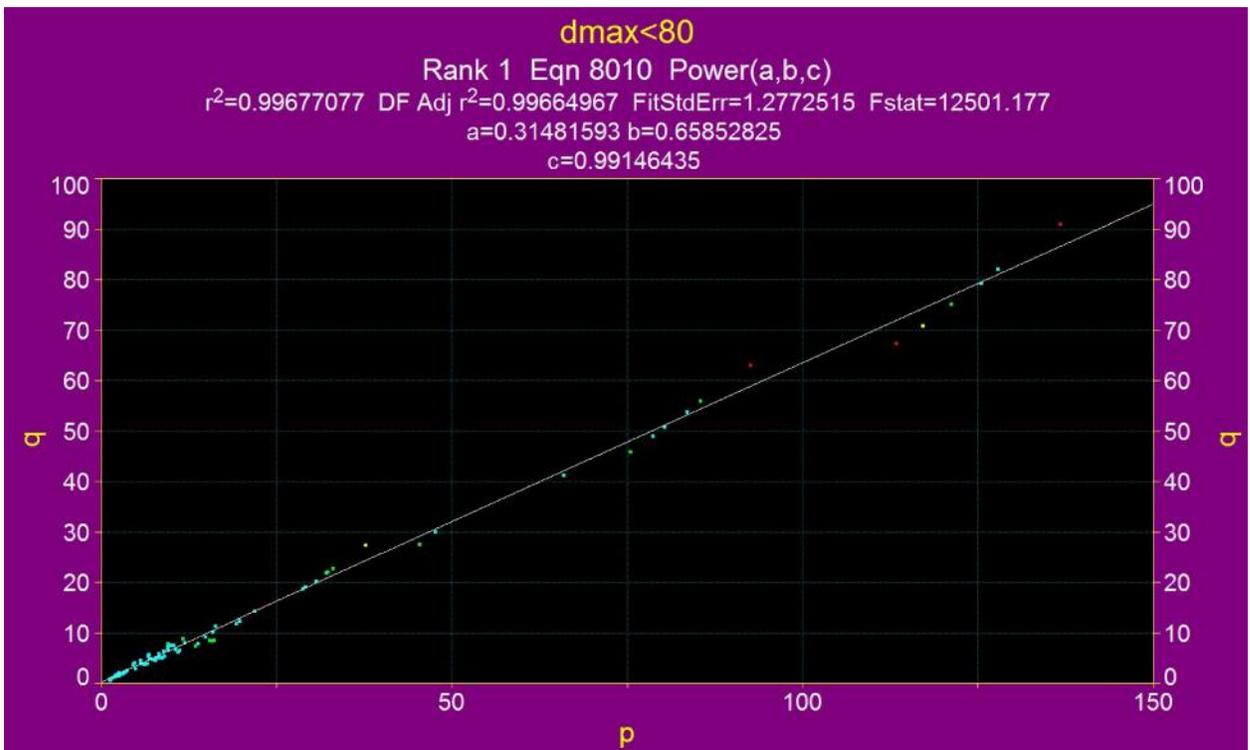
Anexo 31- Caso 1, Escenario $175\text{mm} < d_{\text{max}} < 200\text{mm}$ y $d_{60} > 50$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+x^b$



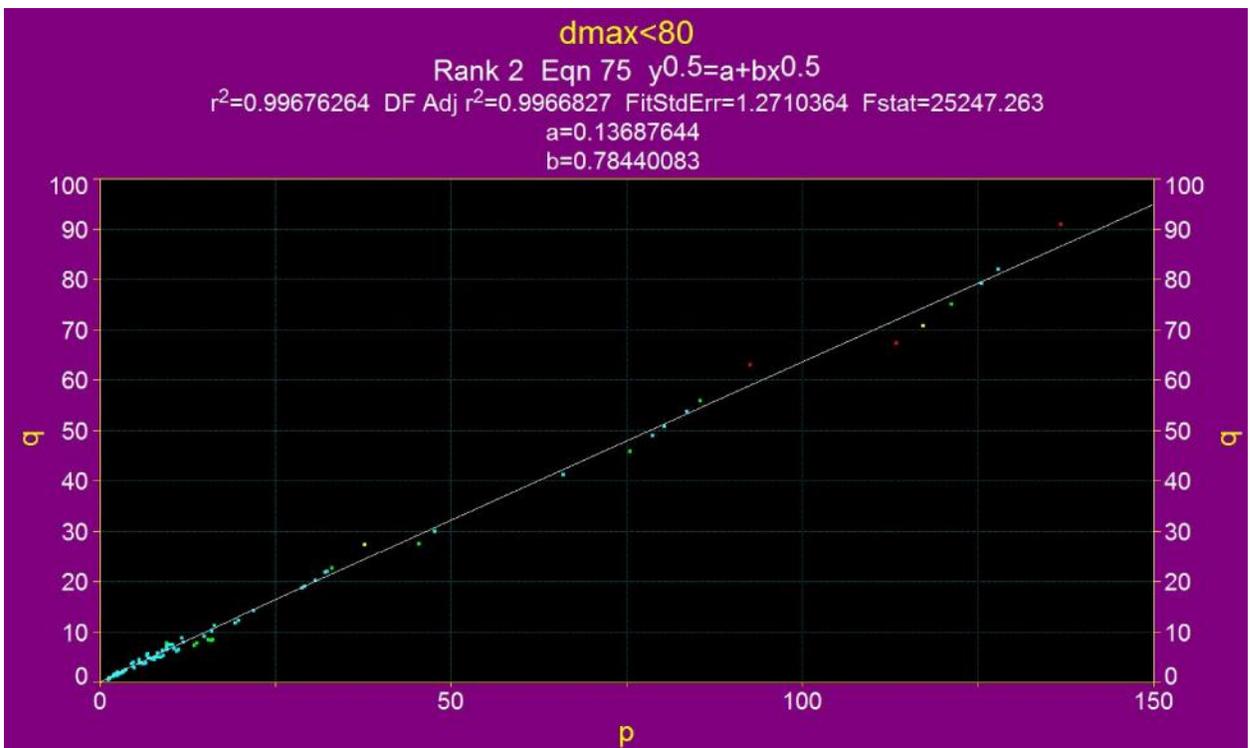
Anexo 32 - Caso 1, Escenario $175\text{mm} < d_{\text{max}} < 200\text{mm}$ y $d_{60} > 50$, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+ bx^{0.5}$



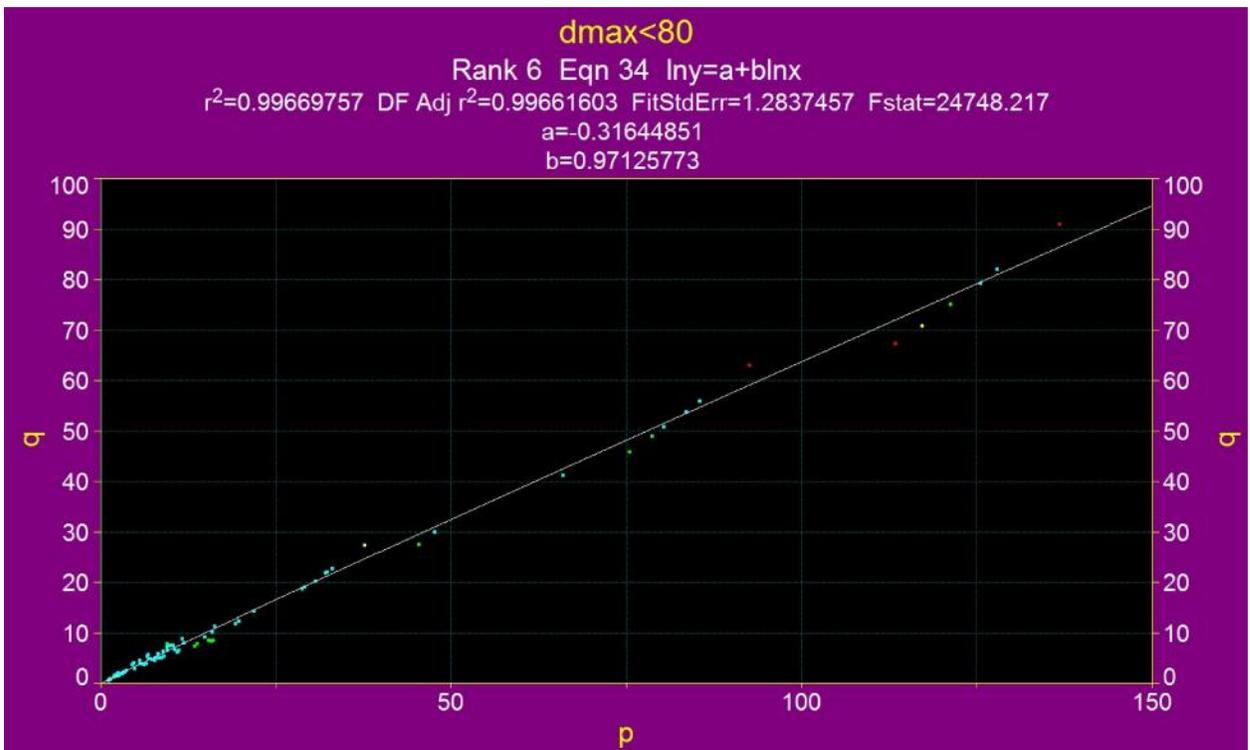
Anexo 33 - Caso 1, Escenario $175\text{mm} < d_{\text{max}} < 200\text{mm}$ y $d_{60} > 50$, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$



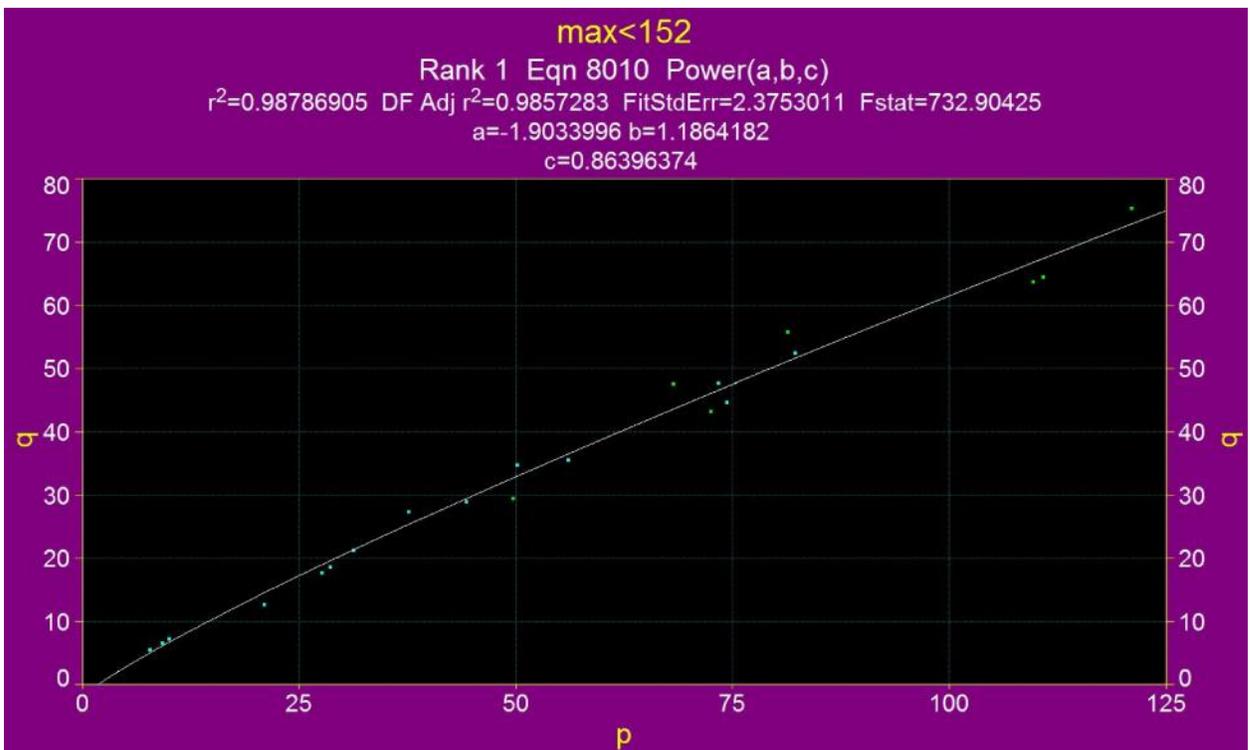
Anexo 34 – Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx$



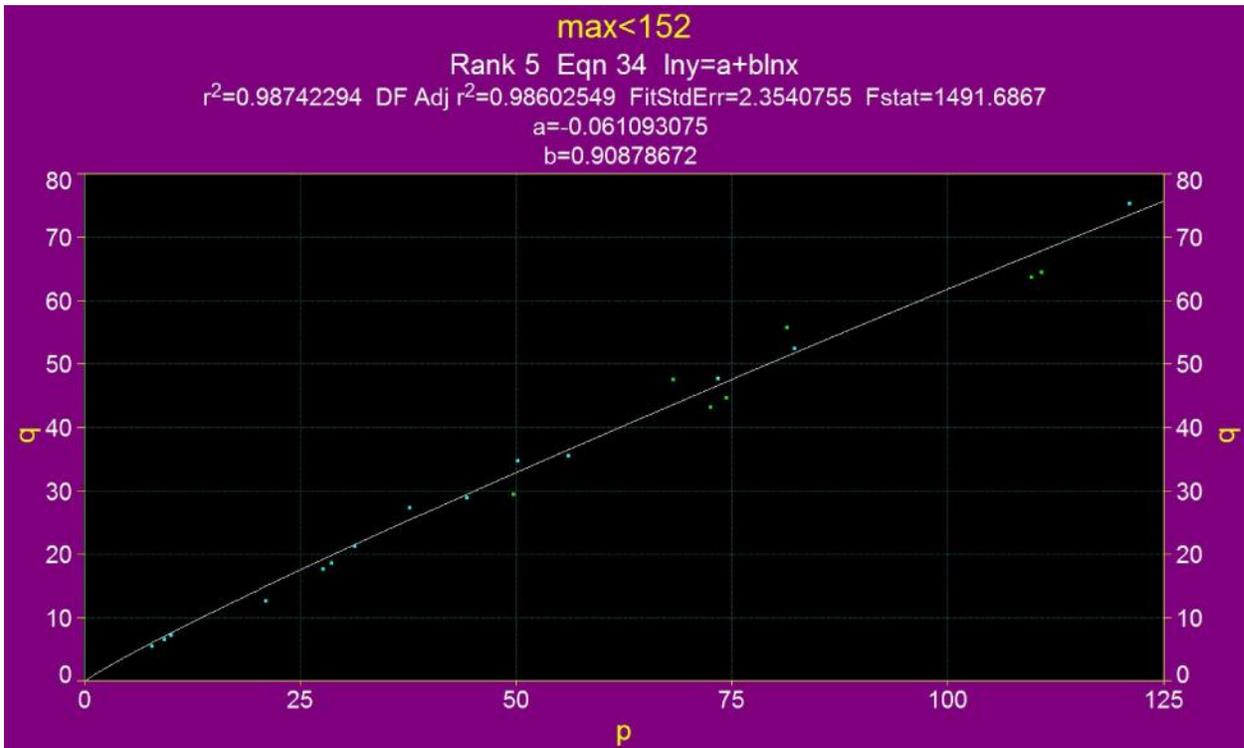
Anexo 35 - Caso 1, Escenario dmax<80mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



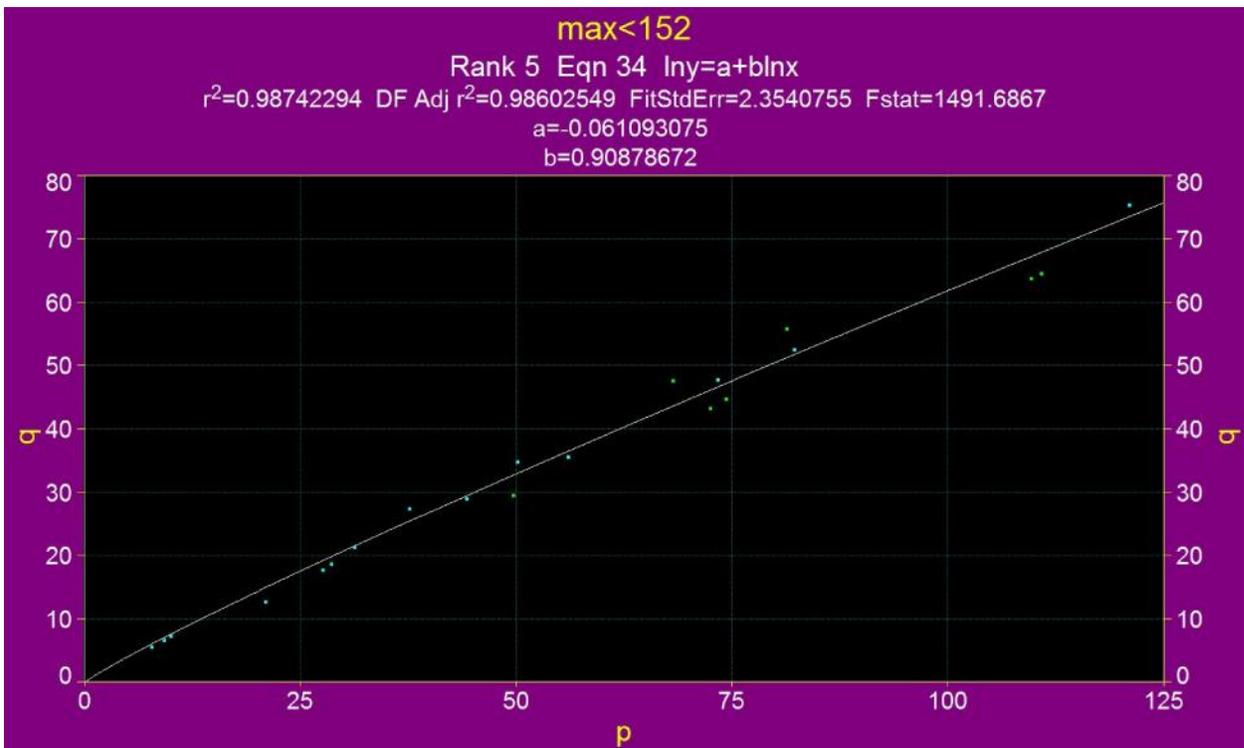
Anexo 36 - Caso 1, Escenario $d_{max} < 80\text{mm}$, espacio p vs \ddagger_3 , Ajuste de forma $\ln(y) = a + b \ln(x)$



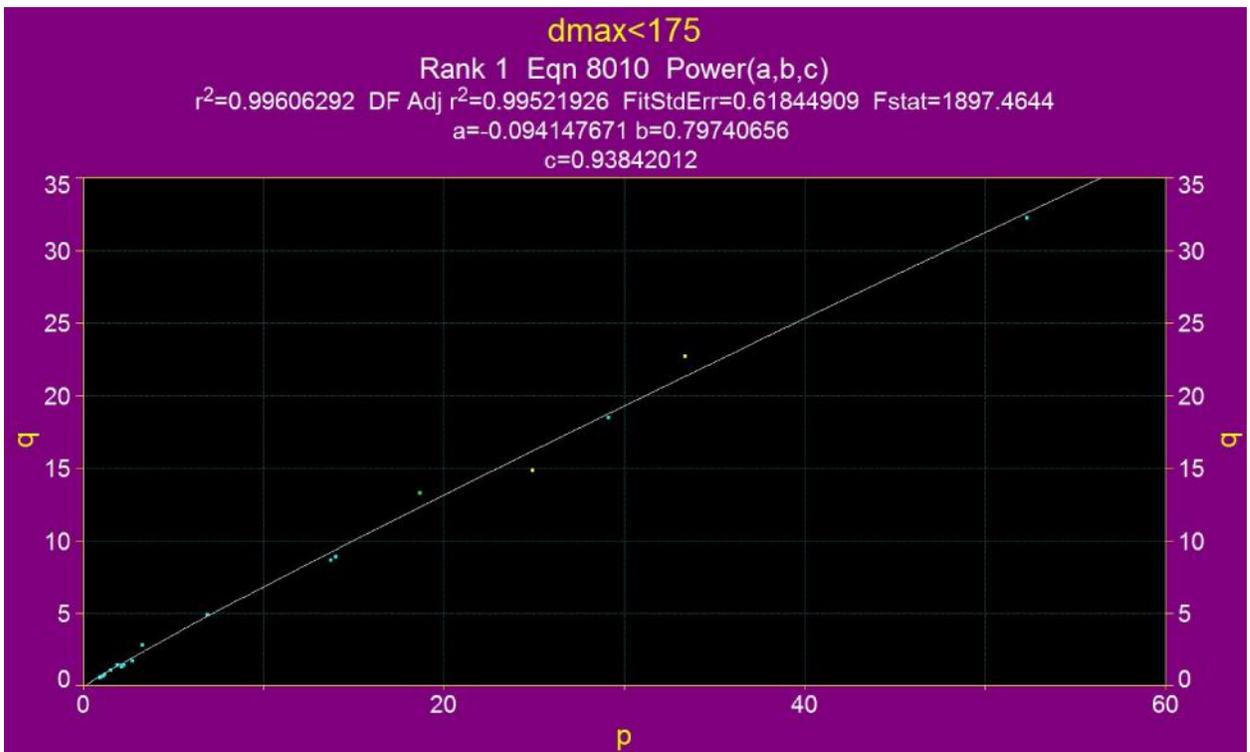
Anexo 37 - Caso 1, Escenario $80\text{mm} < d_{max} < 152\text{mm}$, espacio \ddagger_1 vs \ddagger_3 , Ajuste de forma $y = a + b x^c$



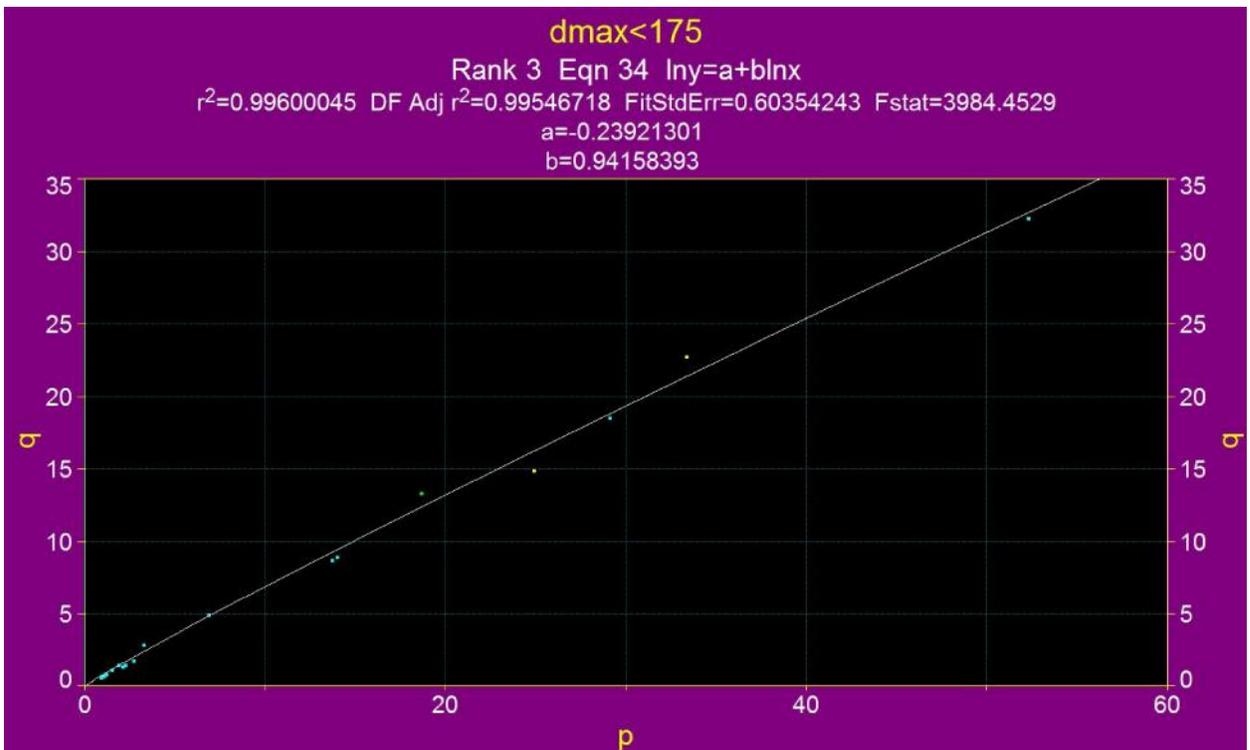
Anexo 38 - Caso 1, Escenario $80\text{mm} < d_{\text{max}} < 152\text{mm}$, espacio q vs p , Ajuste de forma $\ln(y) = a + \ln(x)$



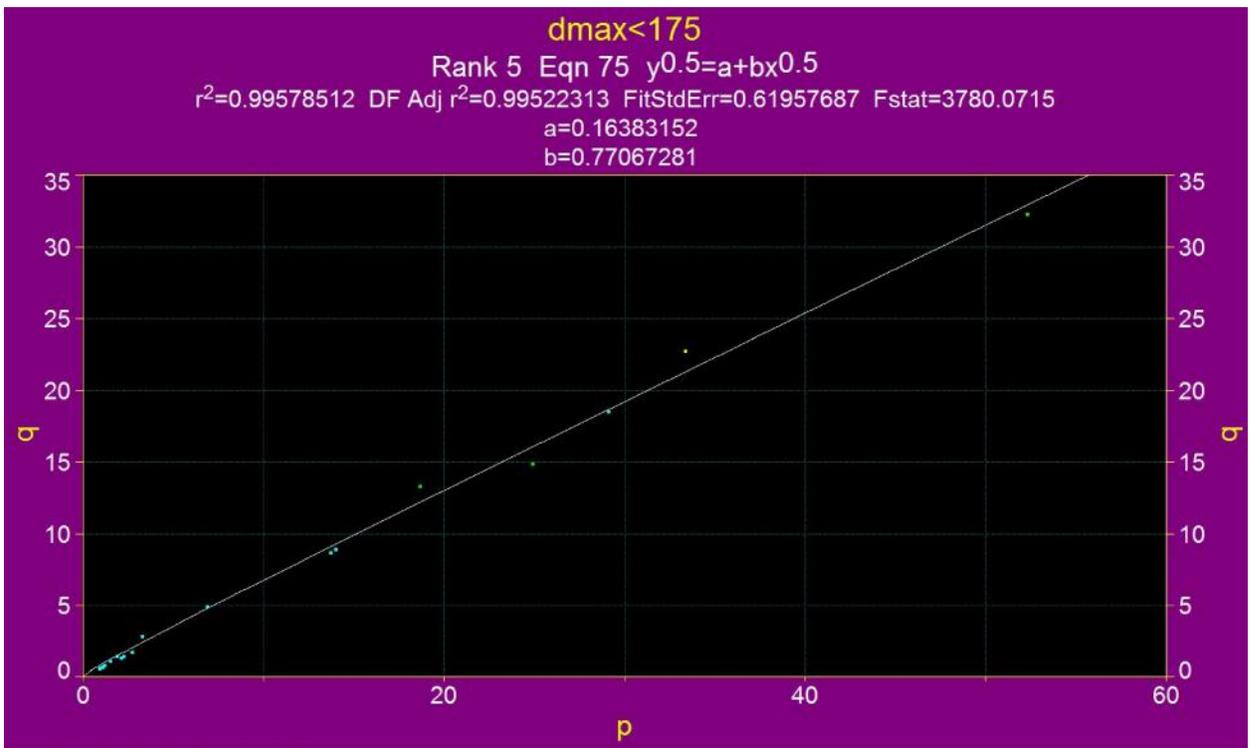
Anexo 39 - Caso 1, Escenario $80\text{mm} < d_{\text{max}} < 152\text{mm}$, espacio q vs p , Ajuste de forma $y^{0.5} = a + x^{0.5}$



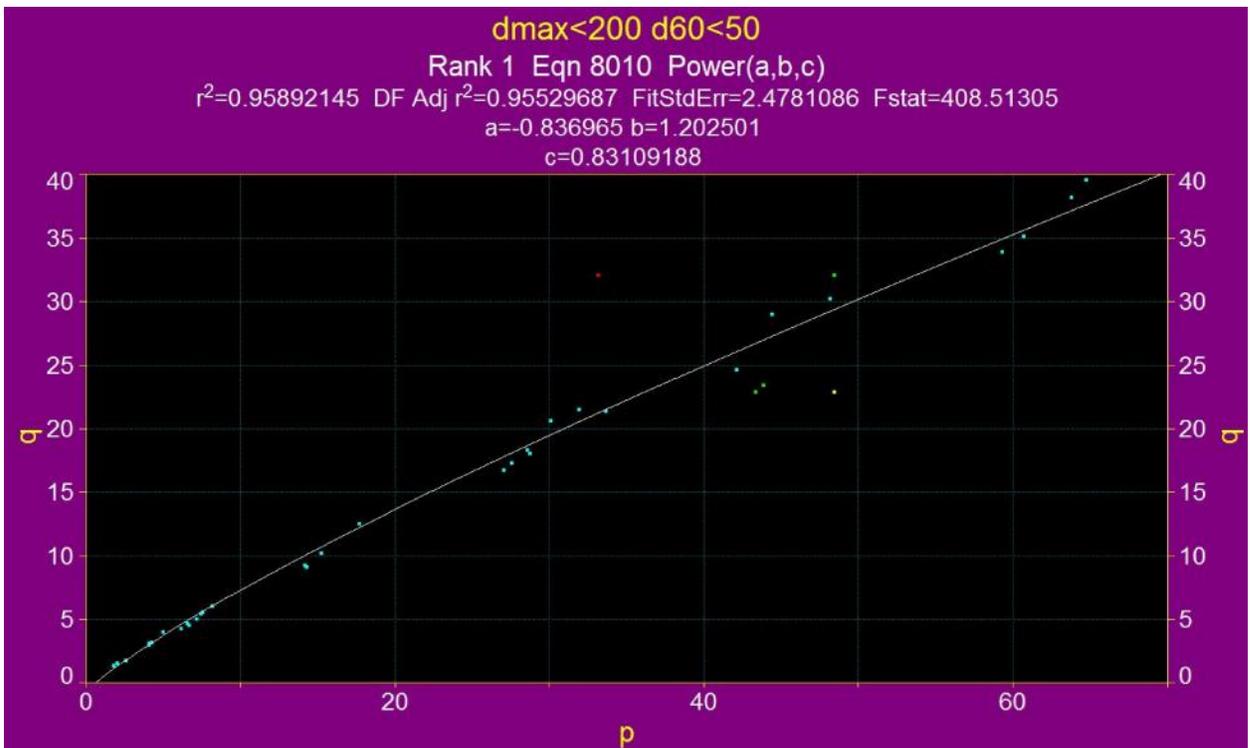
Anexo 40 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$



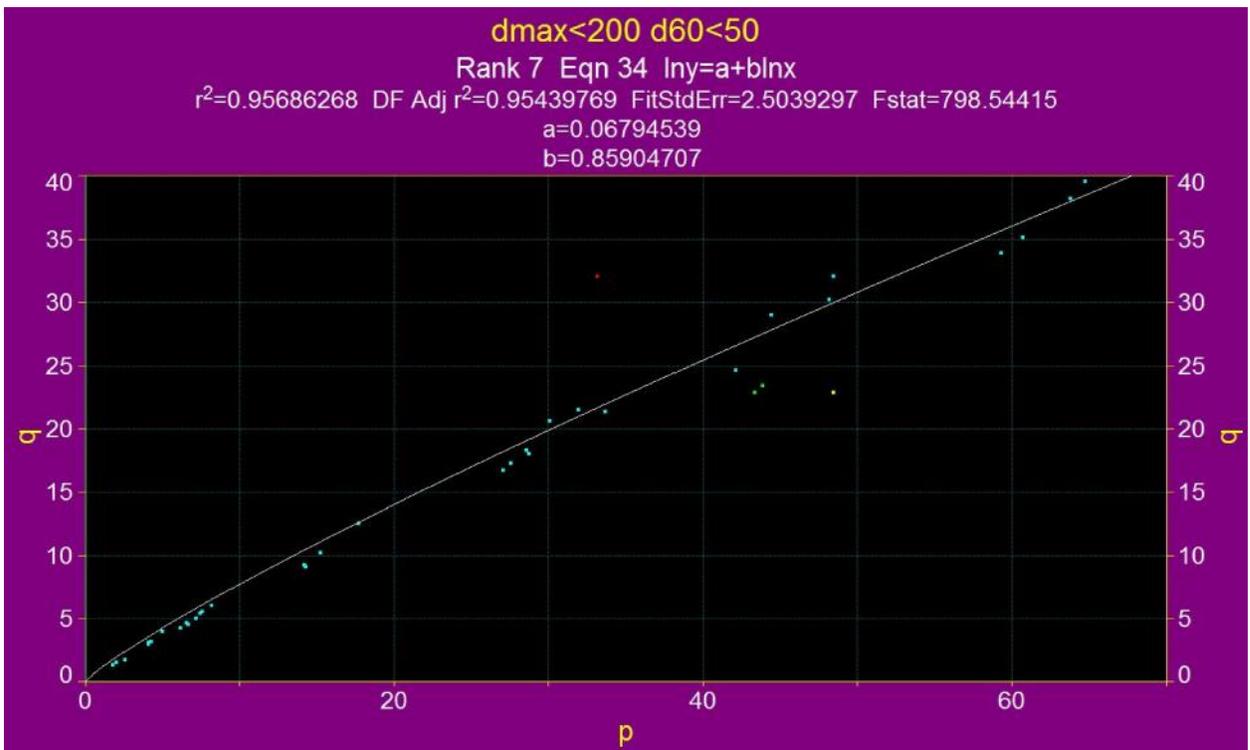
Anexo 41 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+\ln(x)$



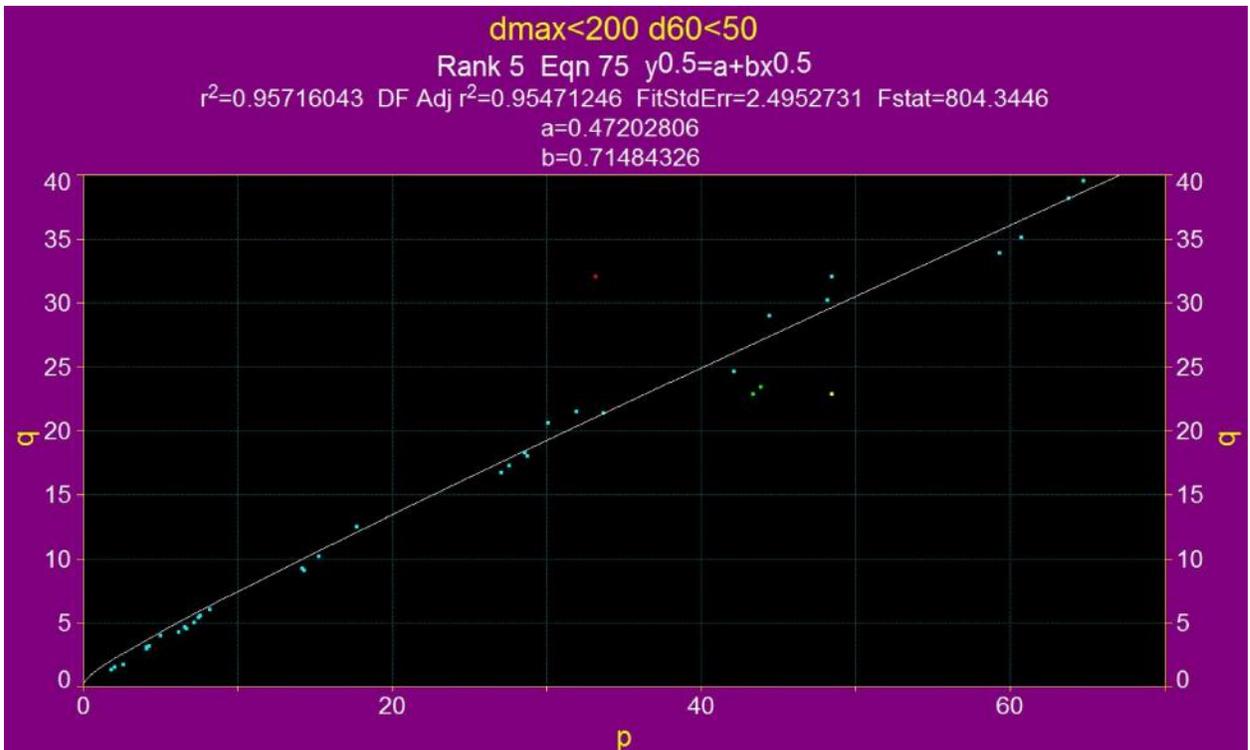
Anexo 42 - Caso 1, Escenario 152mm<dmax<175mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+x^{0.5}$



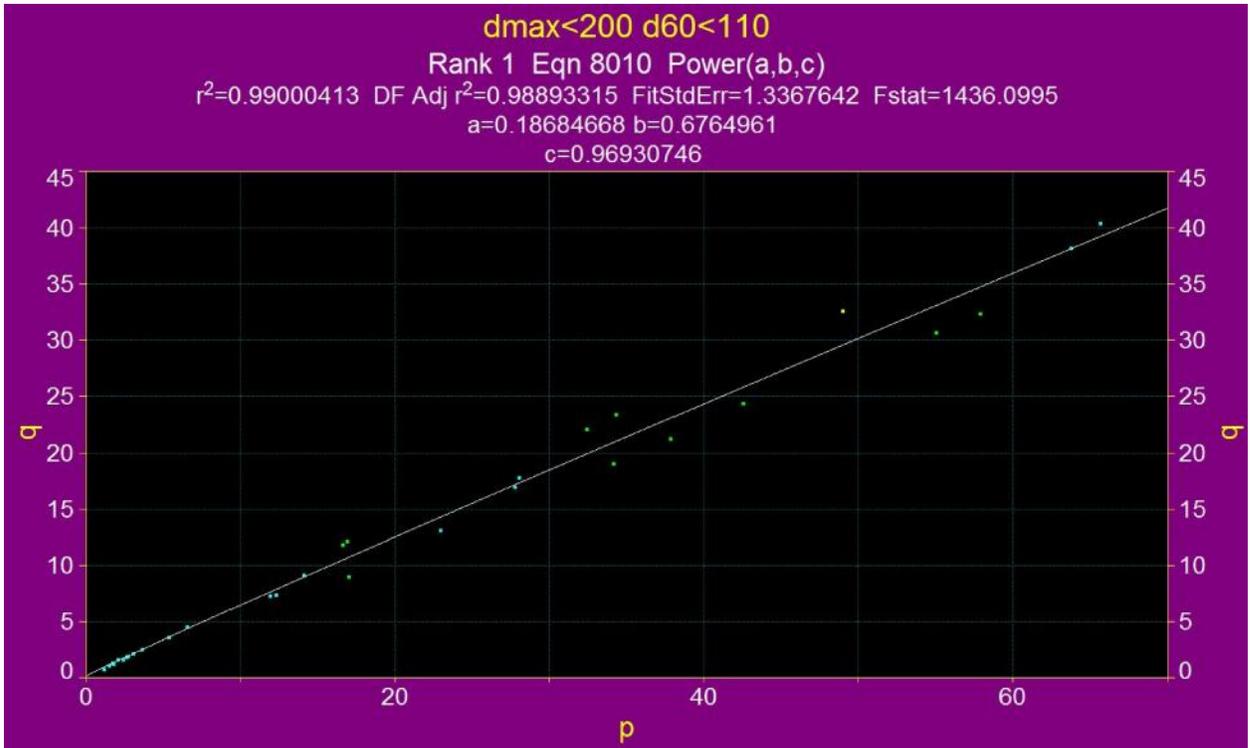
Anexo 43 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$



Anexo 44 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y) = a + \ln(x)$



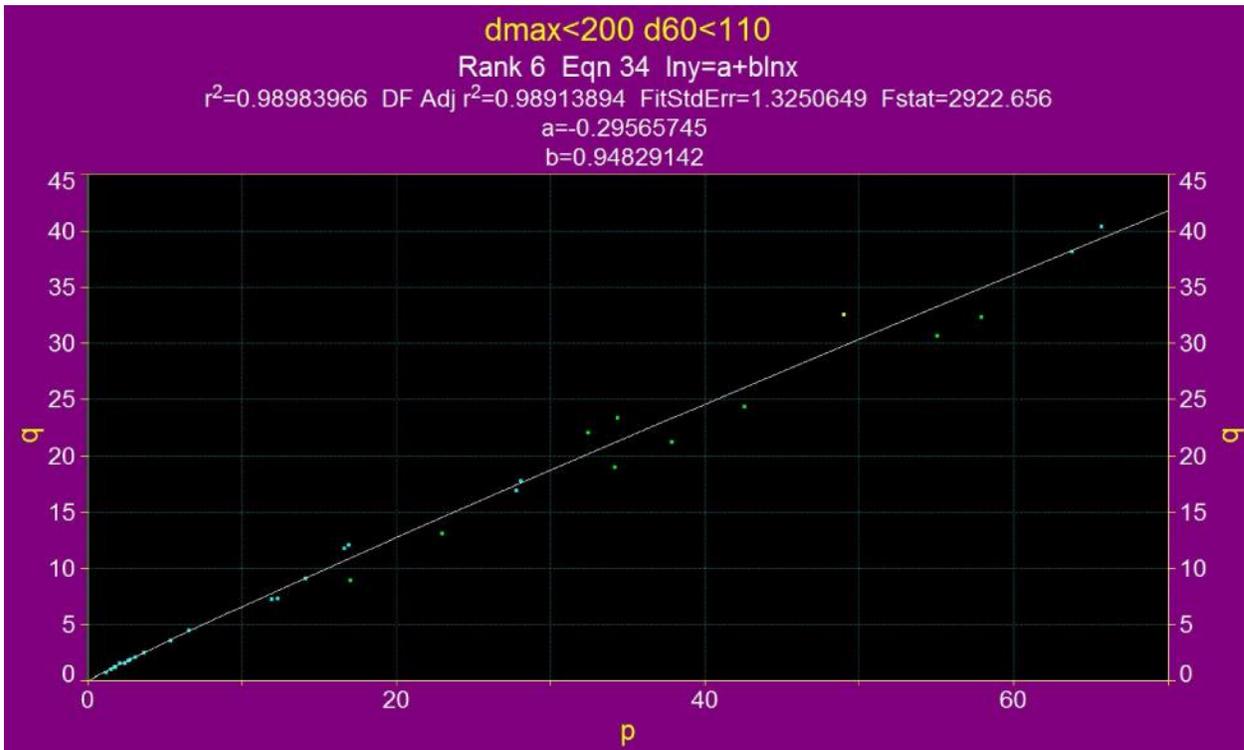
Anexo 45 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60<50, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5} = a + bx^{0.5}$



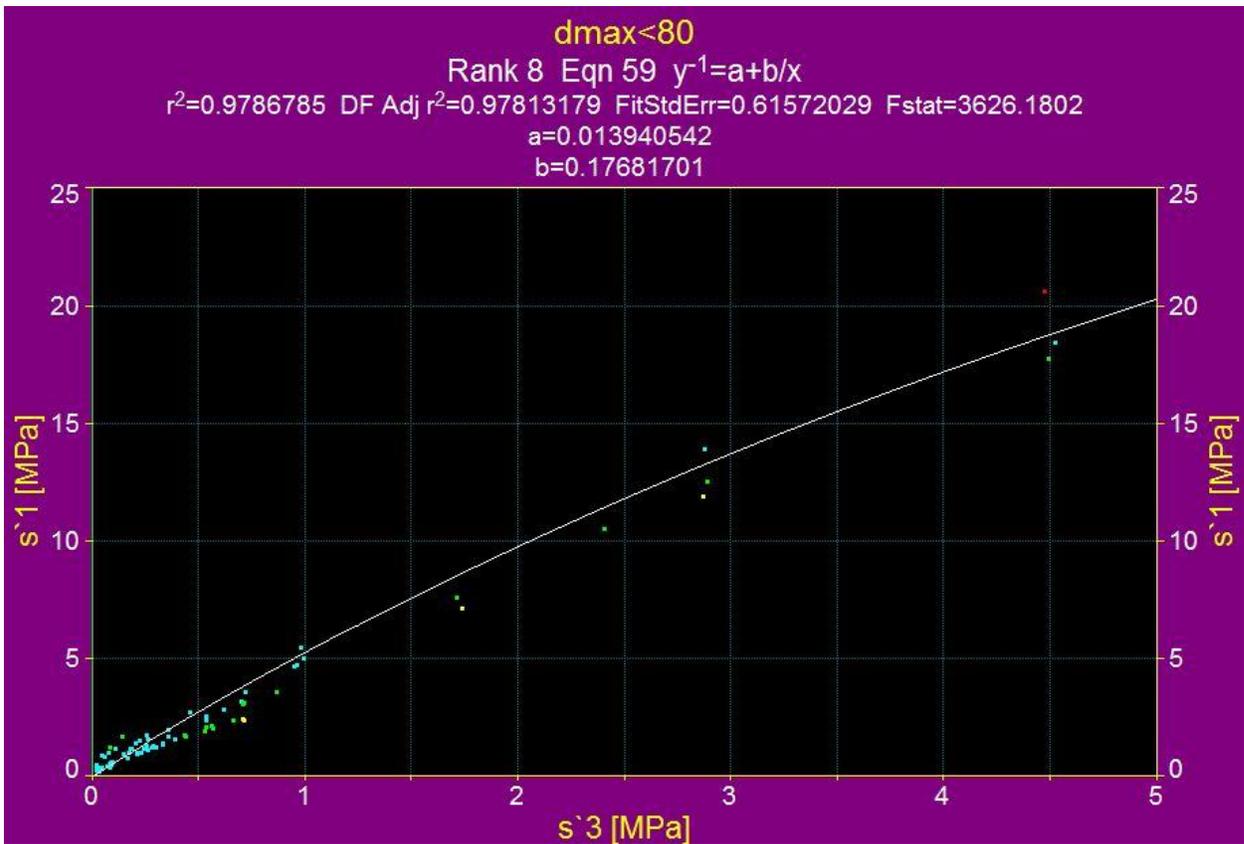
Anexo 46 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60>50, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$



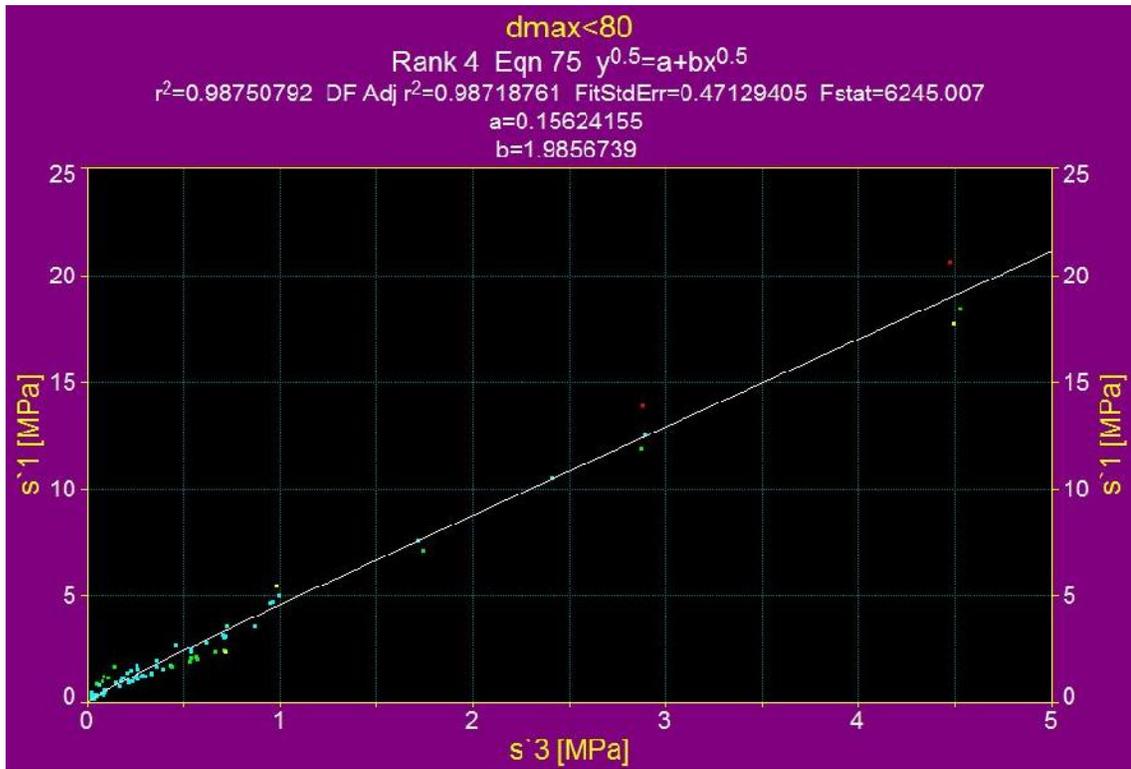
Anexo 47 - Caso 1, Escenario 175mm<dmax<200mm y d60>50, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+ bx^{0.5}$



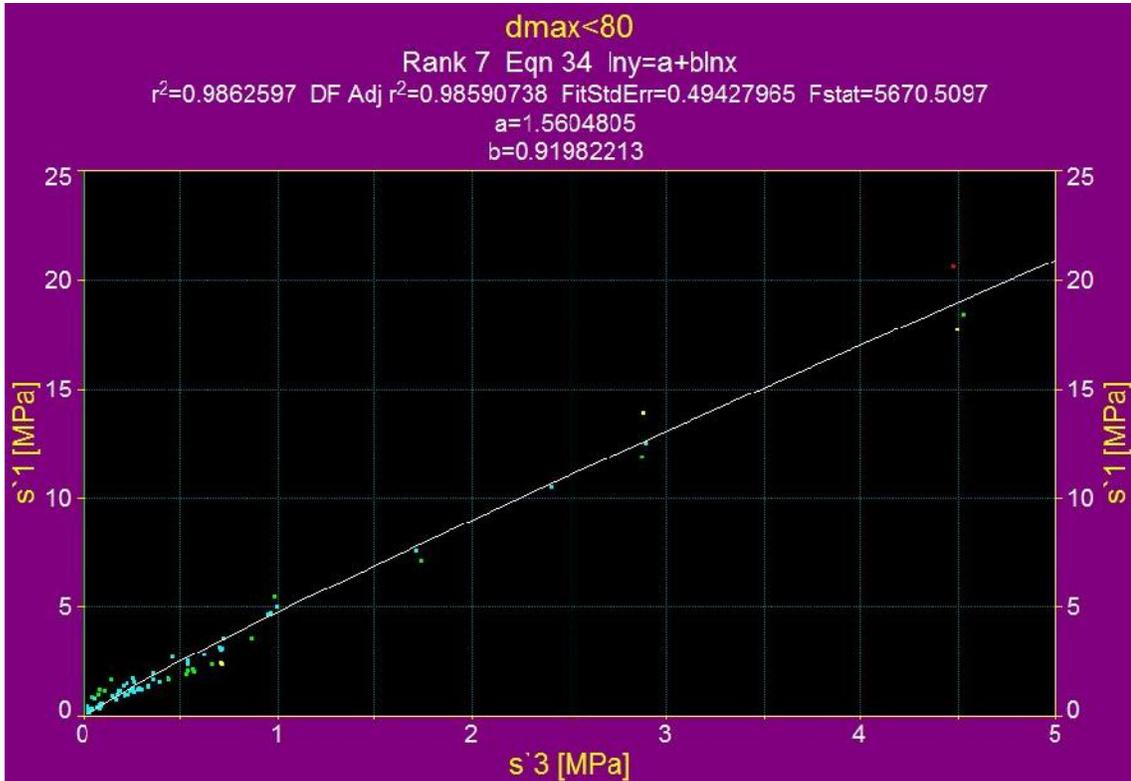
Anexo 48 - Caso 1, Escenario $175\text{mm} < d_{\text{max}} < 200\text{mm}$ y $d_{60} > 50$, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $\ln(y) = a + \ln(x)$



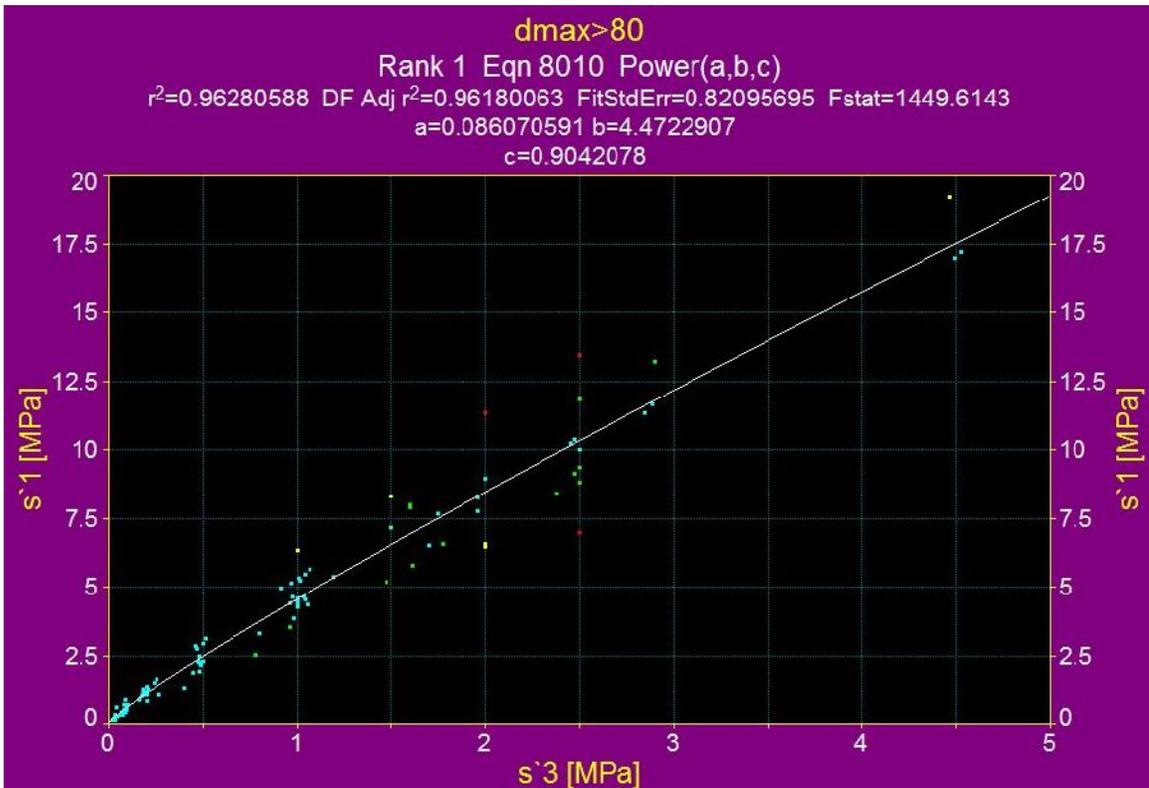
Anexo 49 – Caso 2, Escenario $d_{\text{max}} < 80\text{mm}$, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y = a + bx^c$



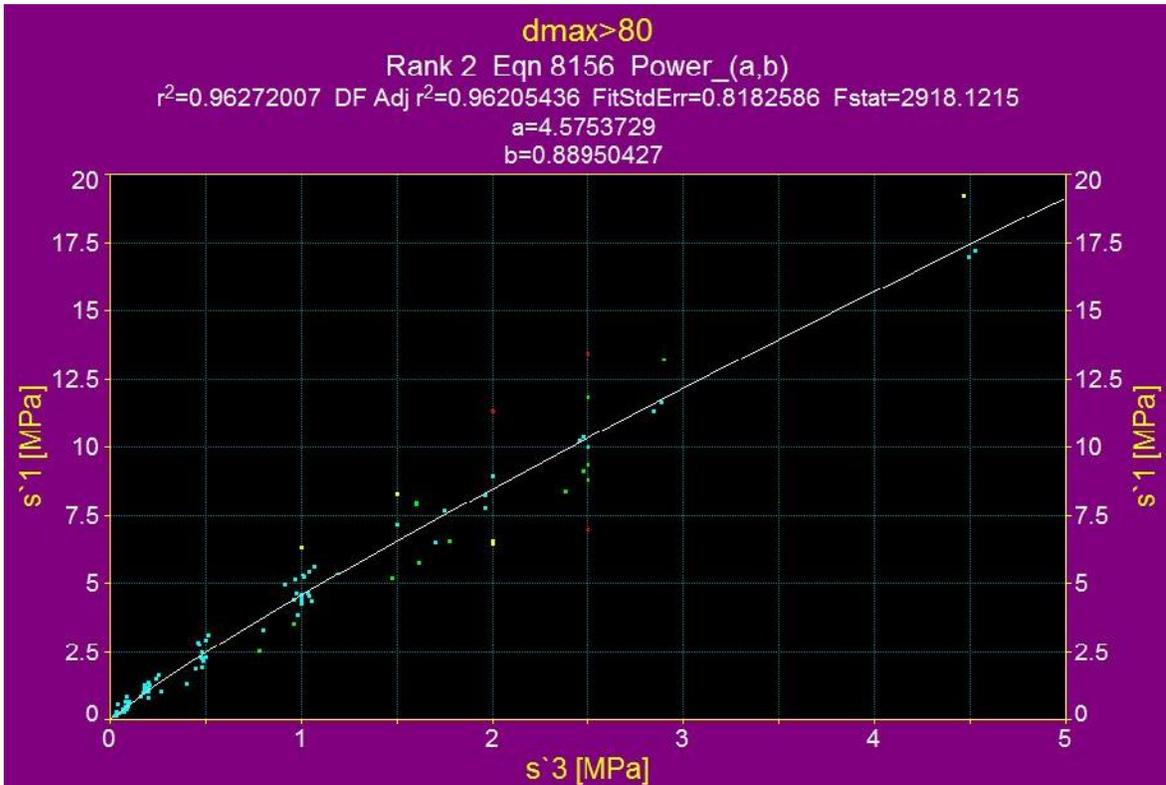
Anexo 50 - Caso 2, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



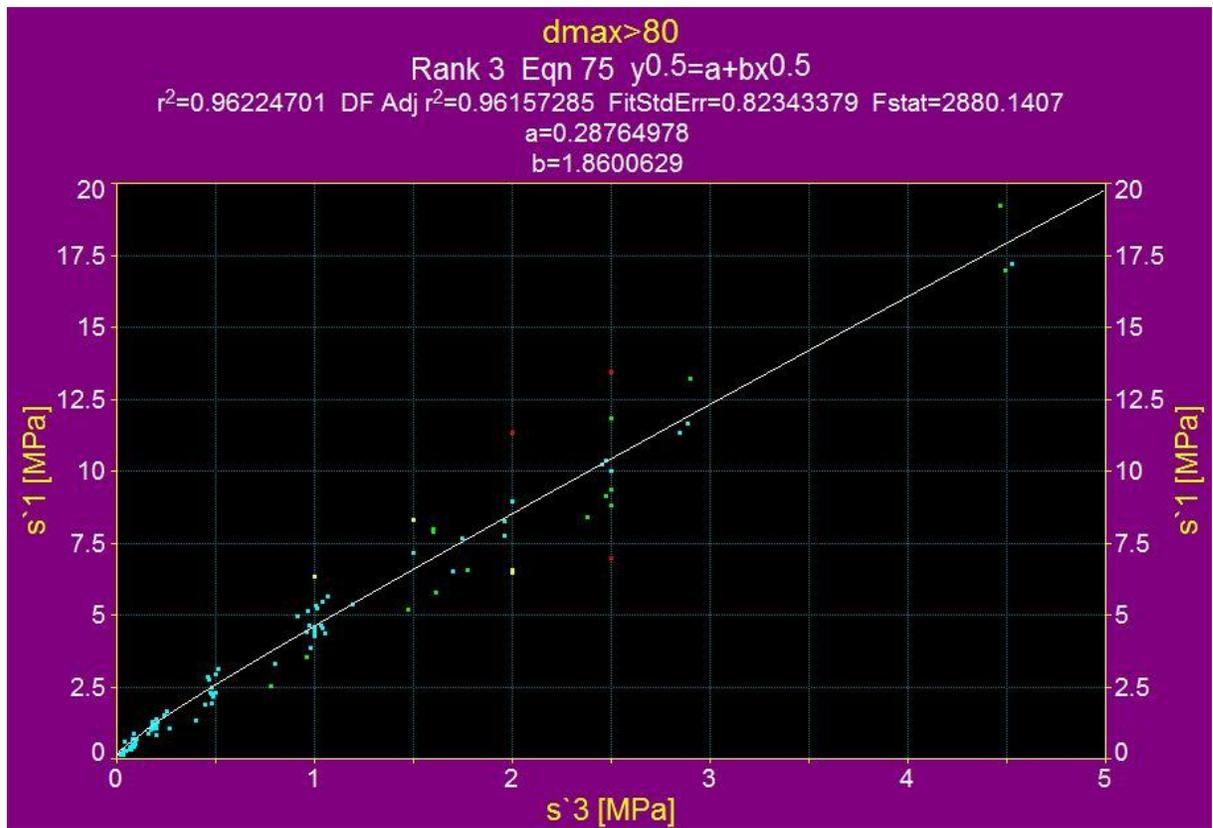
Anexo 51 - Caso 2, Escenario dmax<80mm, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$



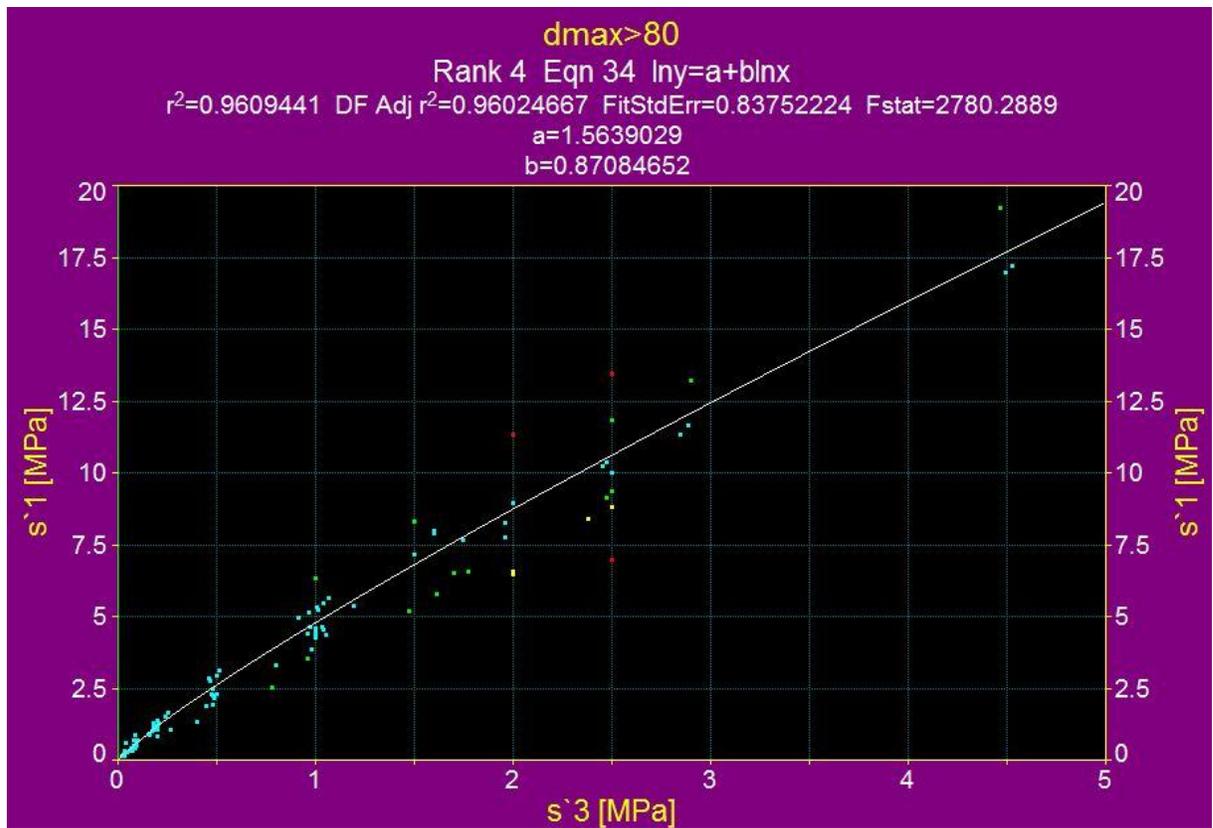
Anexo 52 - Caso 2, Escenario $d_{max} < 80mm$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=a+bx$



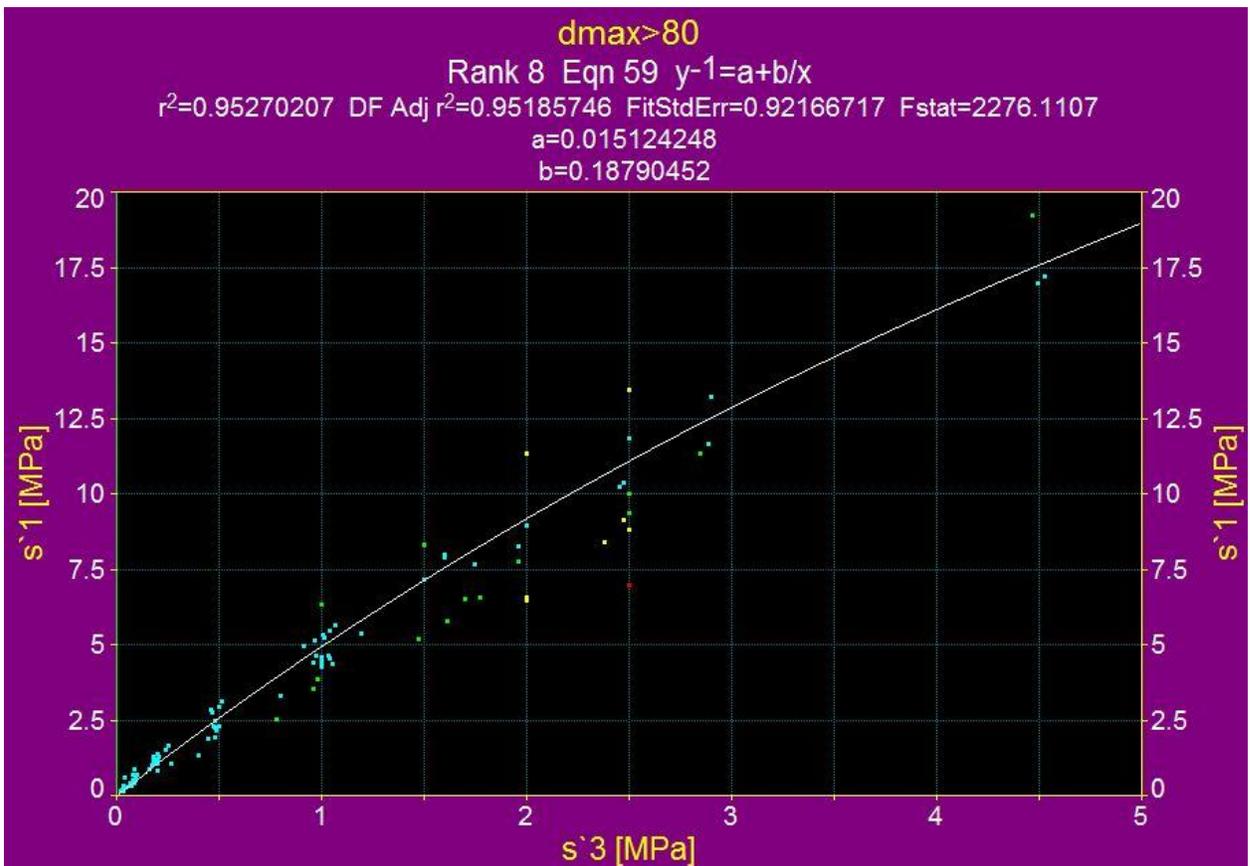
Anexo 53 - Caso 2, Escenario $d_{max} < 80mm$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y=ax^b$



Anexo 54 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



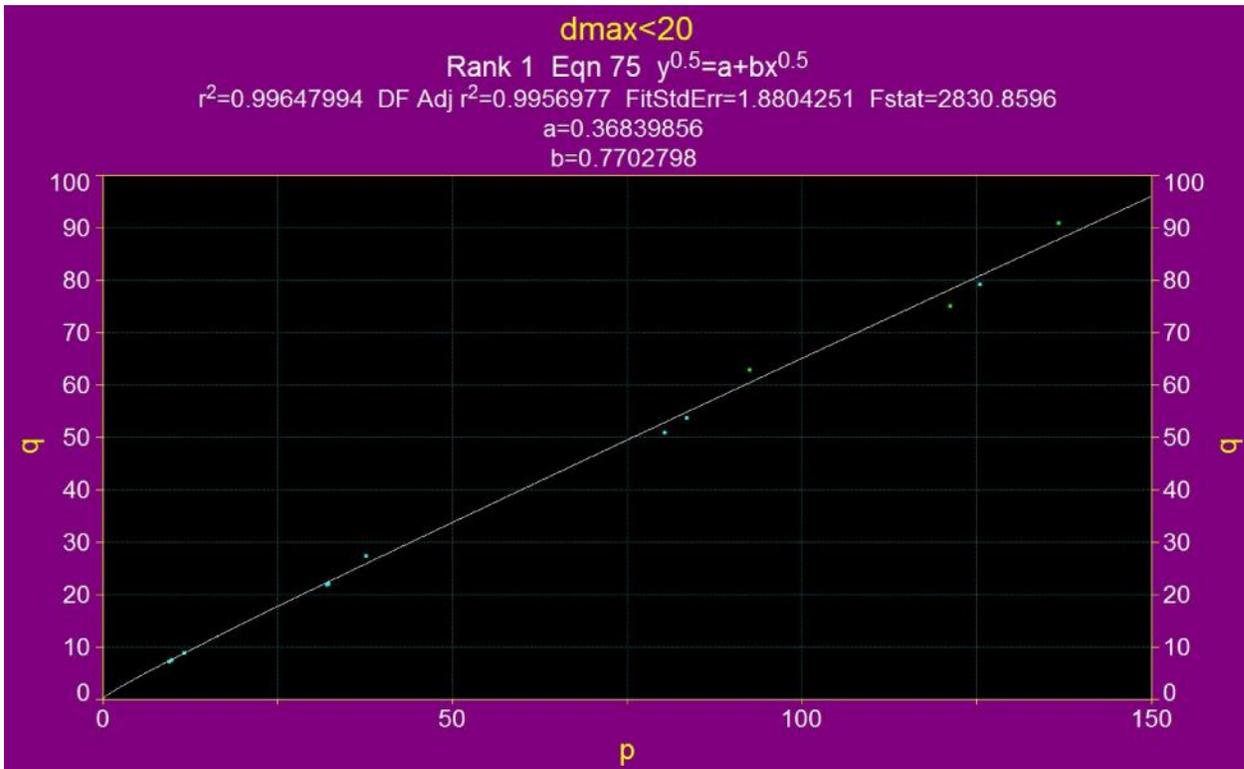
Anexo 55 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$



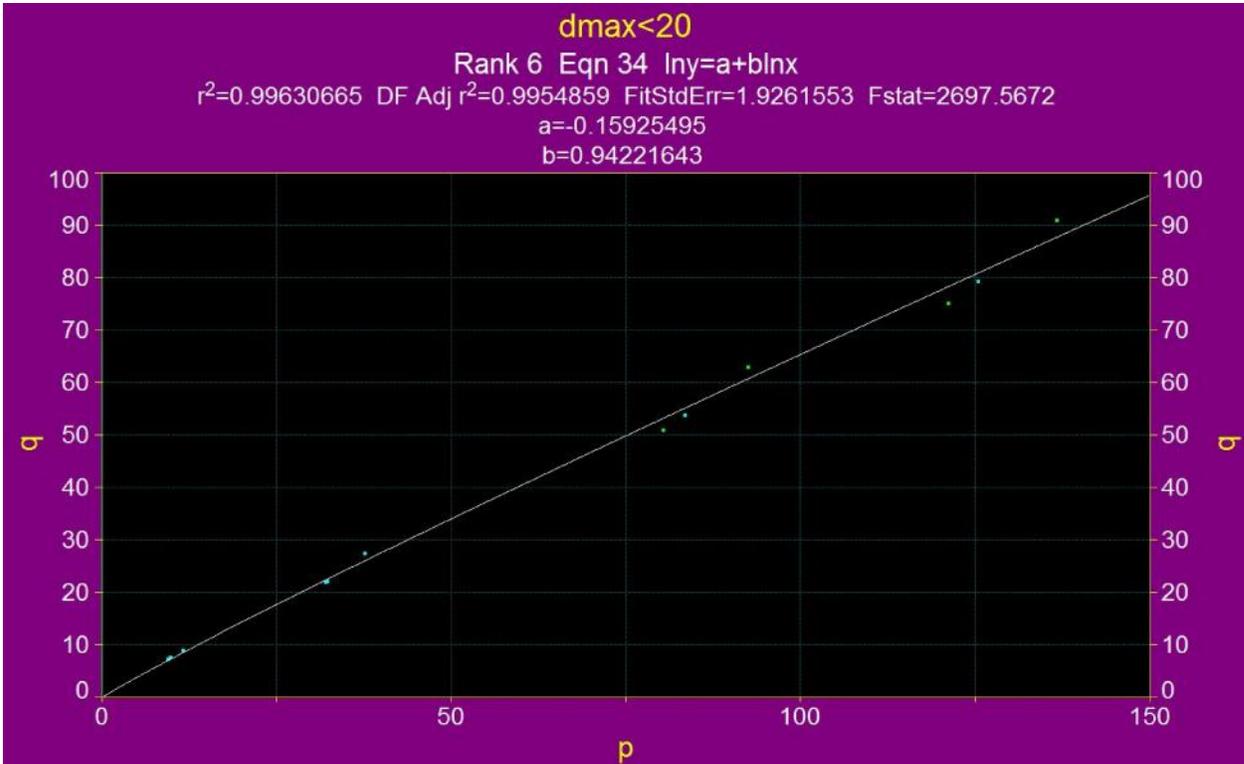
Anexo 56 - Caso 2, Escenario $d_{max}<80mm$, espacio τ_1 vs τ_3 , Ajuste de forma $y^{-1}=a+b/x$



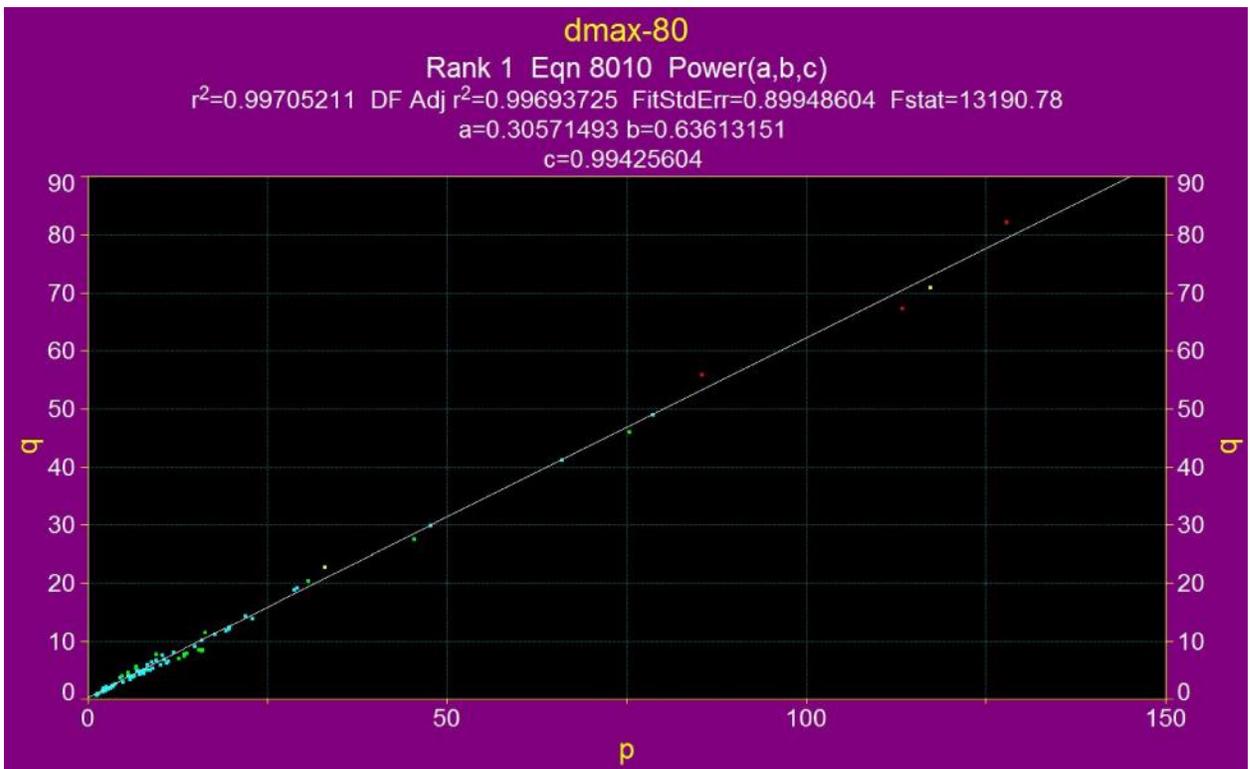
Anexo 57 – Caso 2, Escenario $d_{max}<20mm$, espacio q vs p , Ajuste de forma $y=a+bx^c$



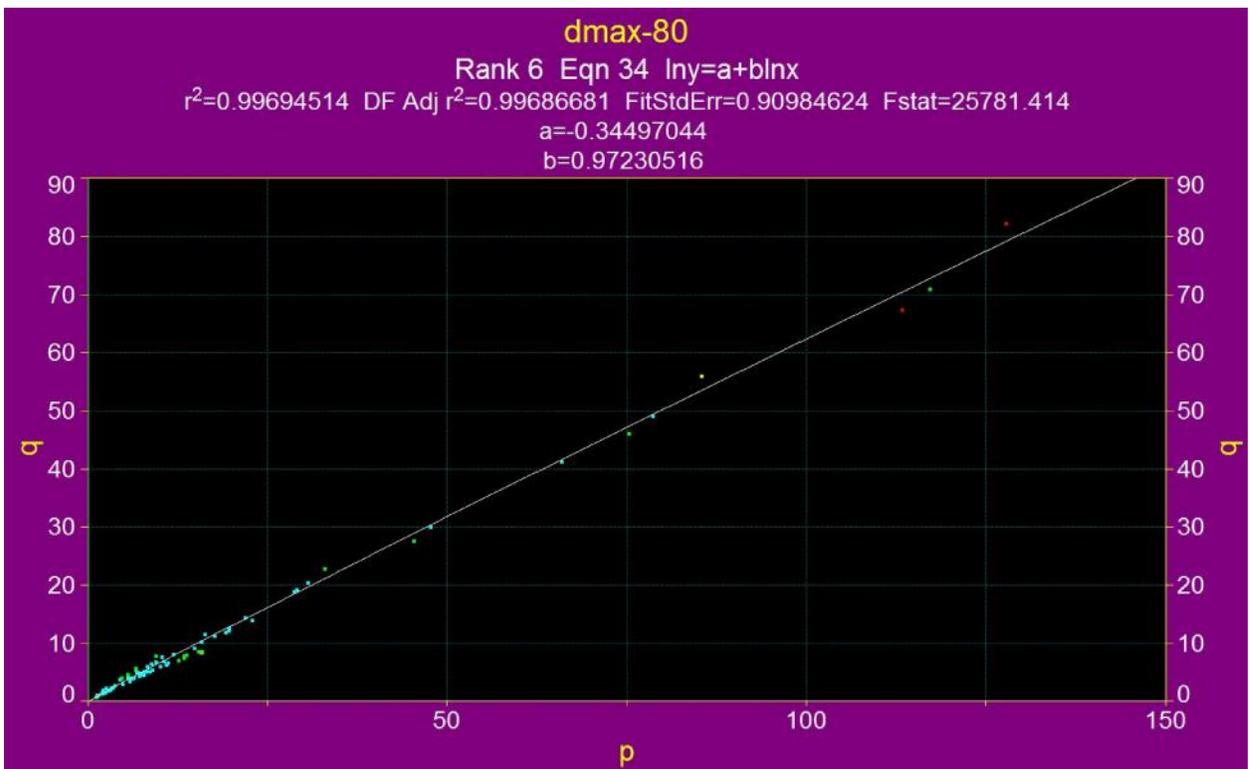
Anexo 58 - Caso 2, Escenario dmax<20mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



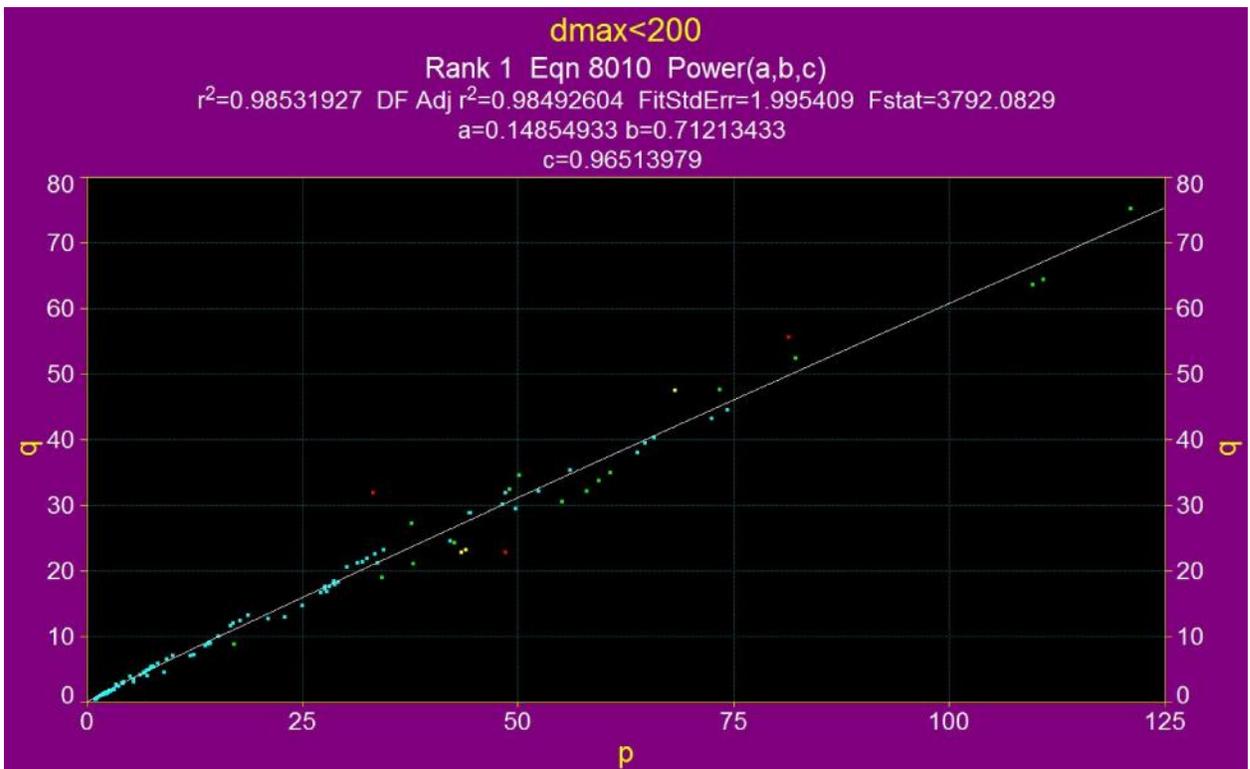
Anexo 59 - Caso 2, Escenario dmax<20mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $\ln(y)=a+b\ln(x)$



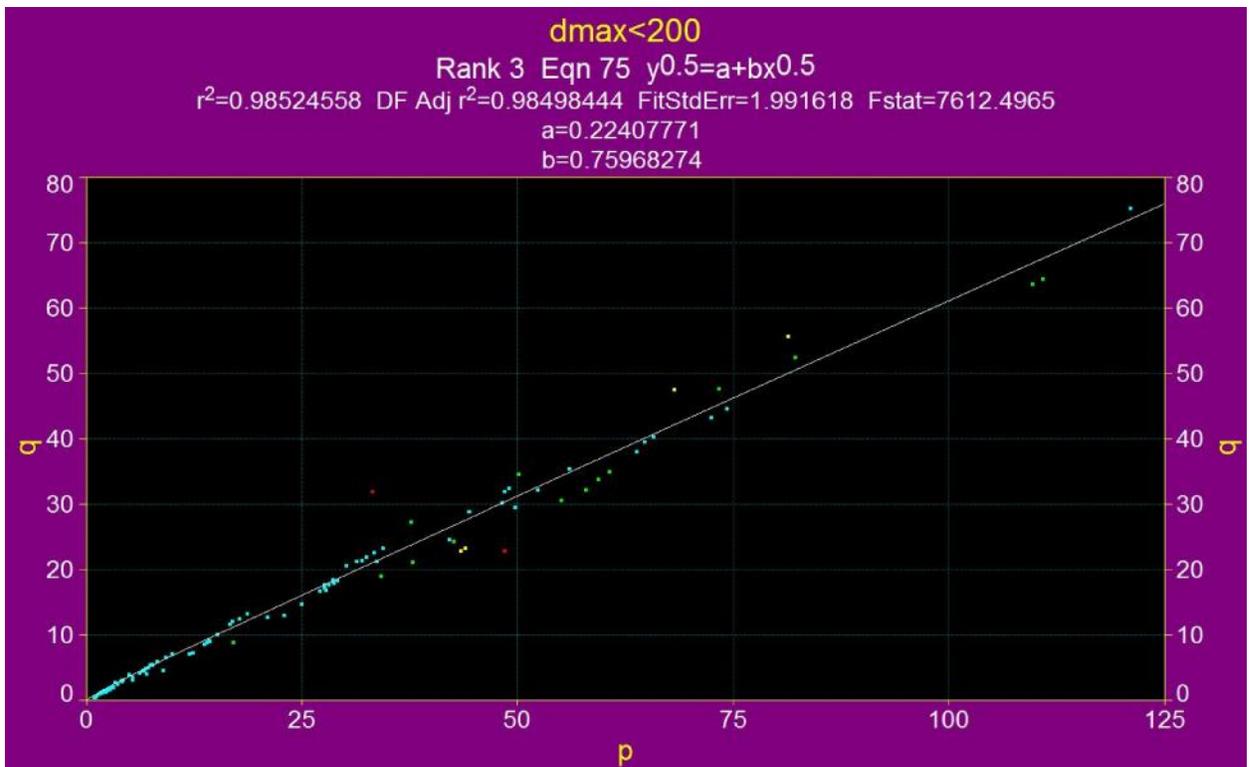
Anexo 60 - Caso 2, Escenario 20mm<dmax<80mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y=a+bx^c$



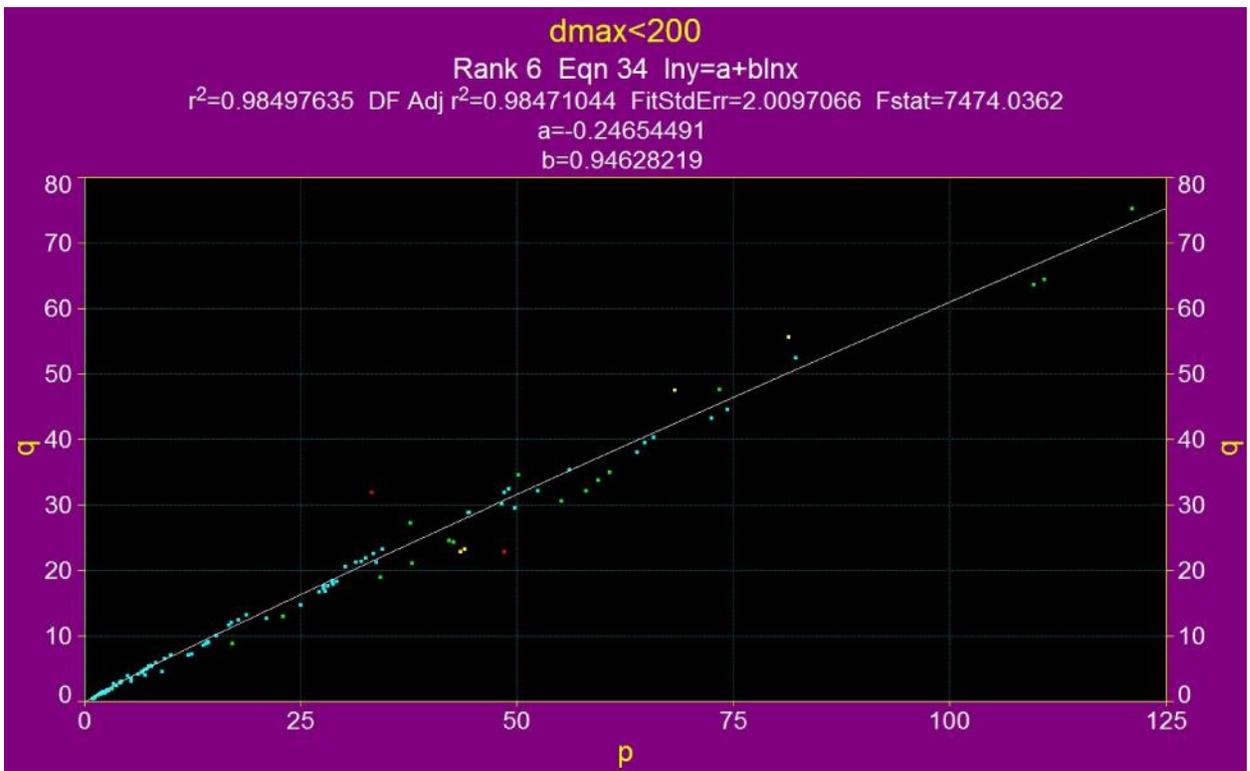
Anexo 61 - Caso 2, Escenario 20mm<dmax<80mm, espacio q vs p, Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



Anexo 62 – Caso 2, Escenario $20\text{mm} < d_{\text{max}} < 80\text{mm}$, espacio q vs p , Ajuste de forma $y=a+bx$



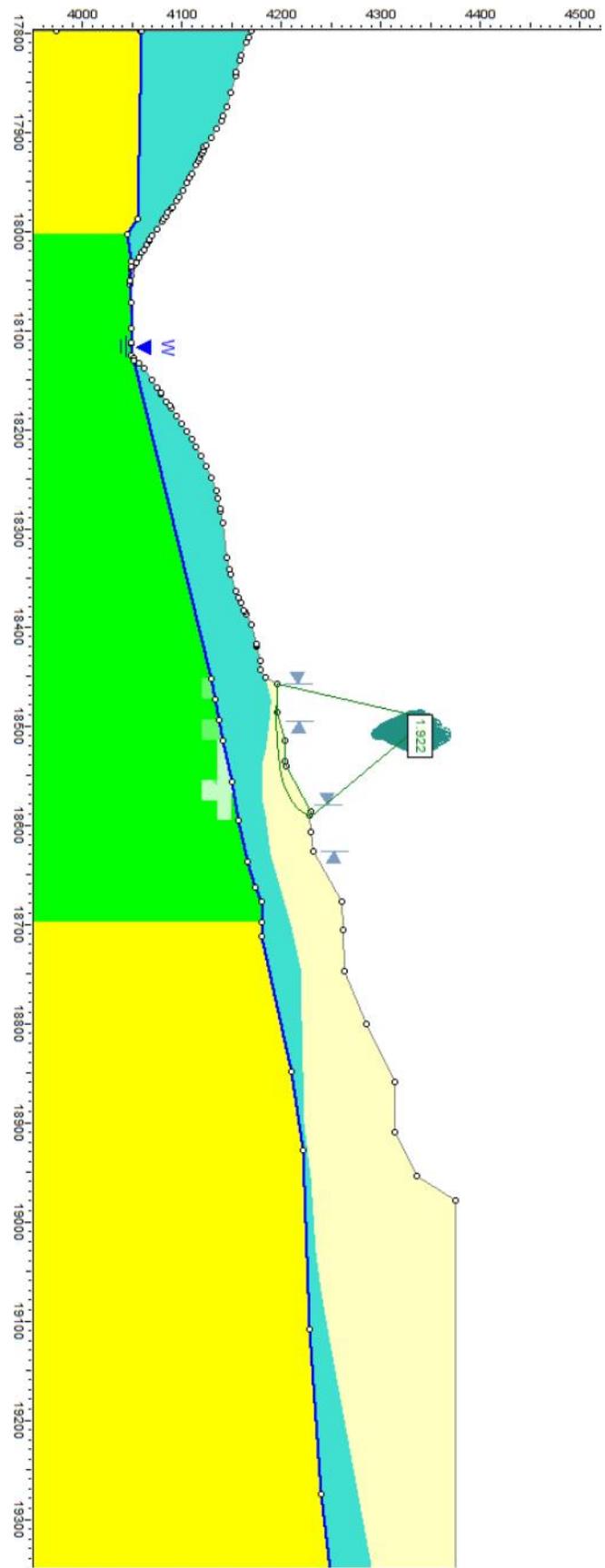
Anexo 63 - Caso 2, Escenario $20\text{mm} < d_{\text{max}} < 80\text{mm}$, espacio q vs p , Ajuste de forma $y^{0.5}=a+bx^{0.5}$



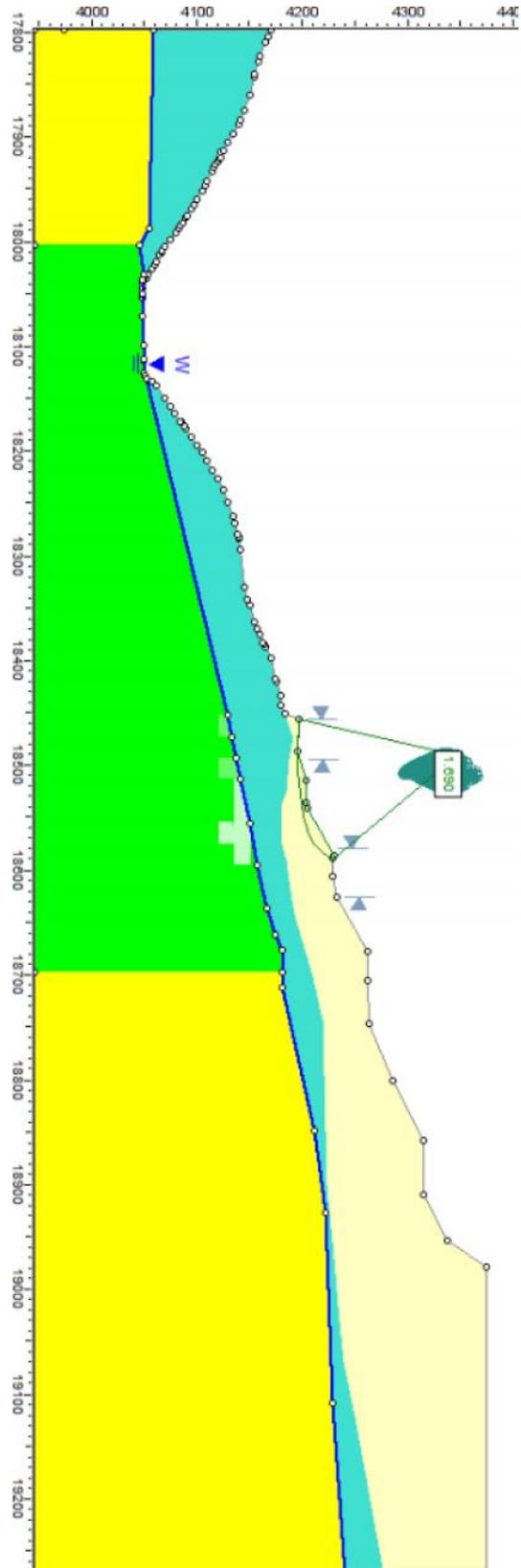
Anexo 64 - Caso 2, Escenario $20\text{mm} < d_{\text{max}} < 80\text{mm}$, espacio \uparrow_1 vs \uparrow_3 , Ajuste de forma $\ln(y) = a + b \ln(x)$

	Mineralización	Alteración	Peso Unitario [kN/m ³]	Resistencia a la compresion uniaxial (UCS) [Kpa]	GSI	mi	Factor de Disturbación (D)	Cohesion [kPa]	Friccion [°]	Color
Line Creek	Roca Caja		20	95000	55	10	0,5	-	-	
	Fundación		20	-	-	-	-	0	33	
Antamina	Roca Caja		26,7	-	-	-	-	1000	45	
	Lacustrine Insaturada		22	-	-	-	-	20	0	
	Lacustrine Saturada		24	-	-	-	-	20	0	
Quebrada Blanca	Grava		21,5	-	-	-	-	80	38	
	Diorita	Cuarzo-Cerisítica	25,8	49000	46	20	0,8	-	-	
	Diorita	Biotítica	25,8	59000	51	20	0,8	-	-	
	Cuarzo-Monzonito	Cuarzo-Cerisítica	25,1	52000	44	26	0,8	-	-	
	Cuarzo-Monzonito	Biotítica	25,4	86000	44	26	0,8	-	-	
	Cuarzo-Monzonito	Feldespató Potásica	25,6	57000	54	26	0,8	-	-	

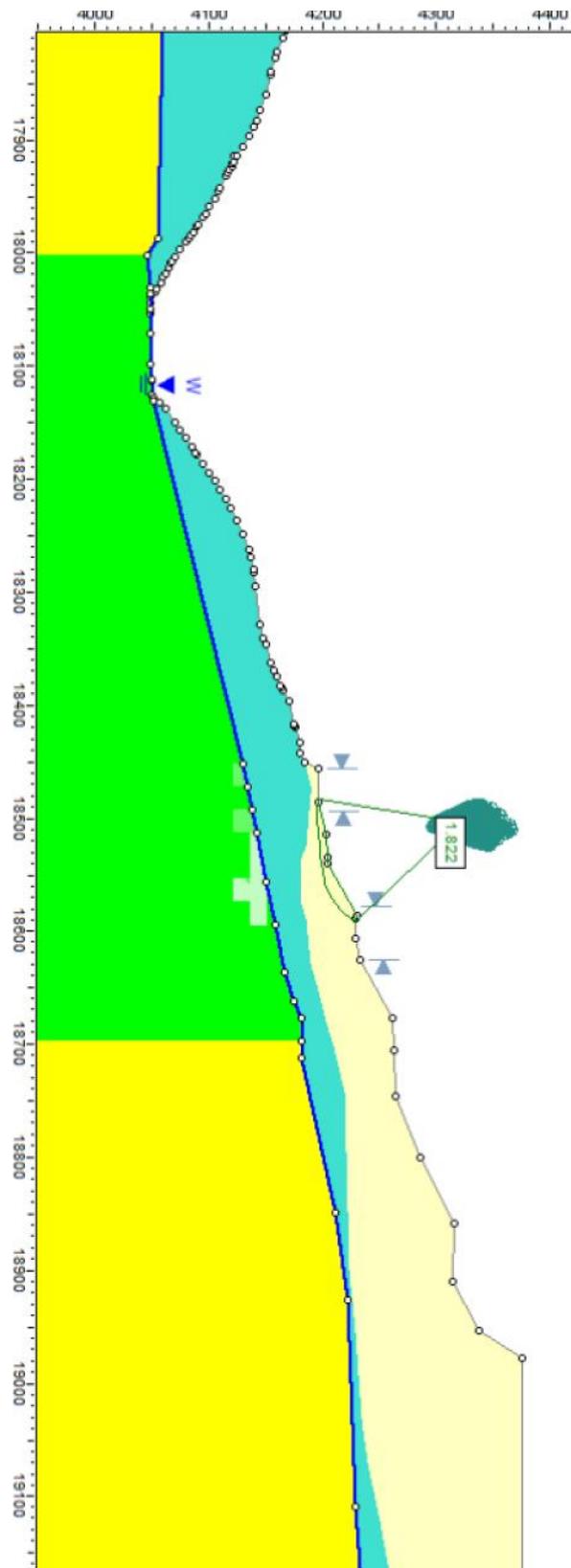
Anexo 65- Tabla de Materiales bajo secciones de Botaderos



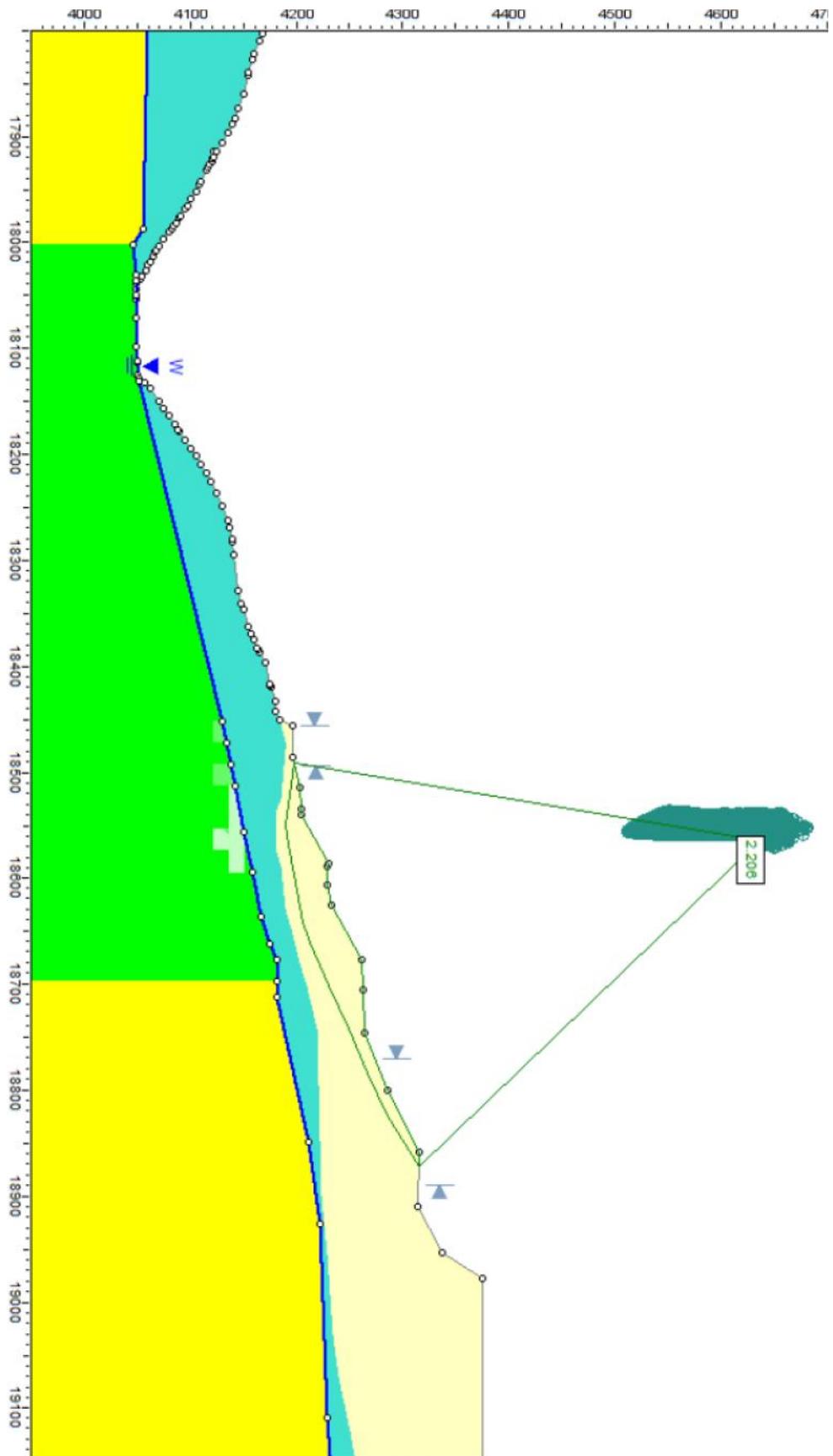
Anexo 66 – Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



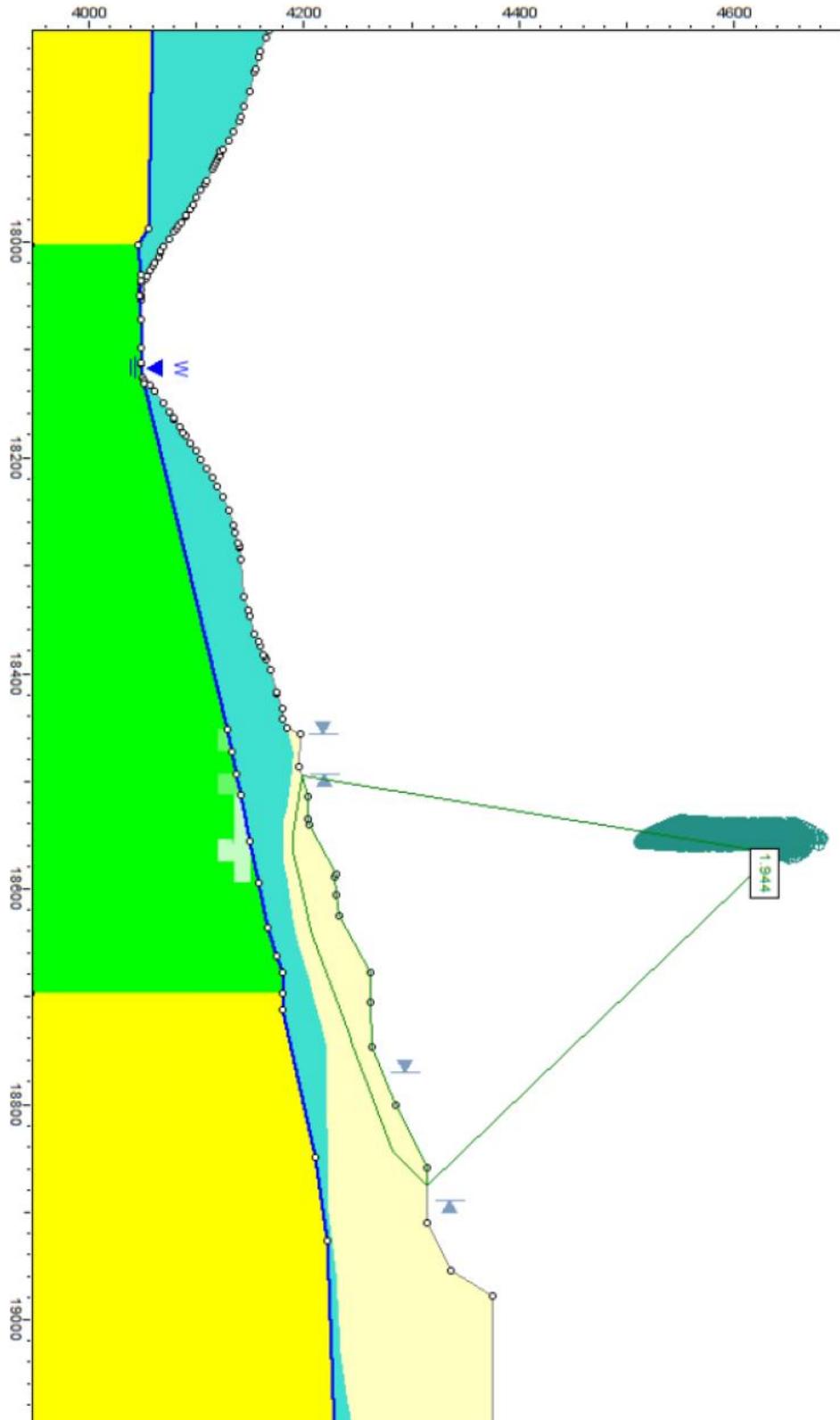
Anexo 67 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



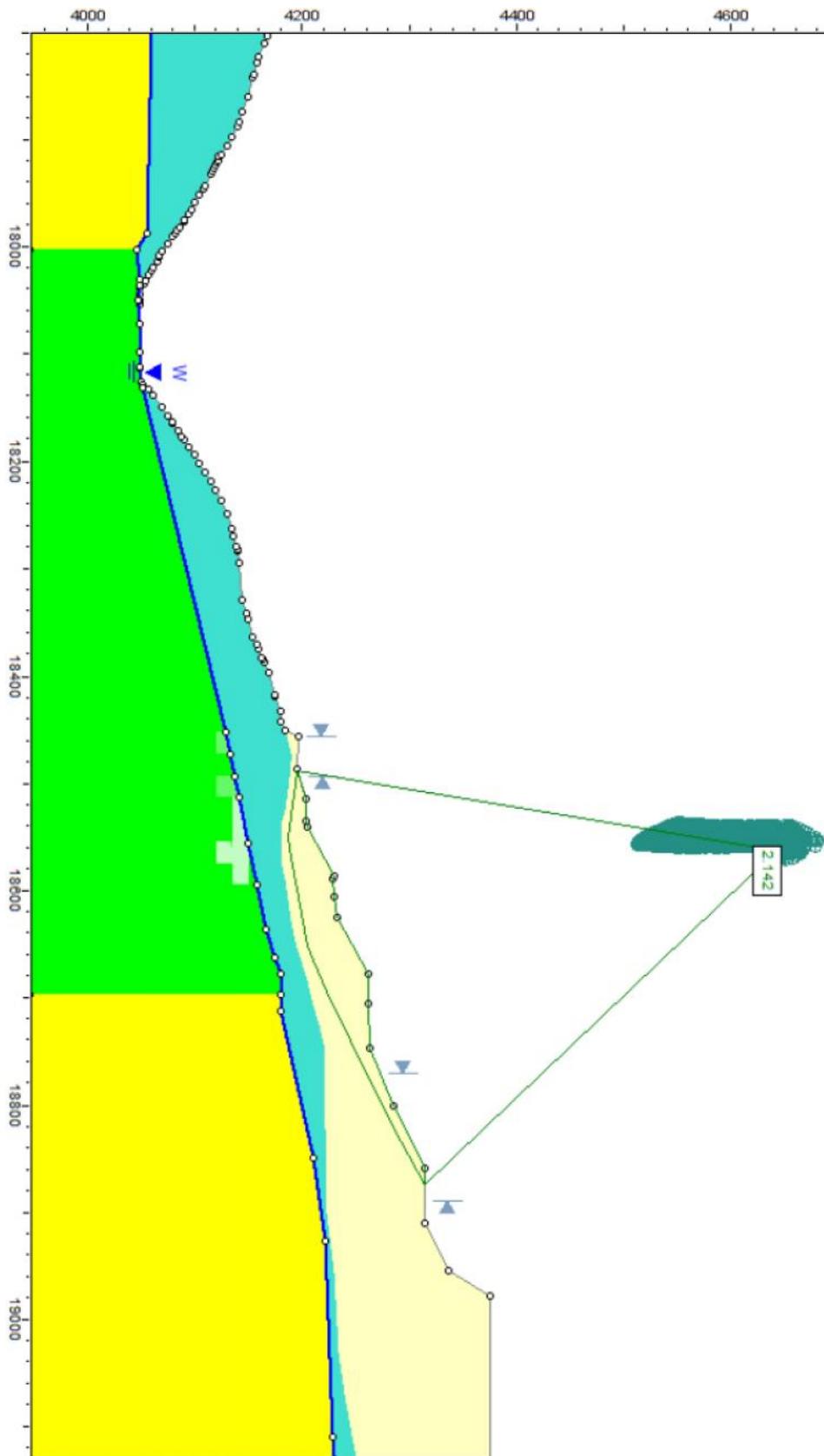
Anexo 68 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



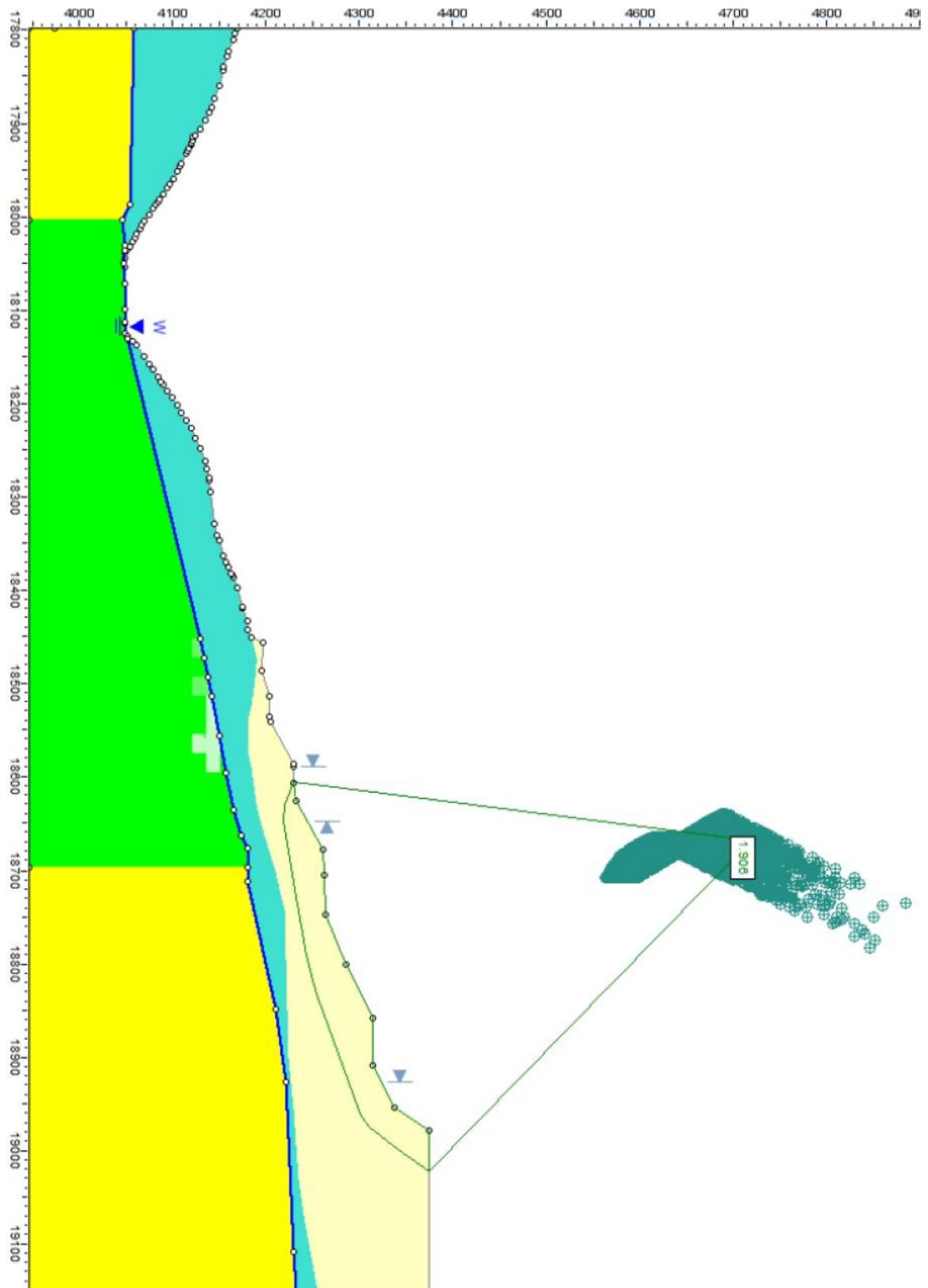
Anexo 69 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



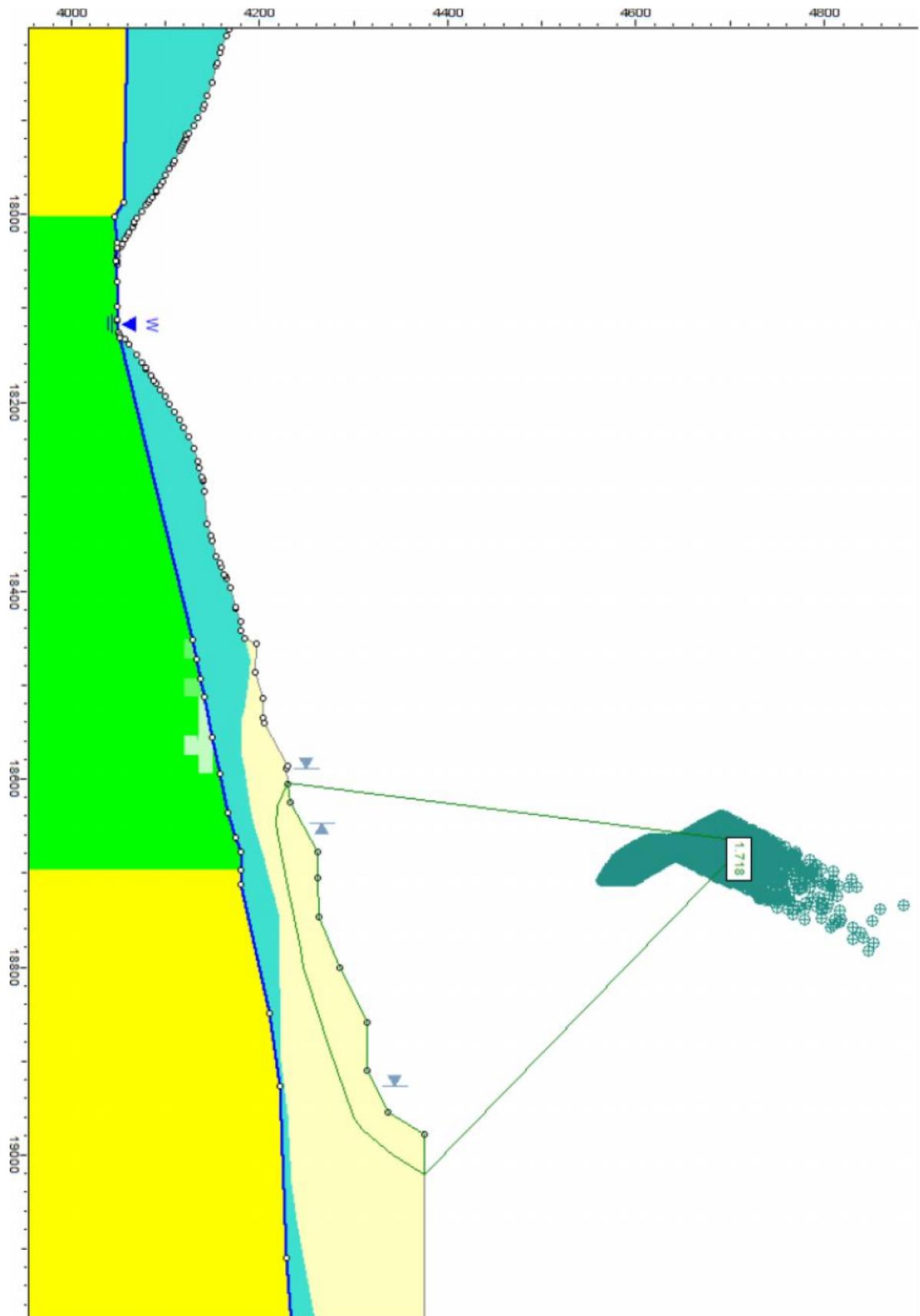
Anexo 70 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



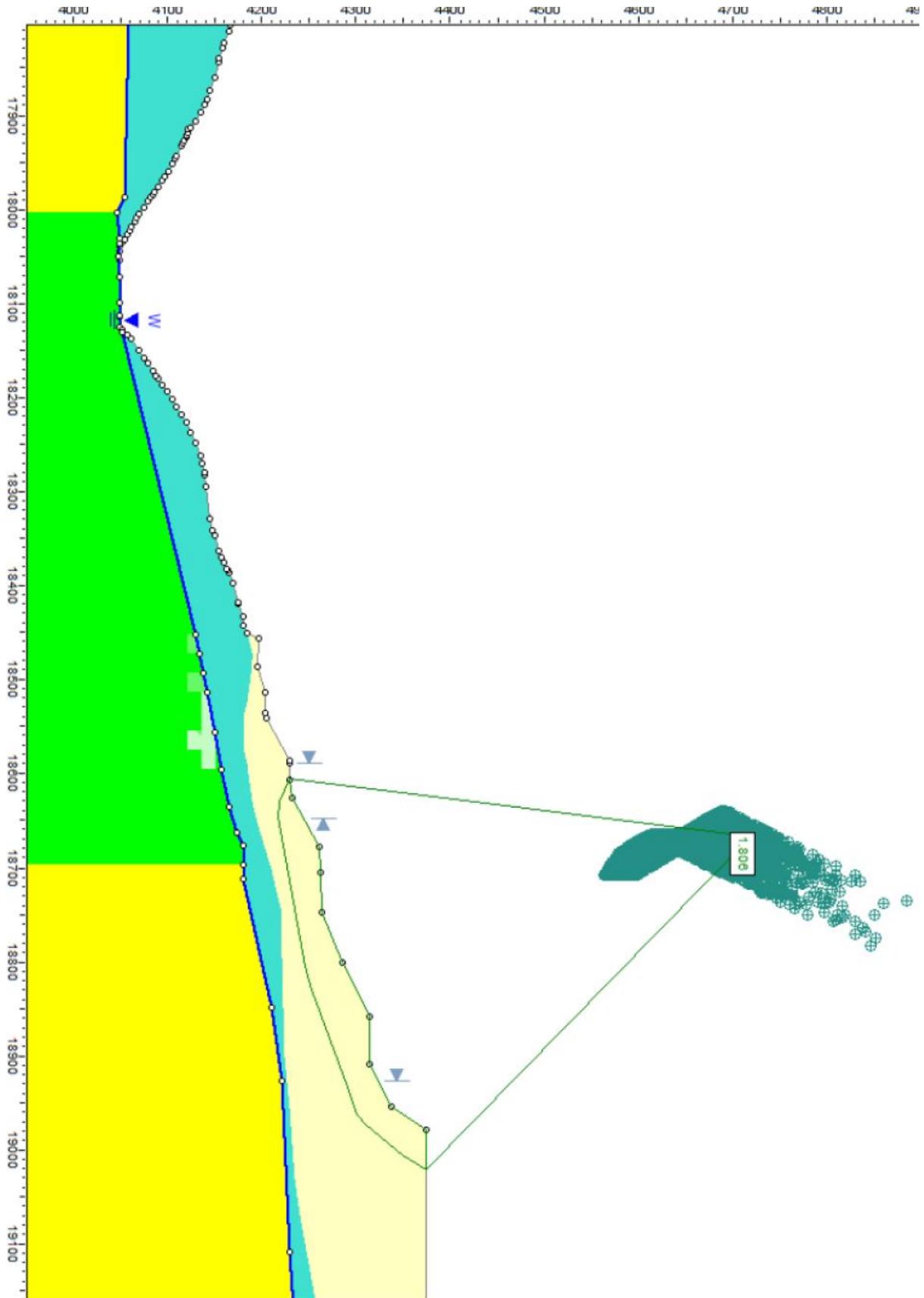
Anexo 71 - Sección1, Superficie 0102, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



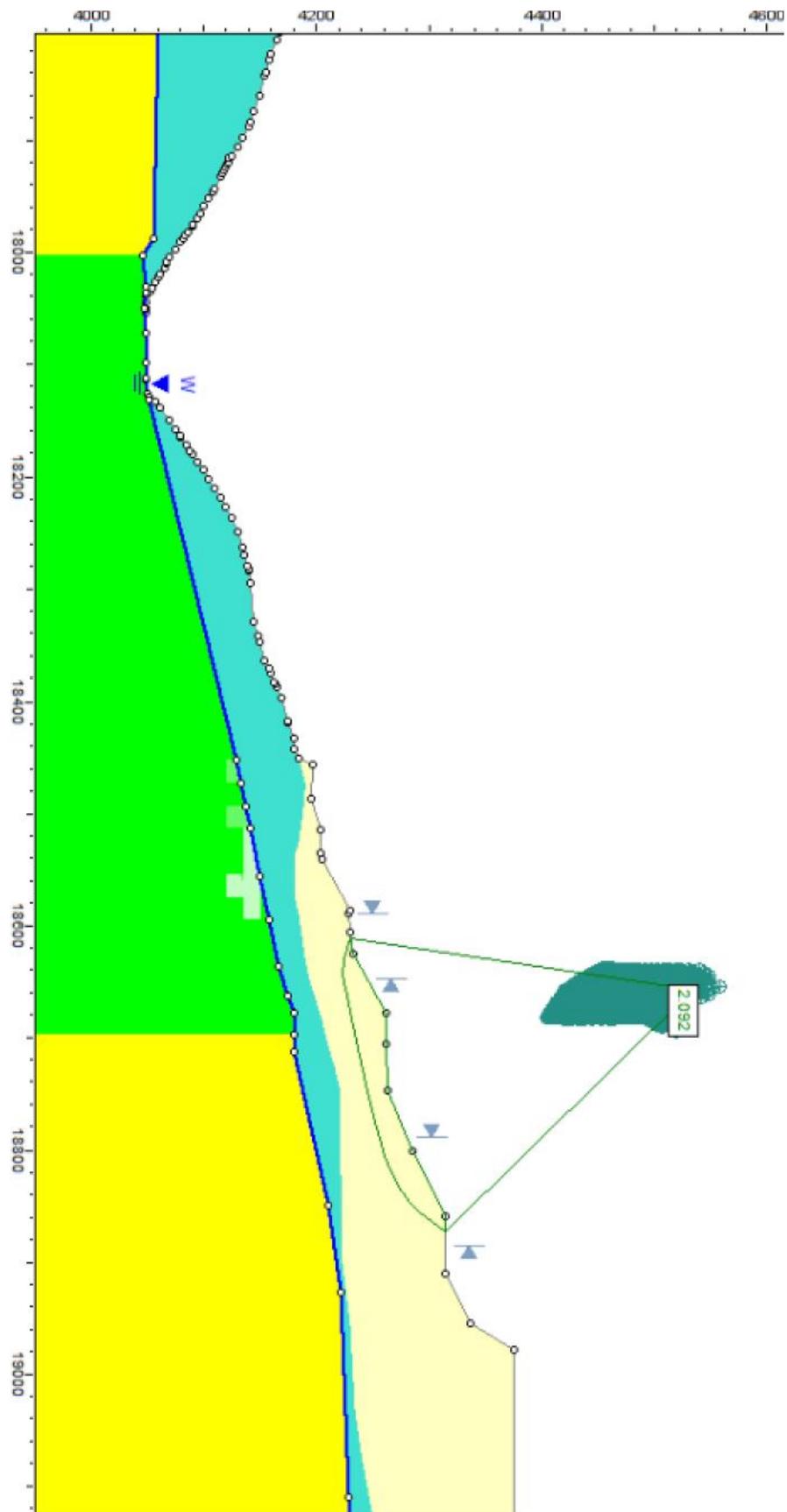
Anexo 72 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



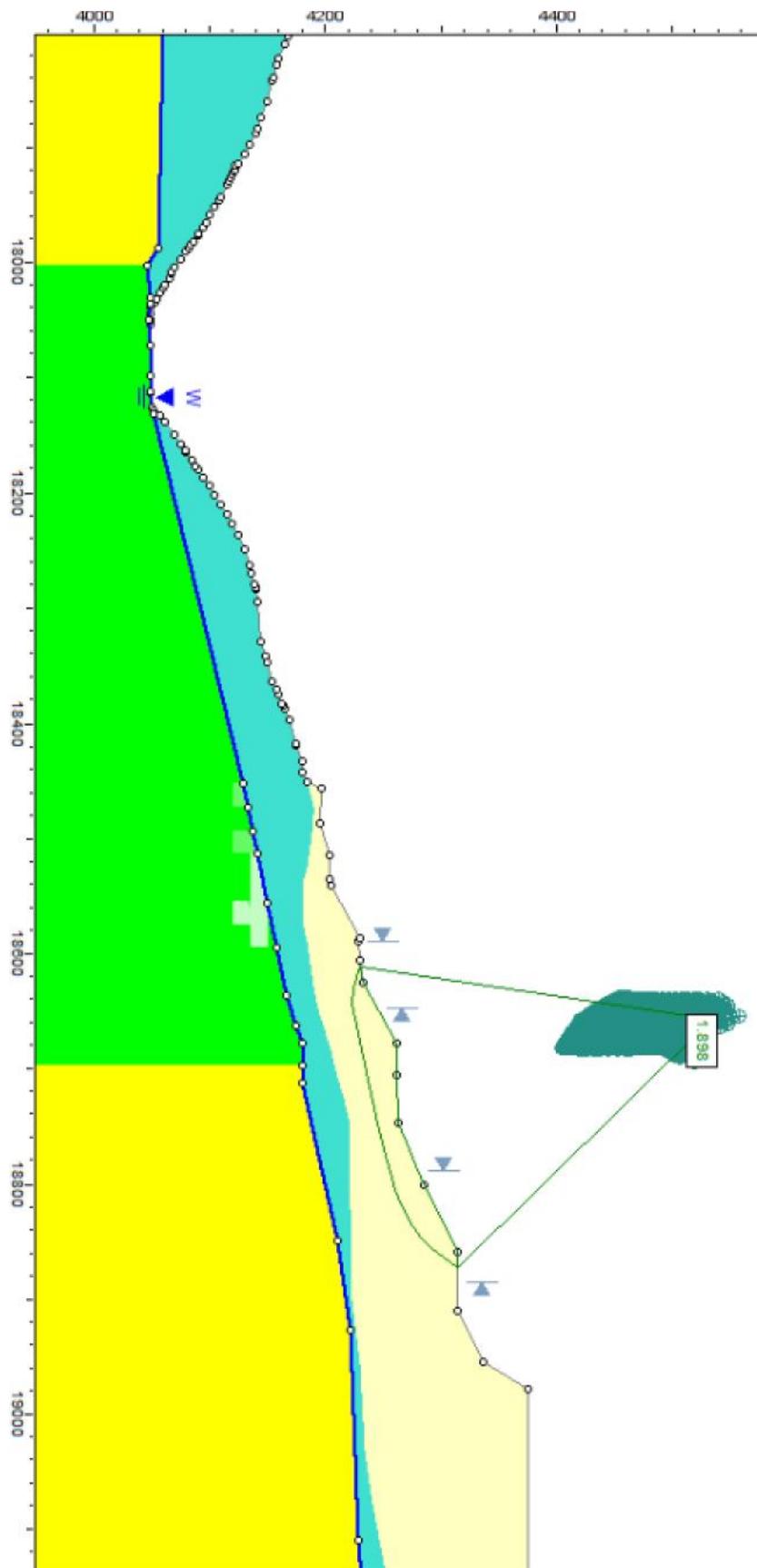
Anexo 73 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



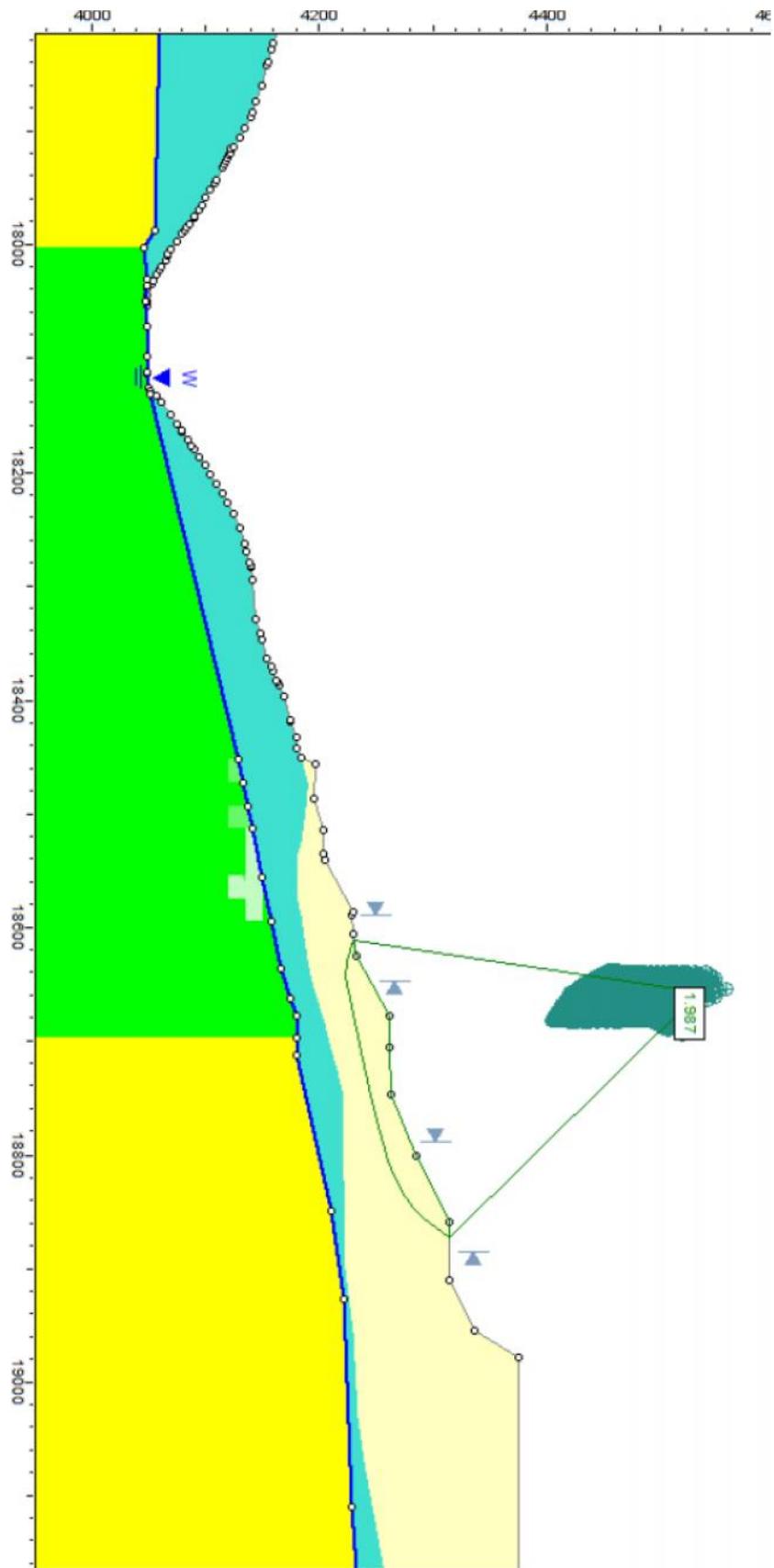
Anexo 74 - Sección1, Superficie 0103, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



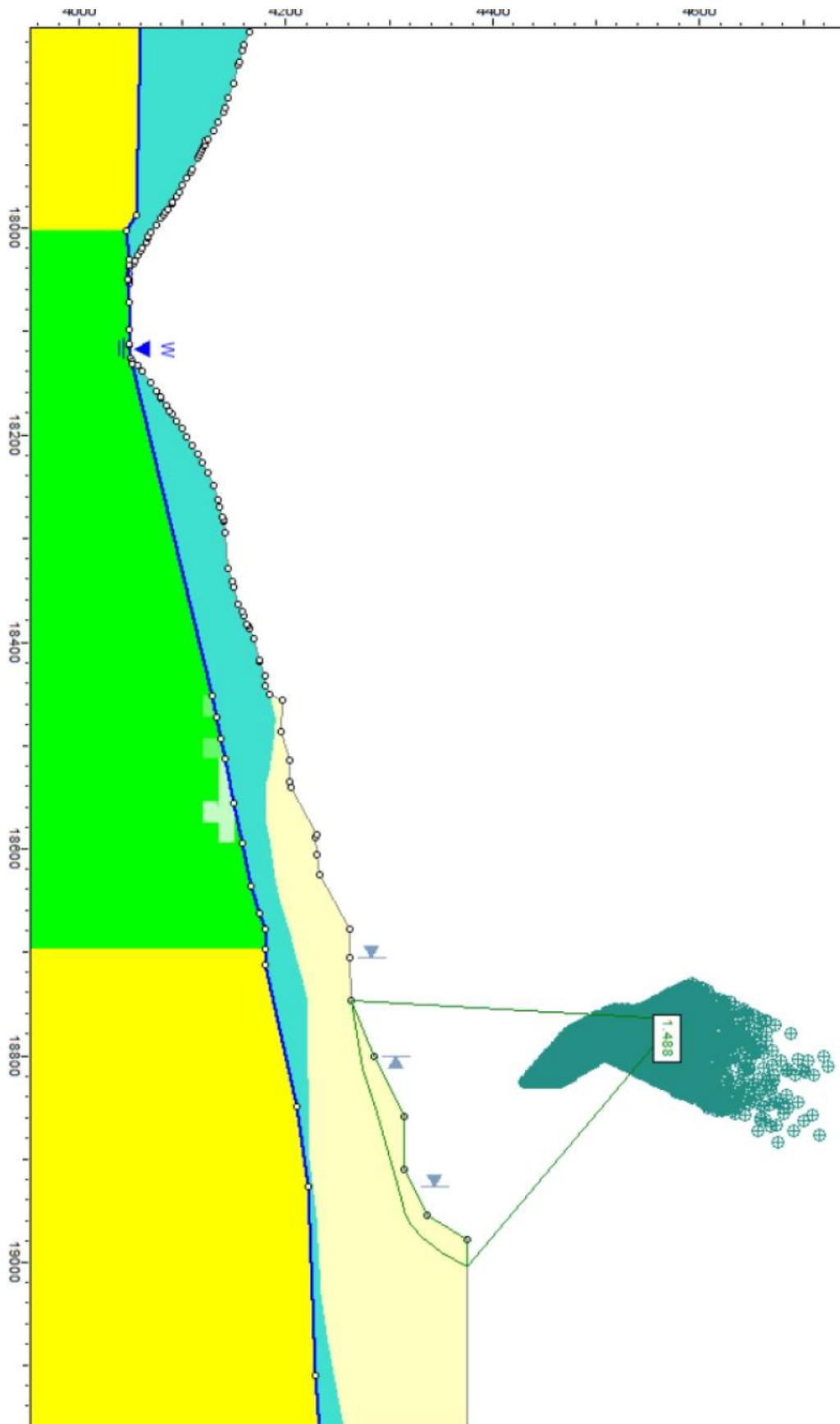
Anexo 75 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



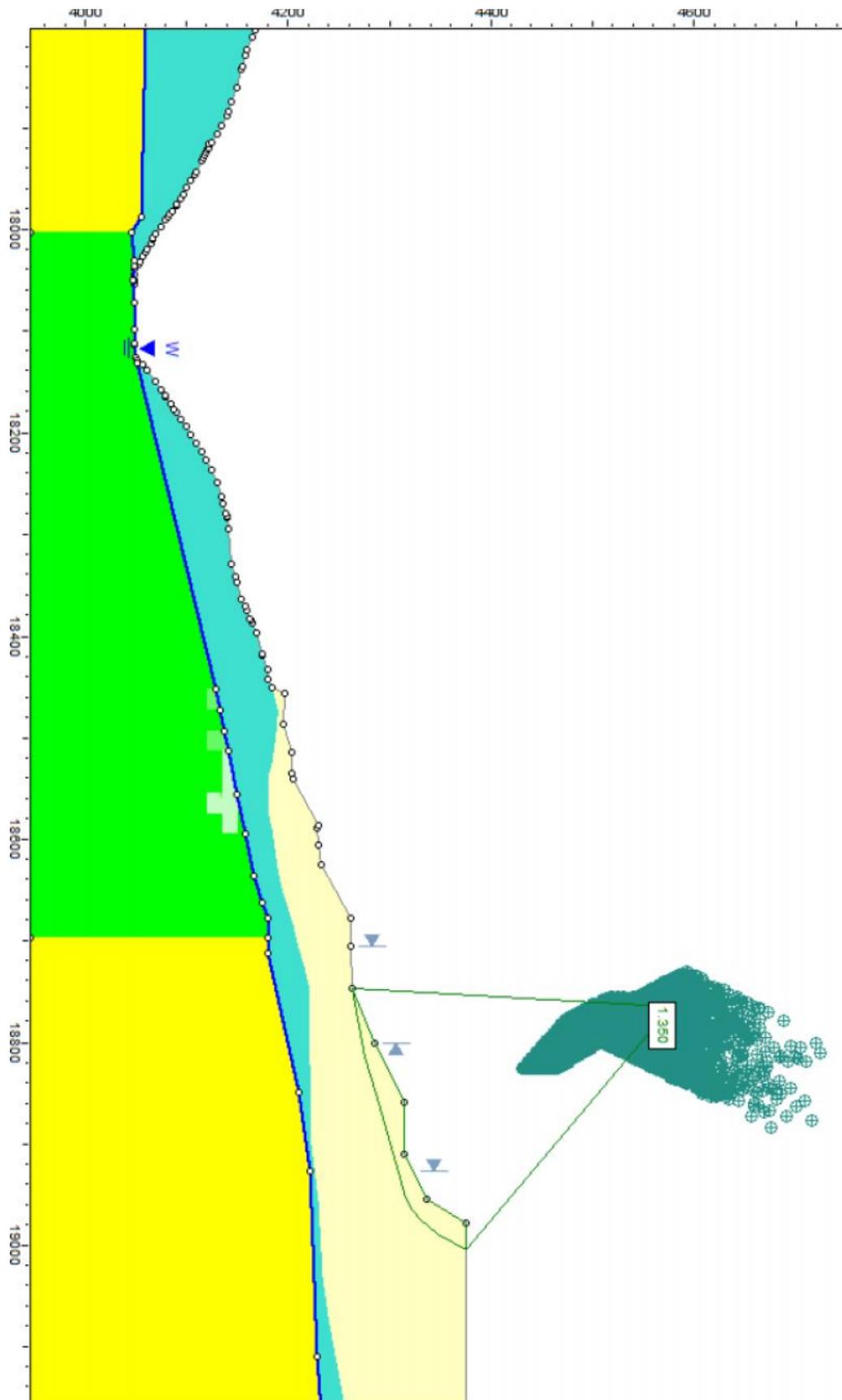
Anexo 76 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



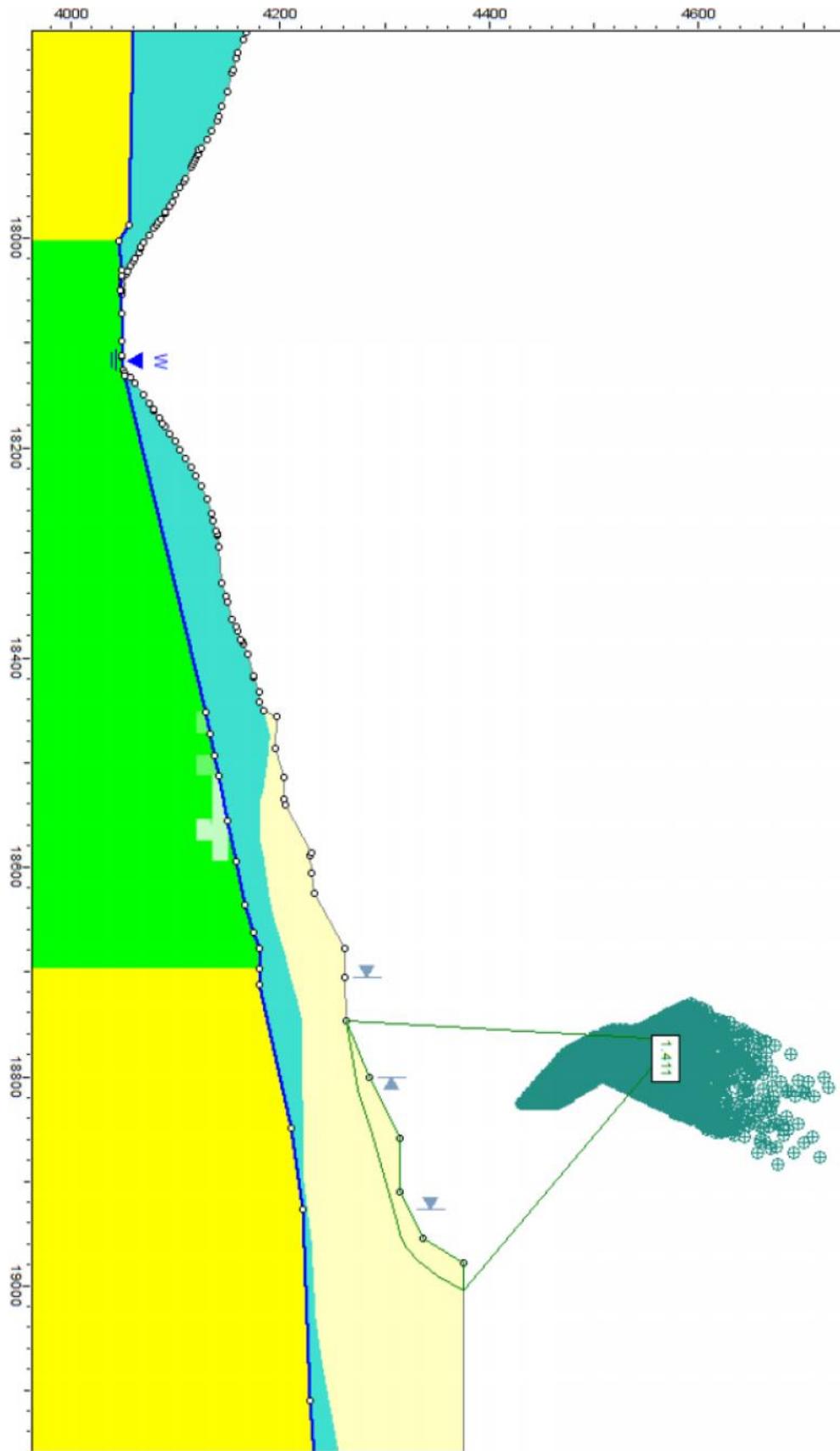
Anexo 77 - Sección1, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



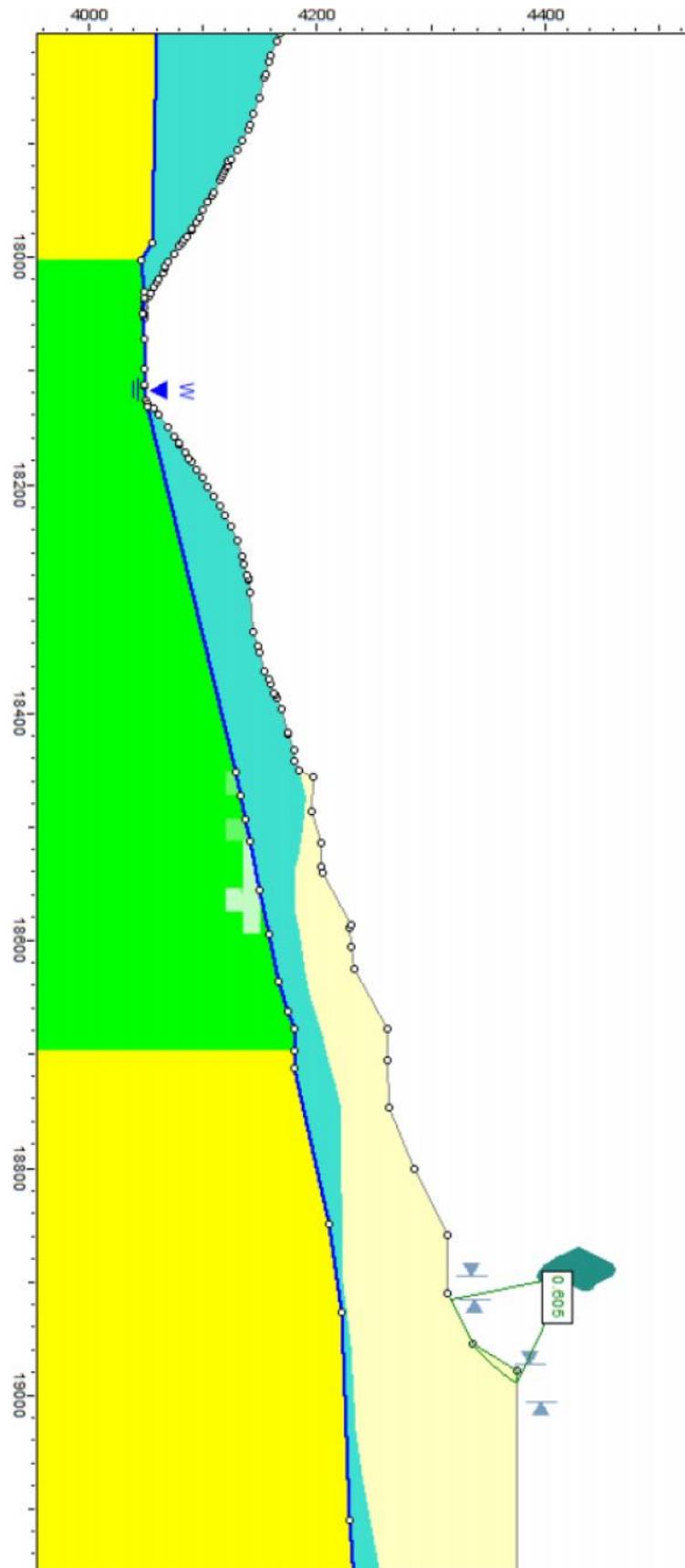
Anexo 78 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



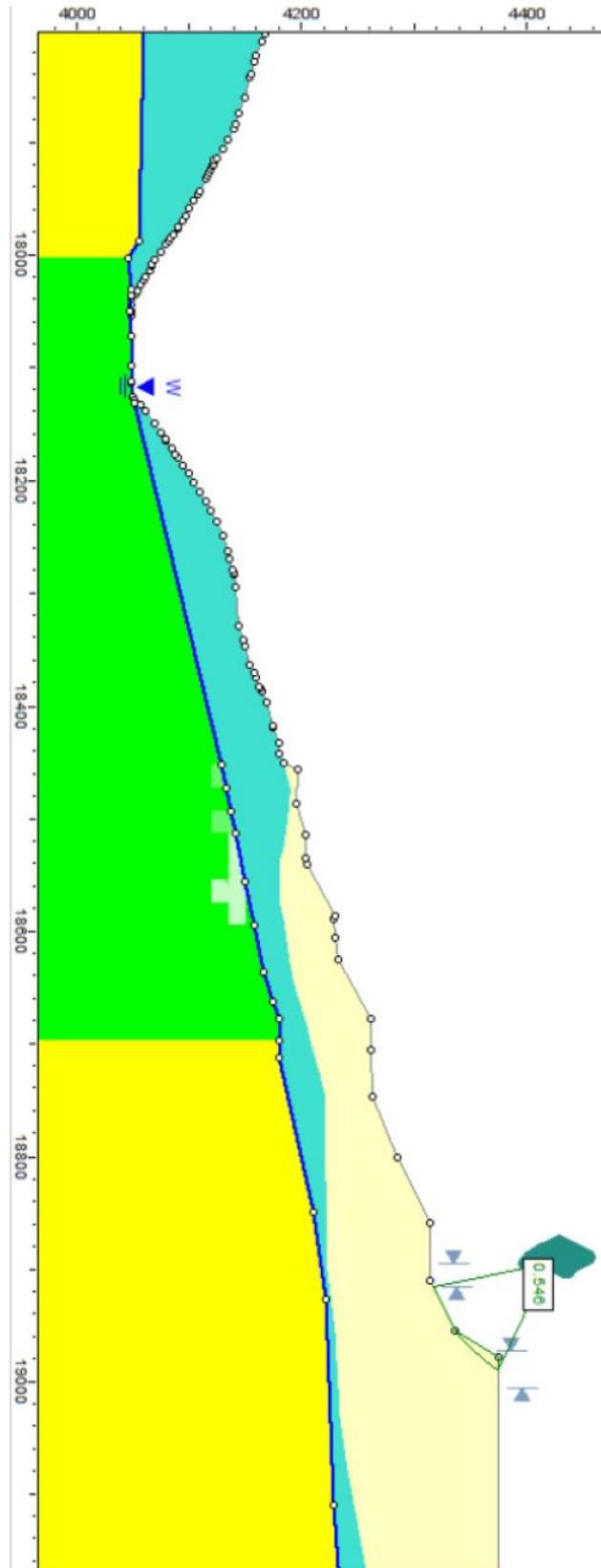
Anexo 79 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



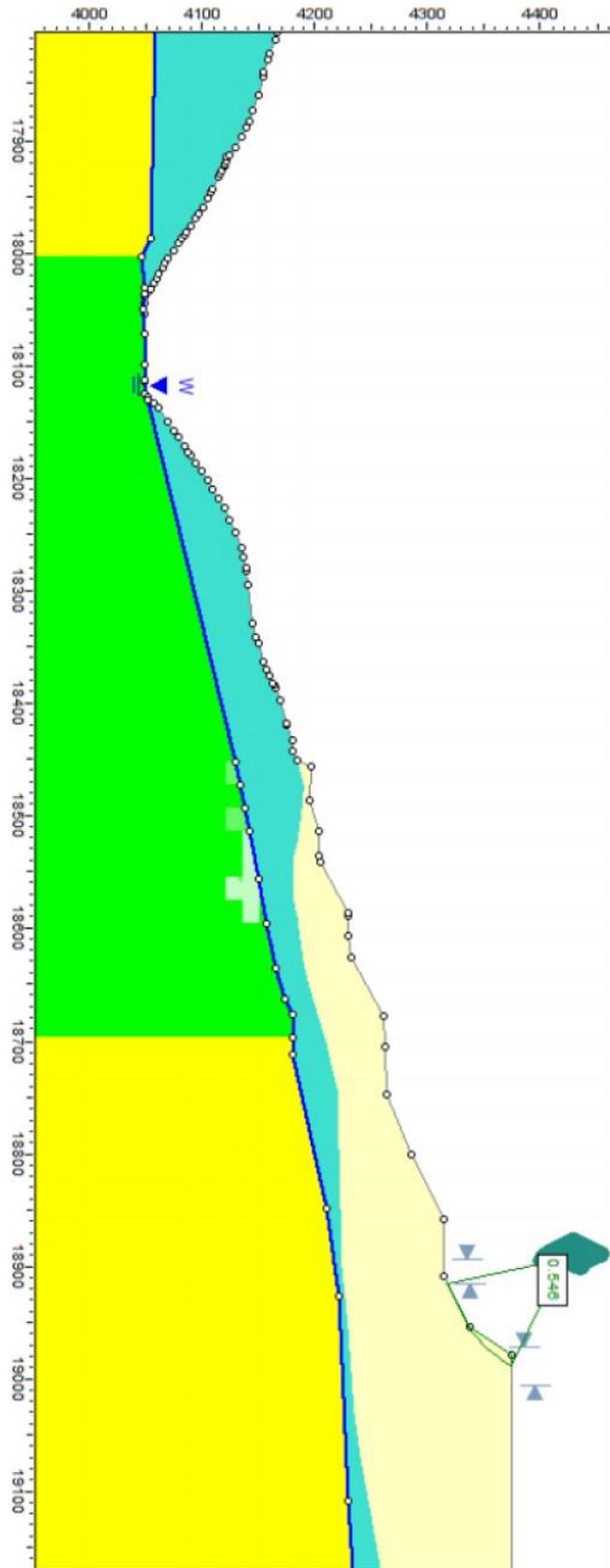
Anexo 80 - Sección1, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



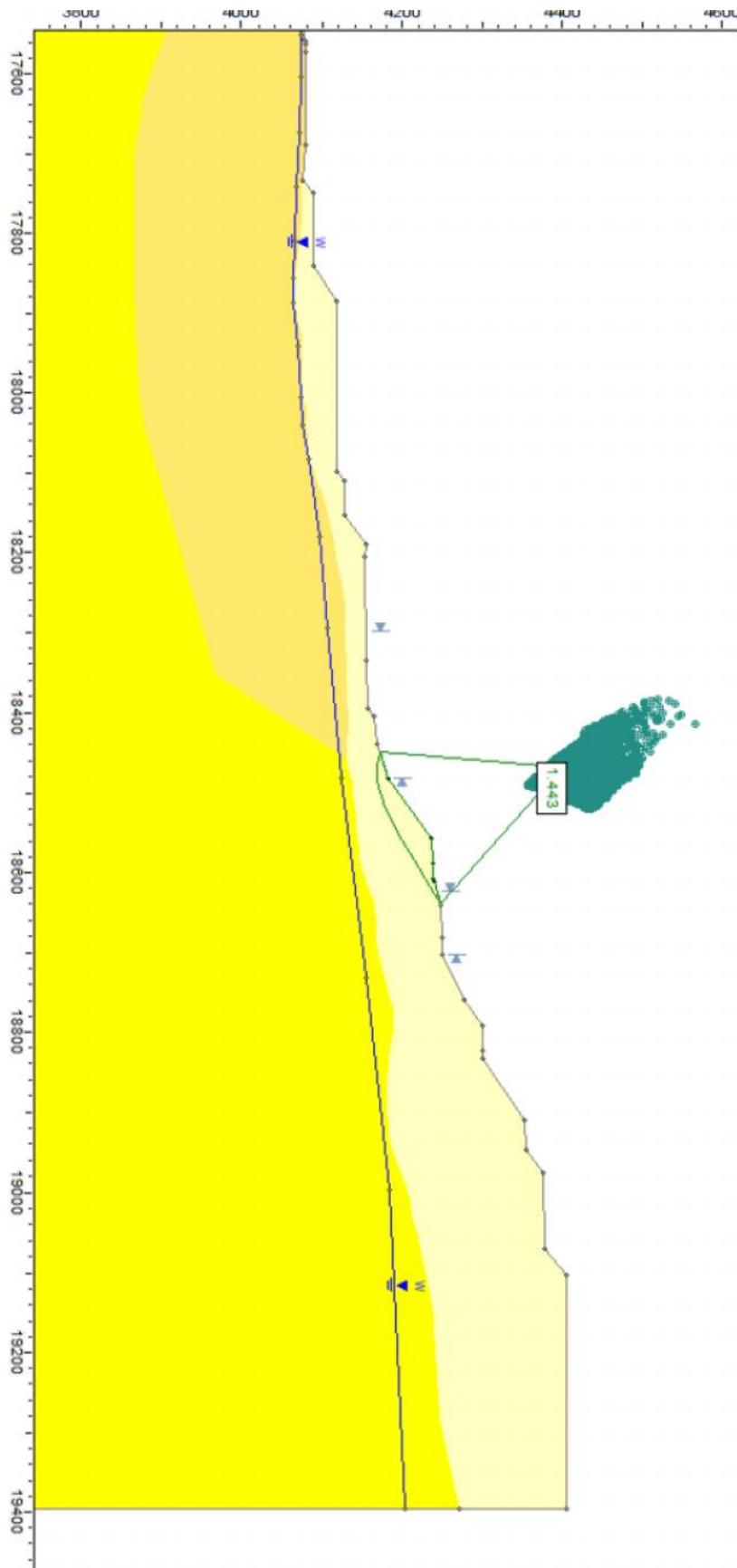
Anexo 81 - Sección1, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



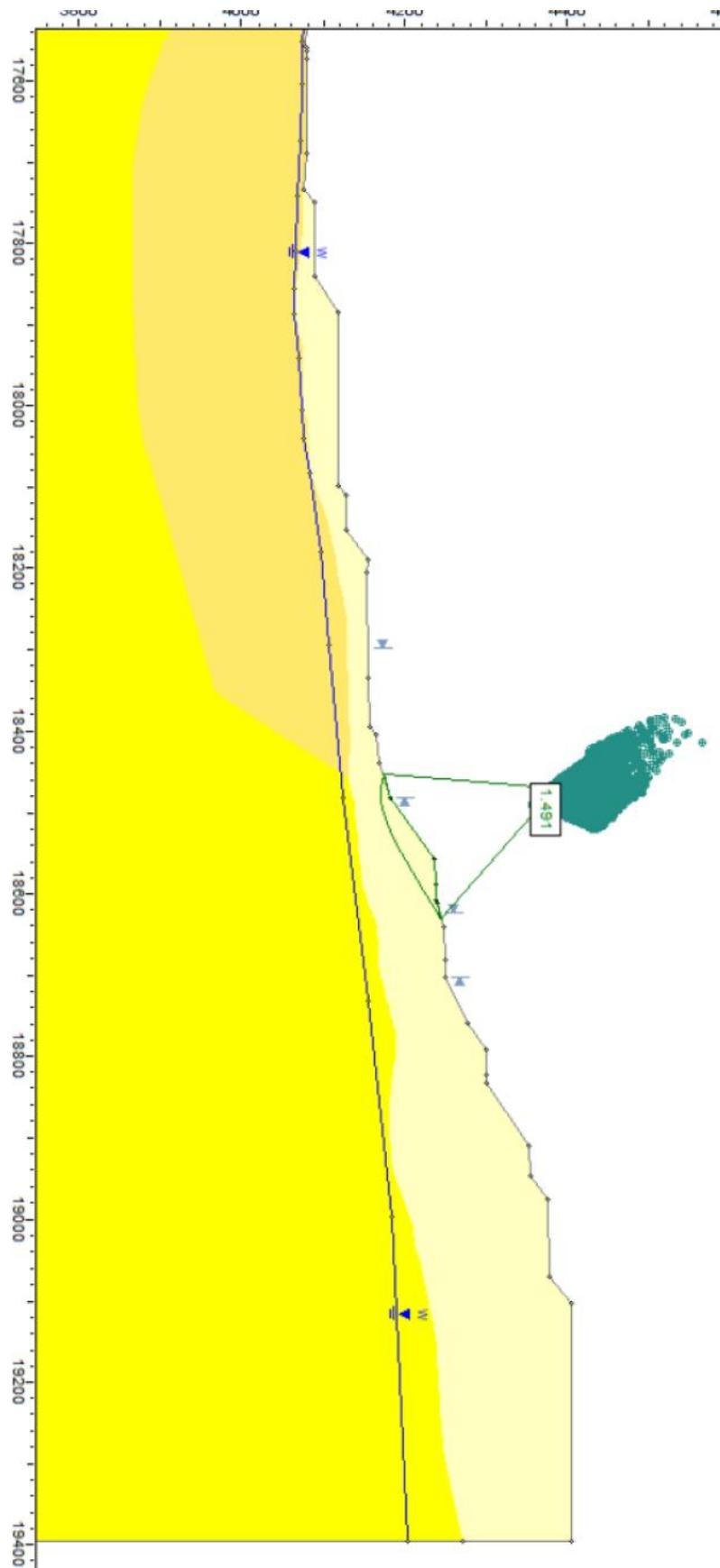
Anexo 82- Sección1, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



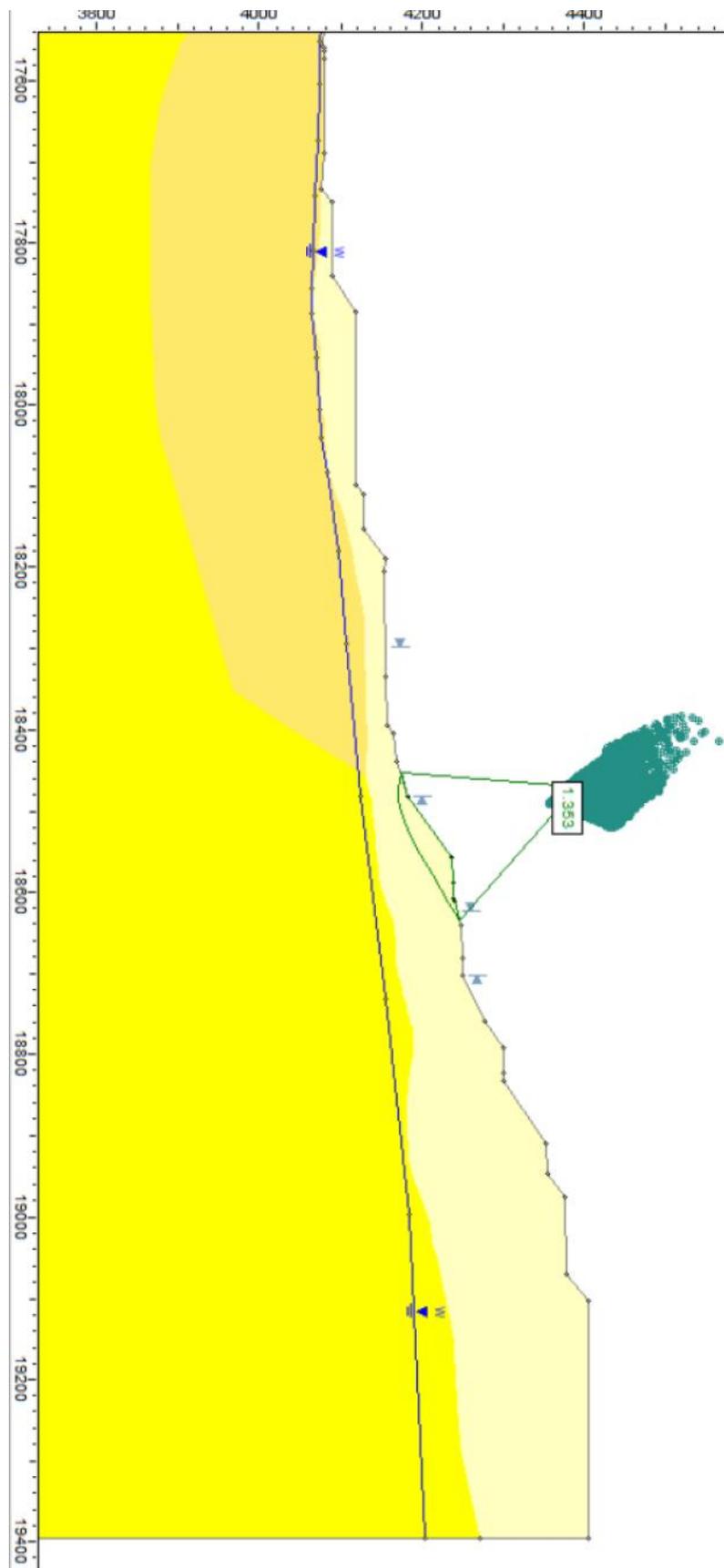
Anexo 83 - Sección1, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



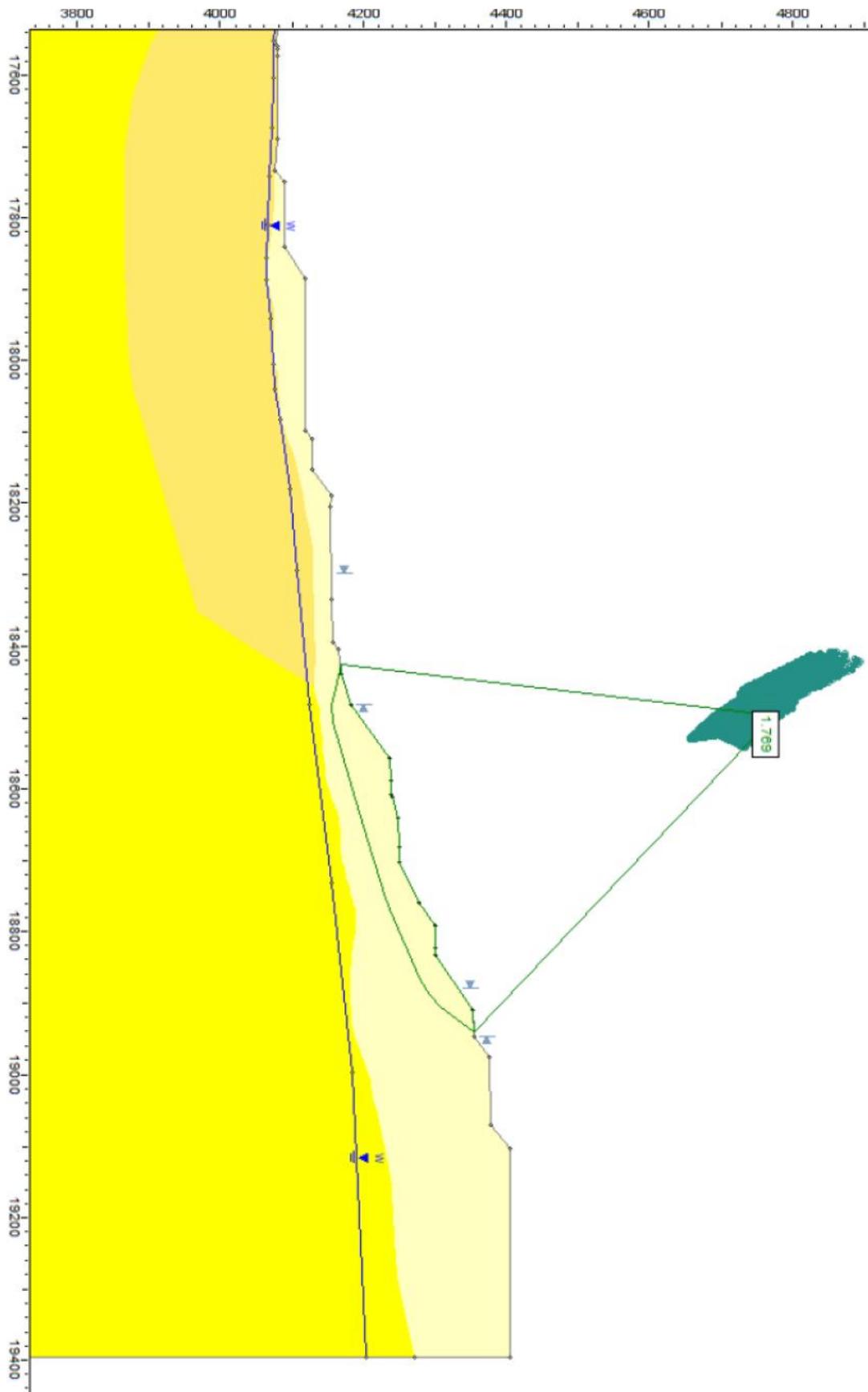
Anexo 84 – Sección2, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



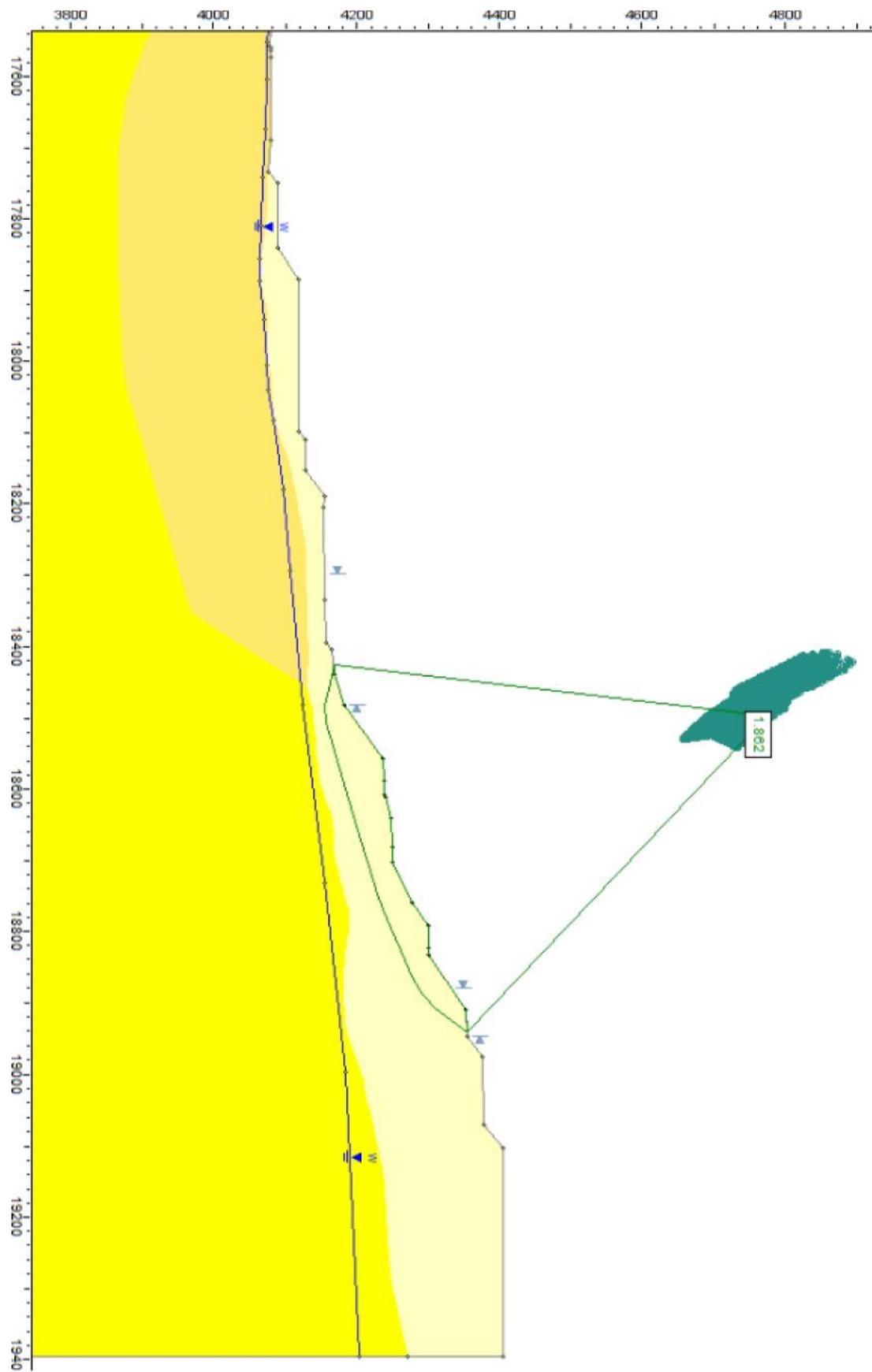
Anexo 85 - Sección2, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



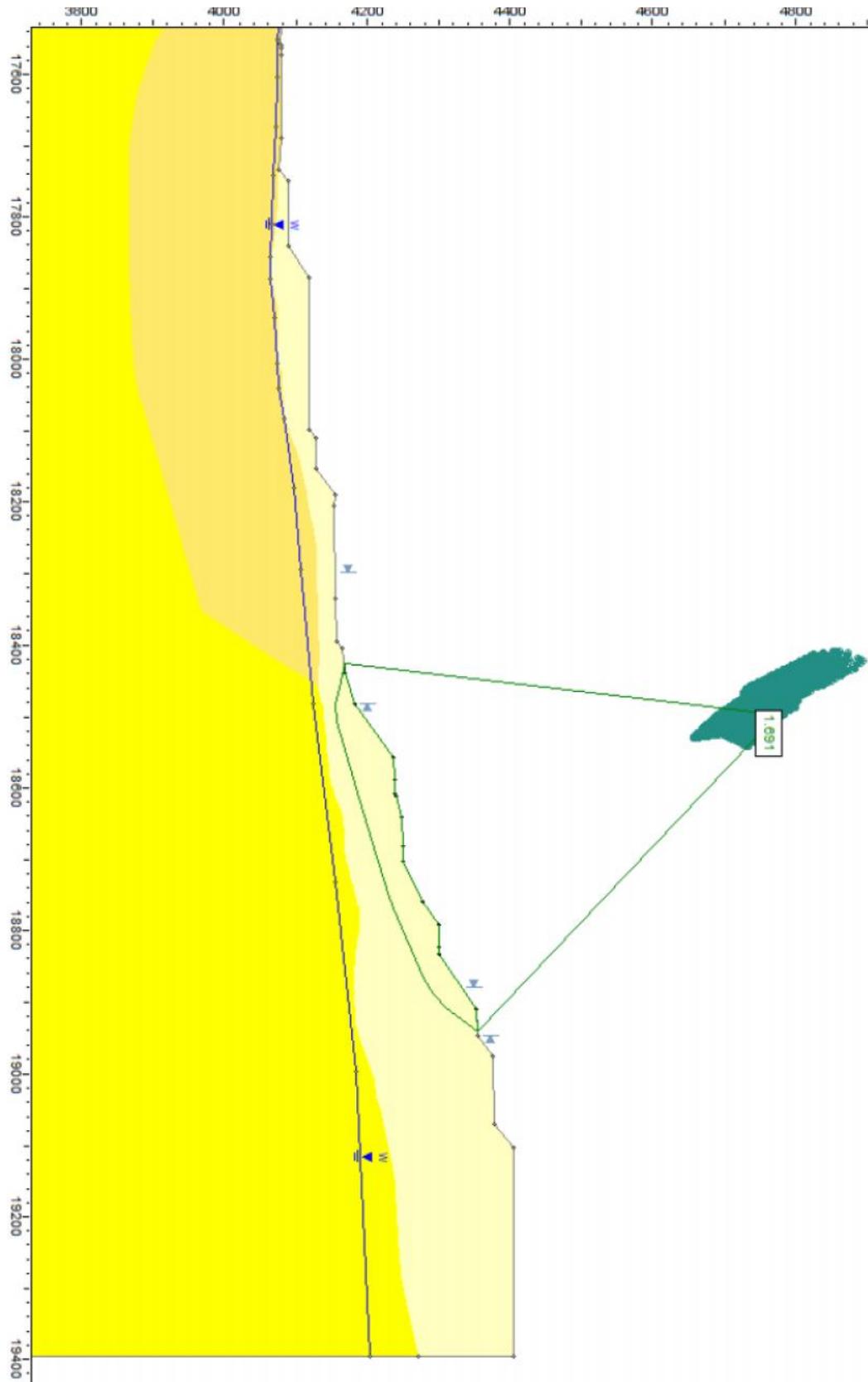
Anexo 86 - Sección2, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



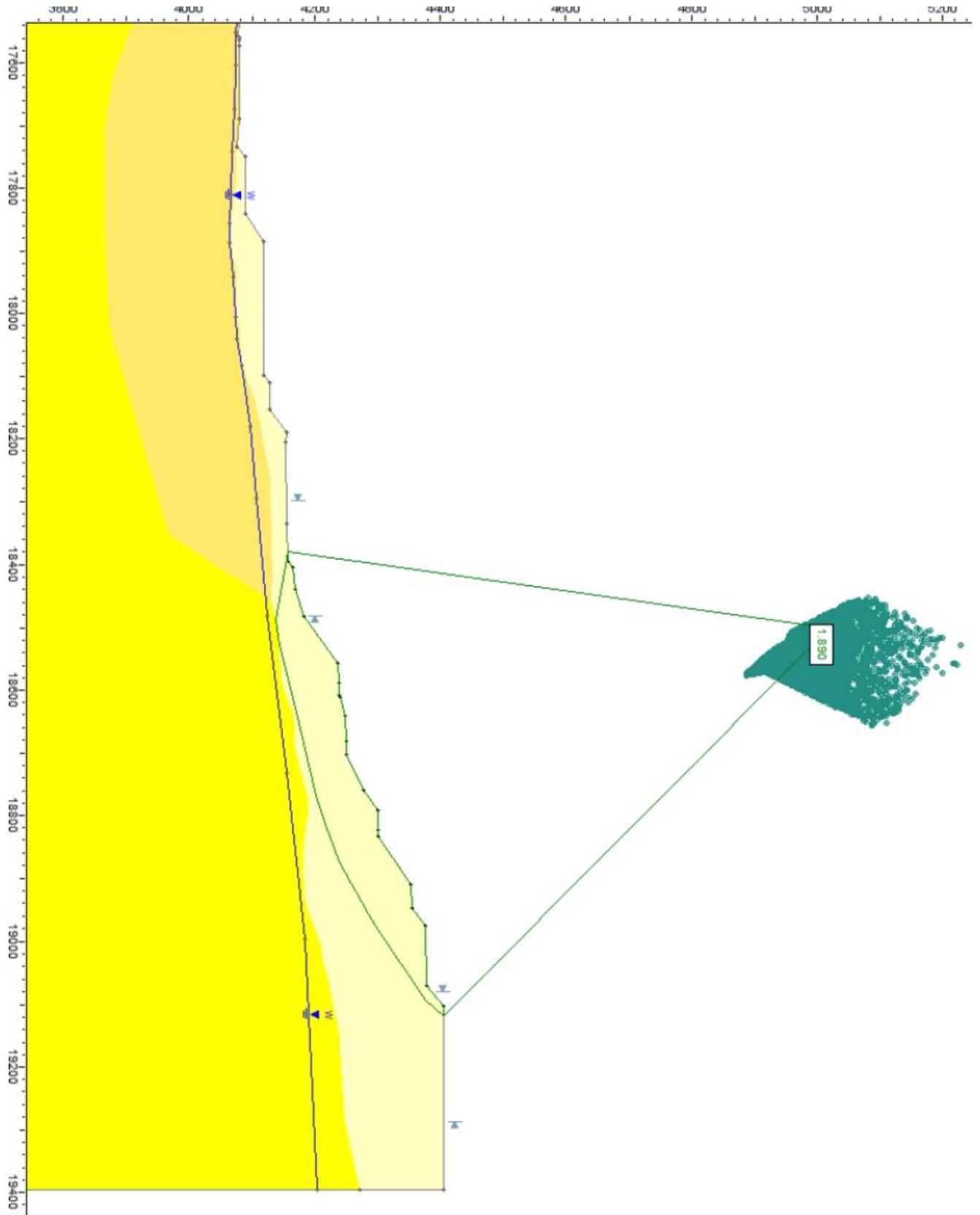
Anexo 87 -Sección2, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



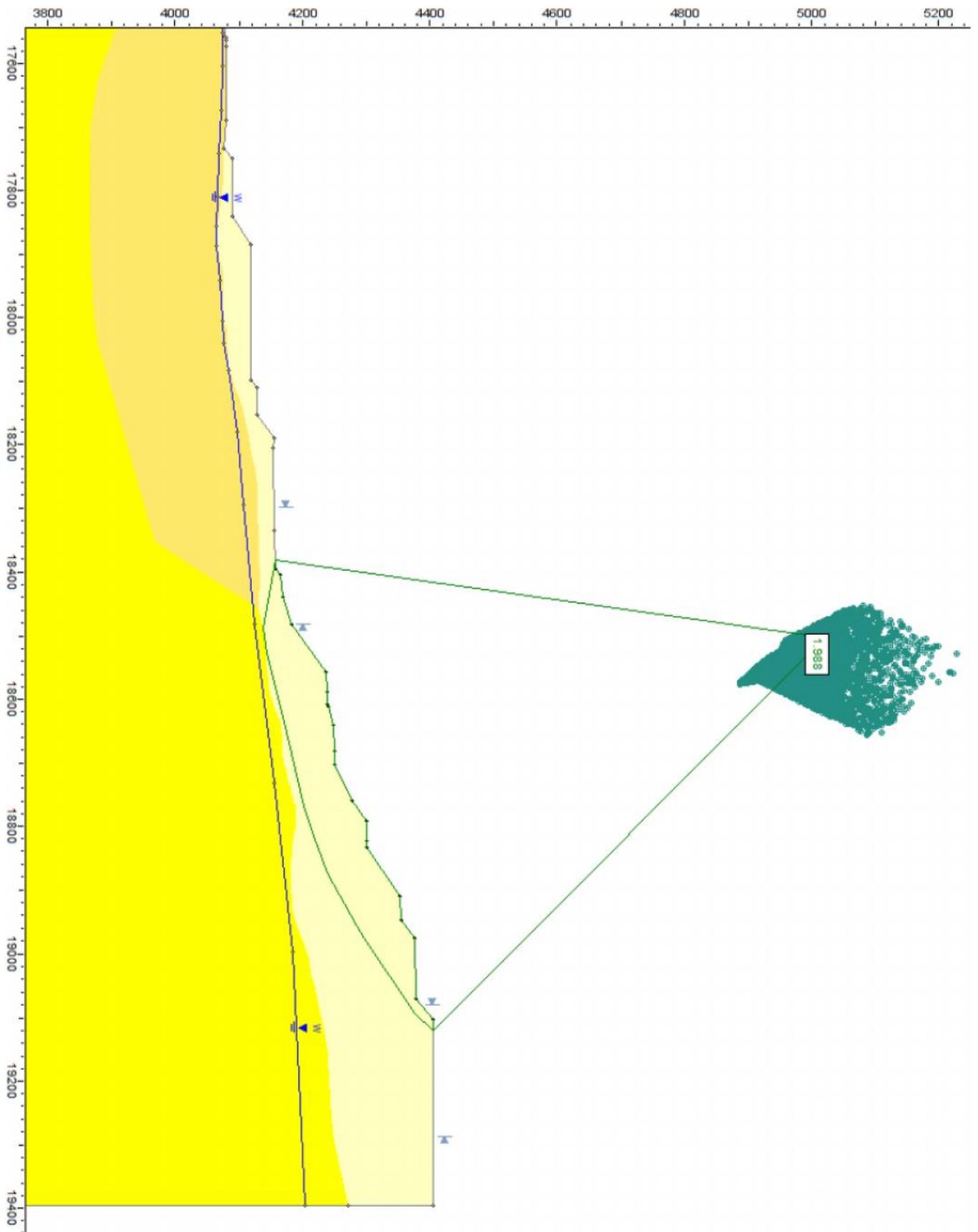
Anexo 88 - Sección2, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



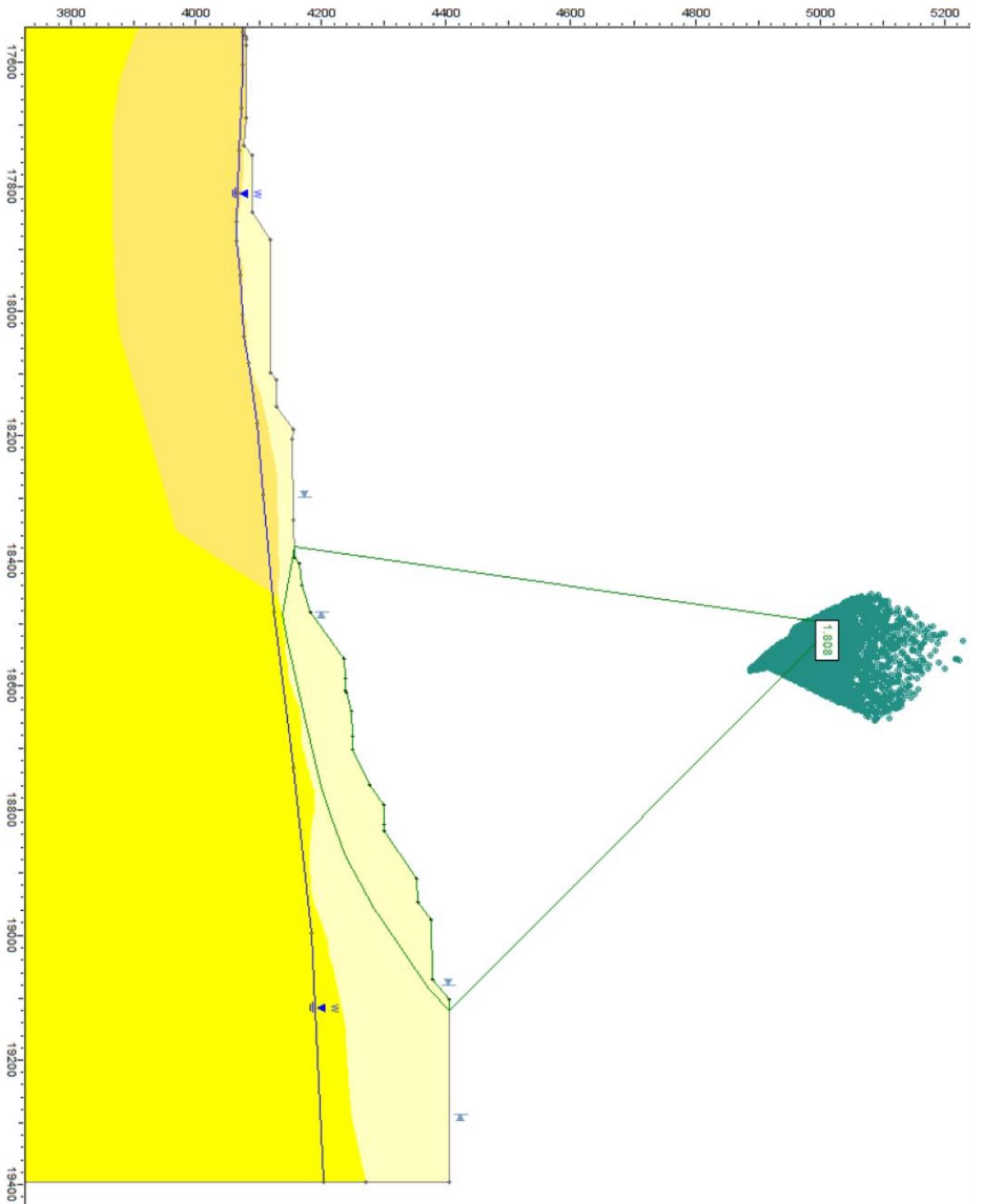
Anexo 89 - Sección2, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



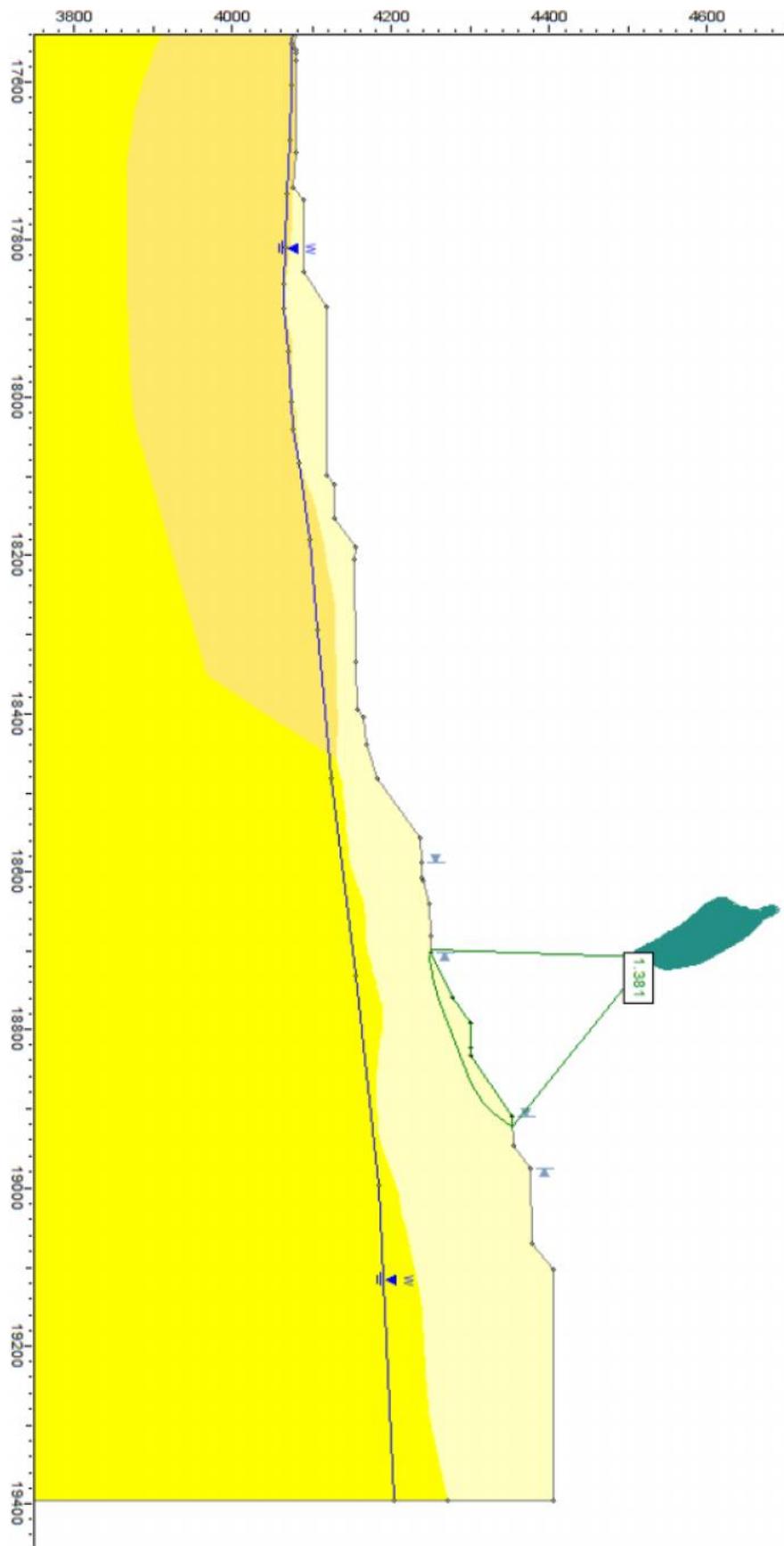
Anexo 90 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



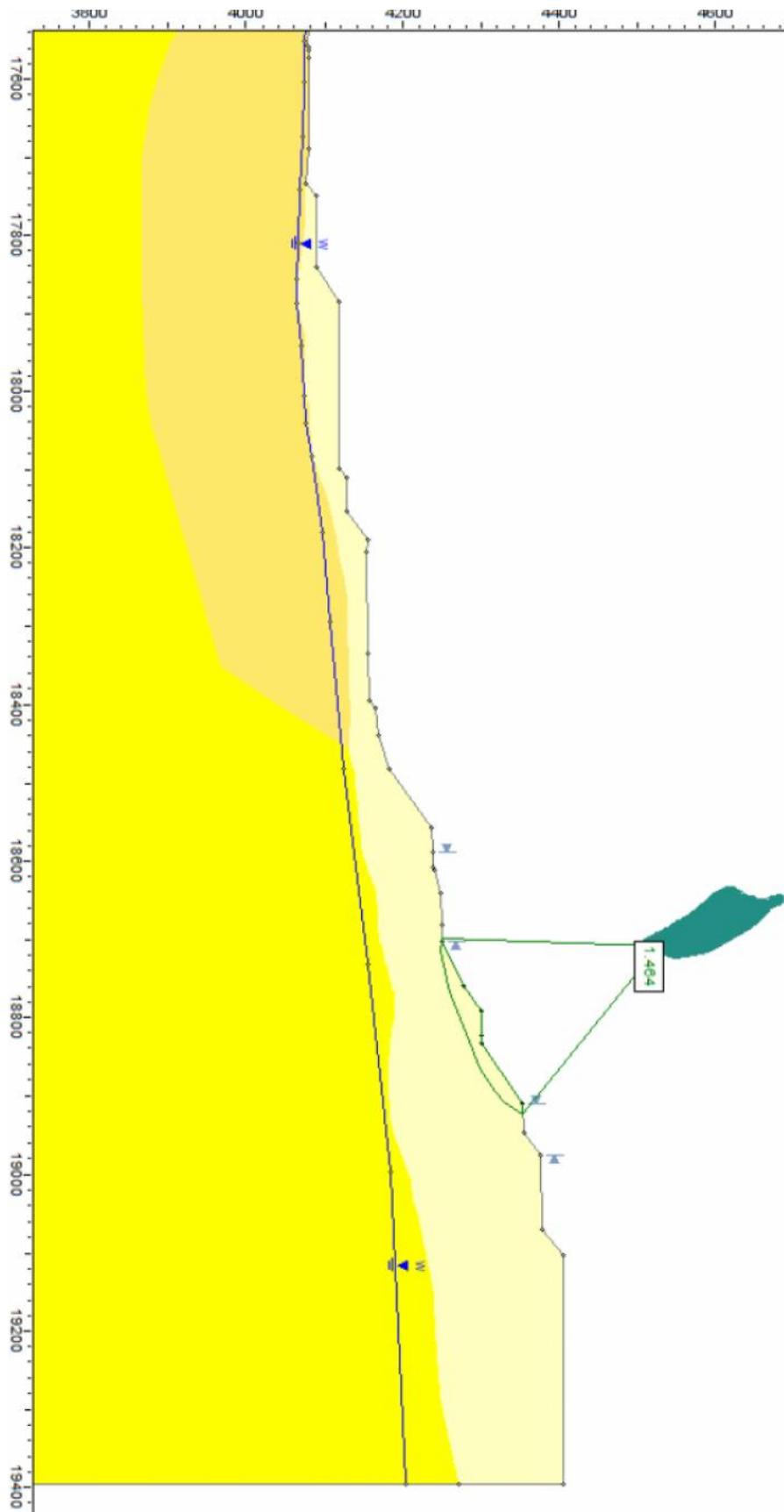
Anexo 91 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



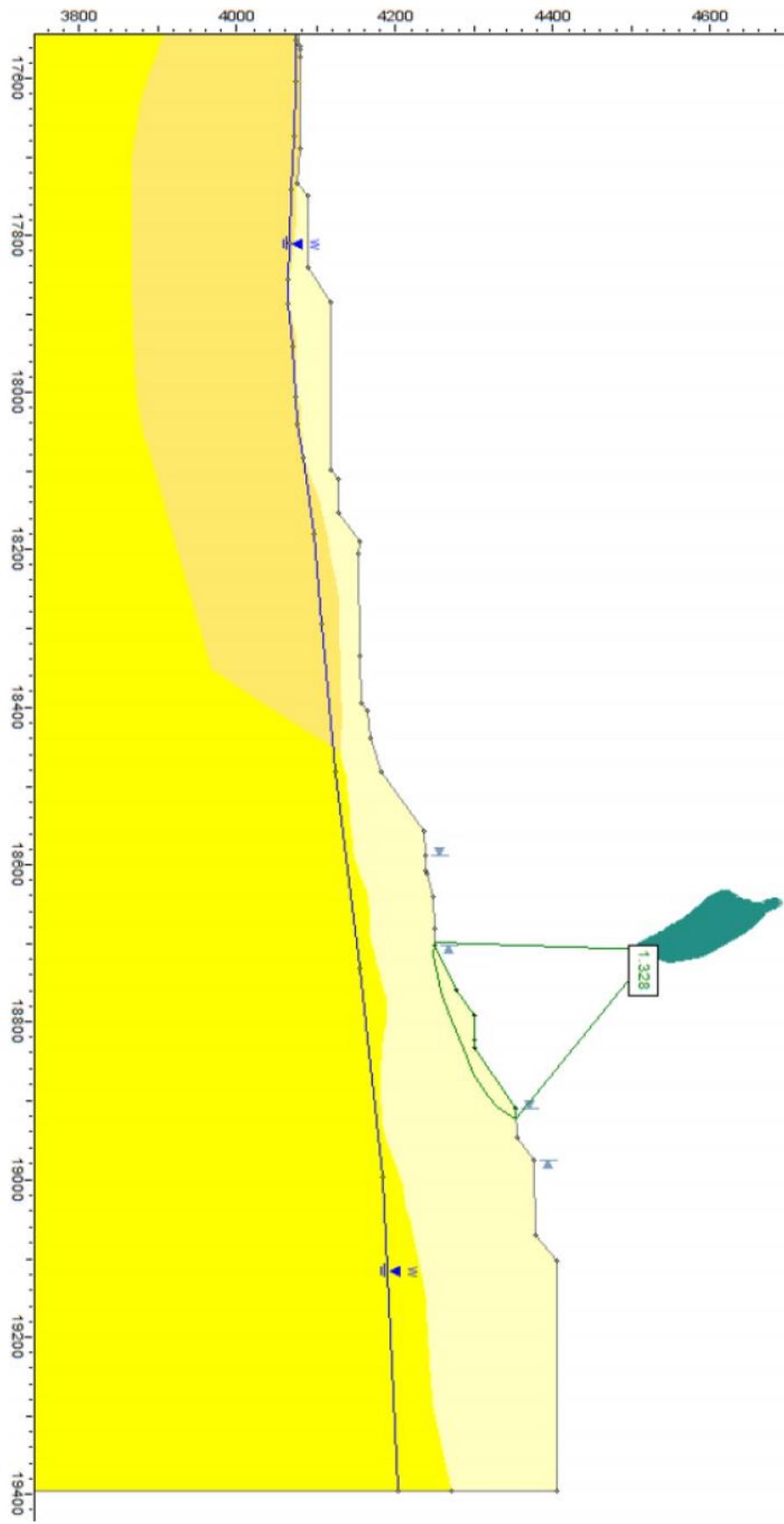
Anexo 92 - Sección2, Superficie 0204, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



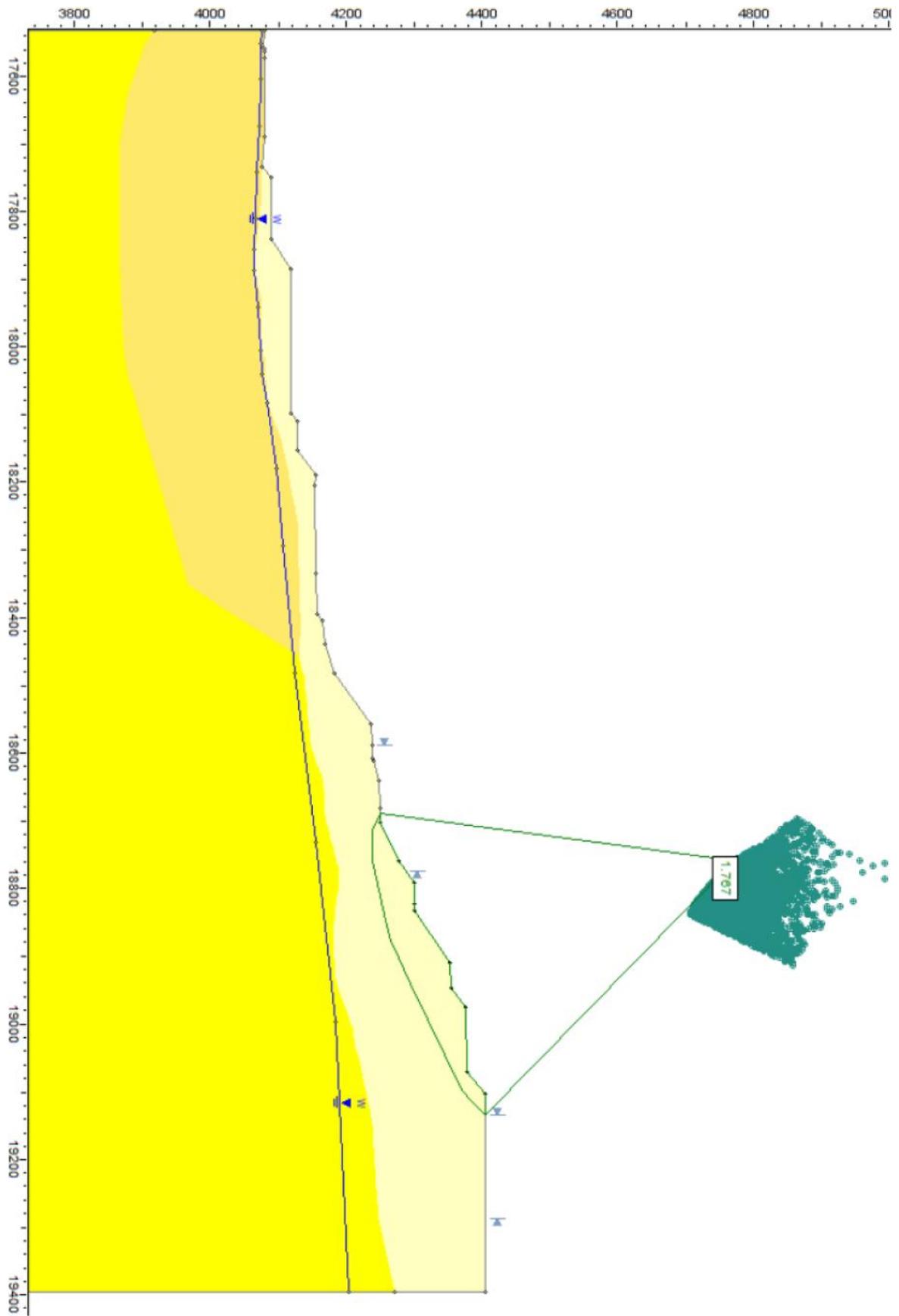
Anexo 93- Sección2, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



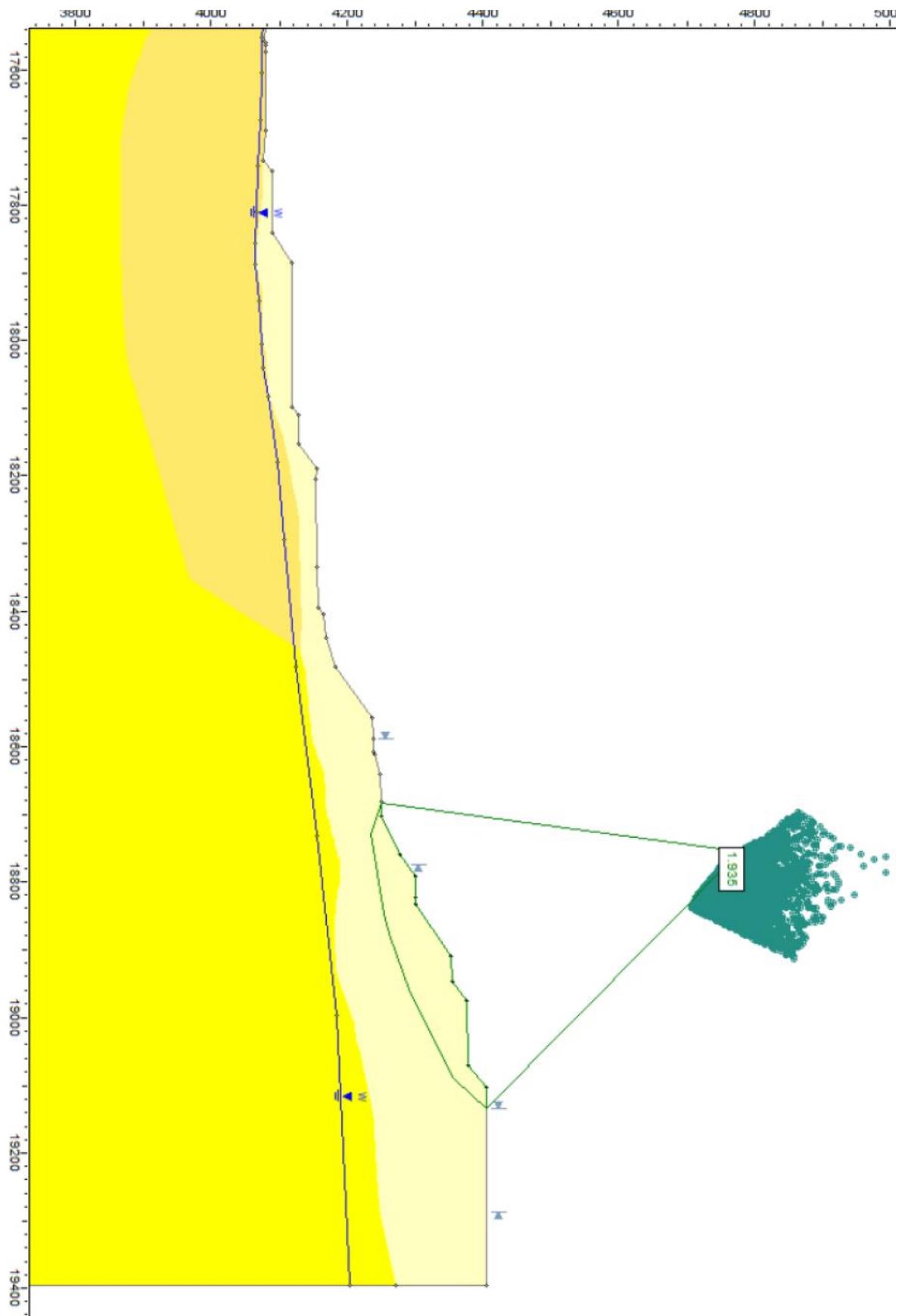
Anexo 94 - Sección2, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



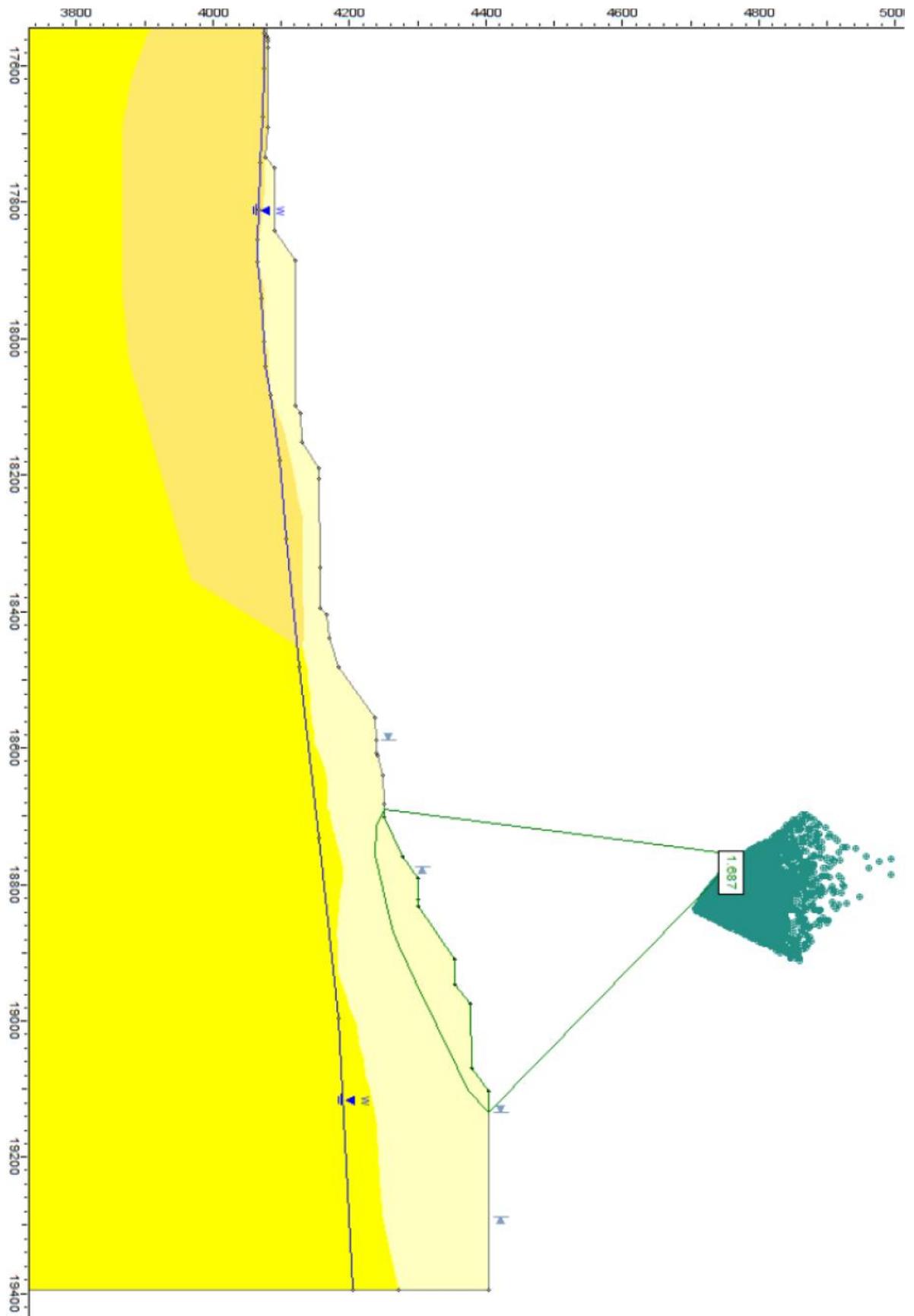
Anexo 95 - Sección2, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



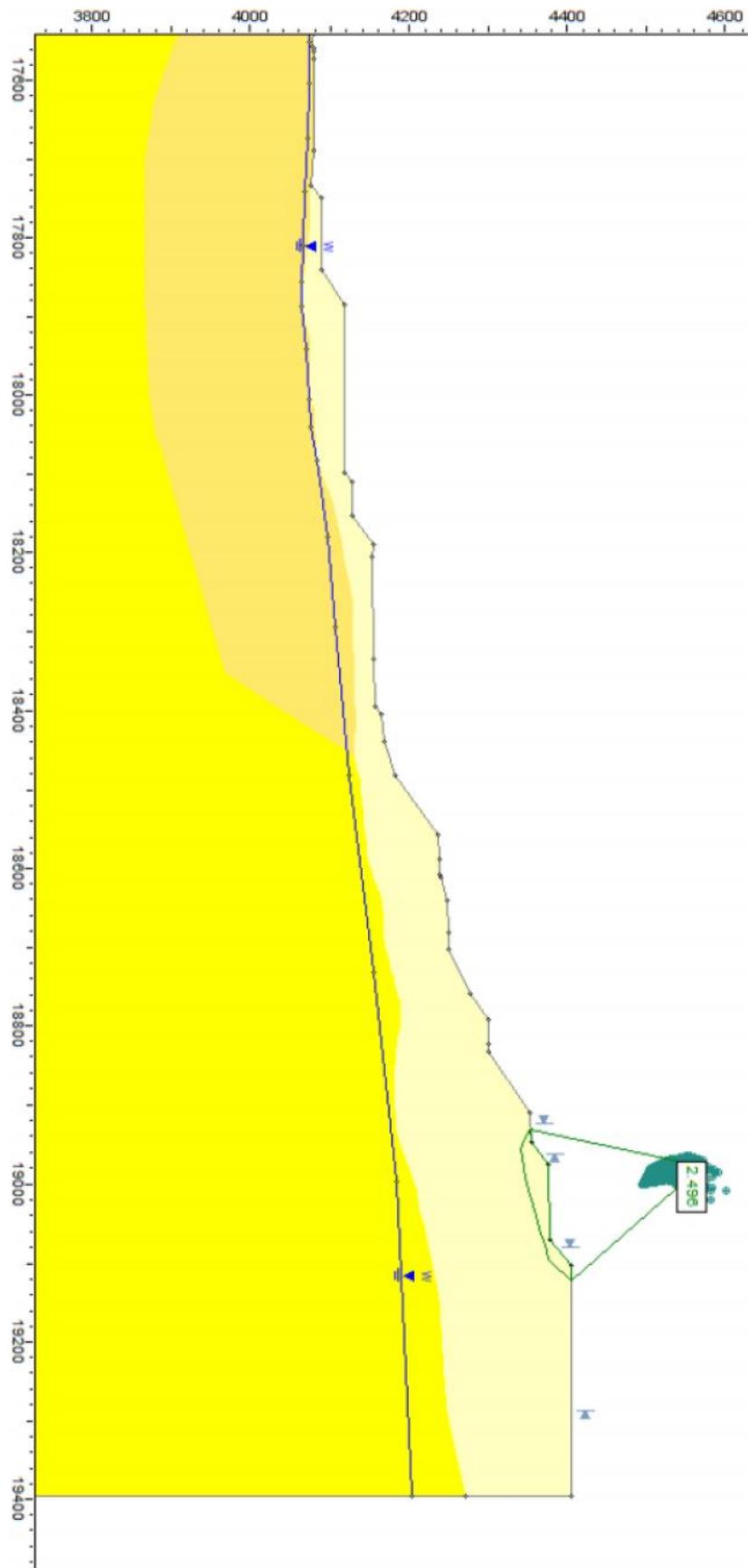
Anexo 96 - Sección2, Superficie 0304, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



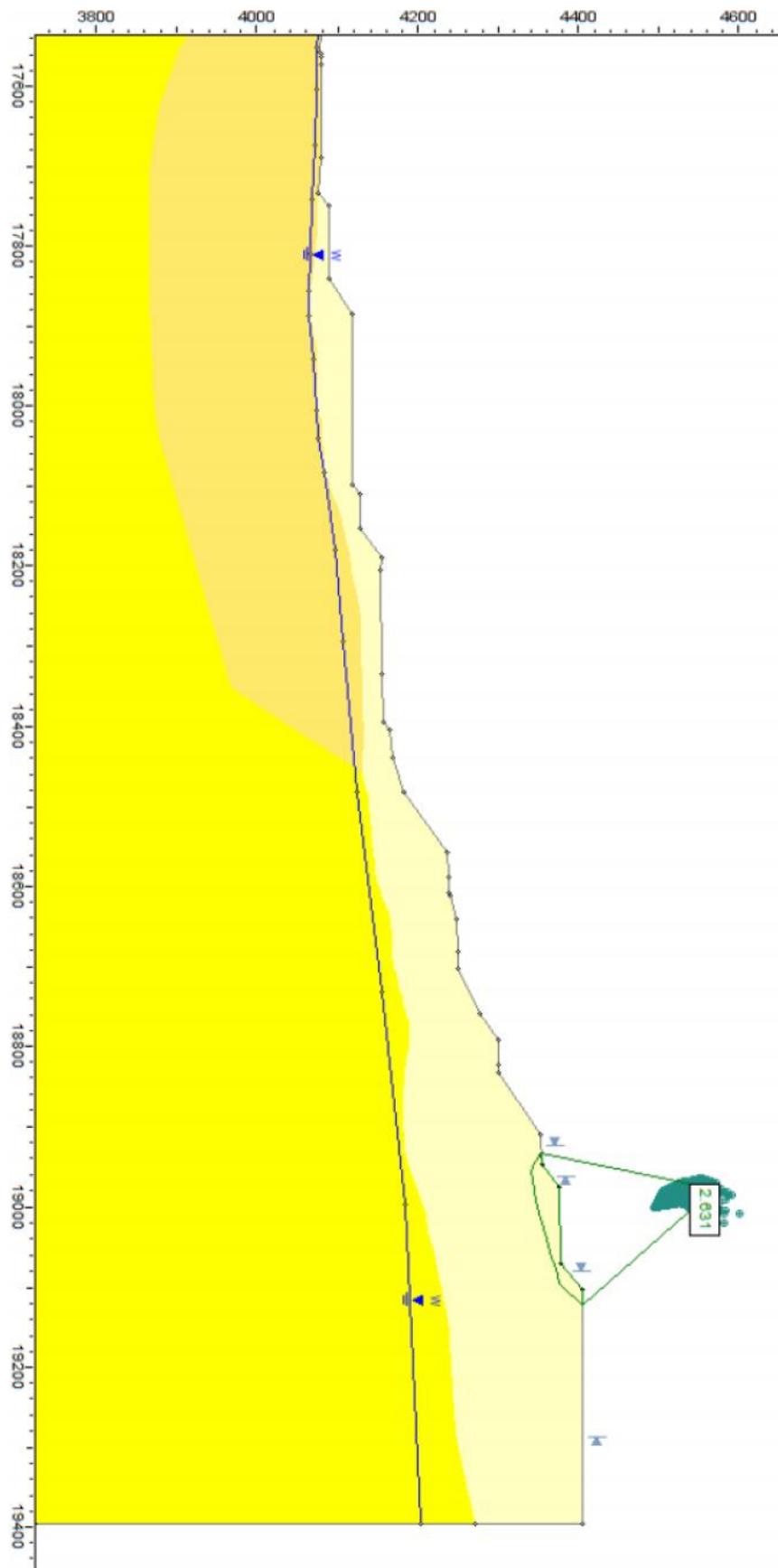
Anexo 97- Sección2, Superficie 0304, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



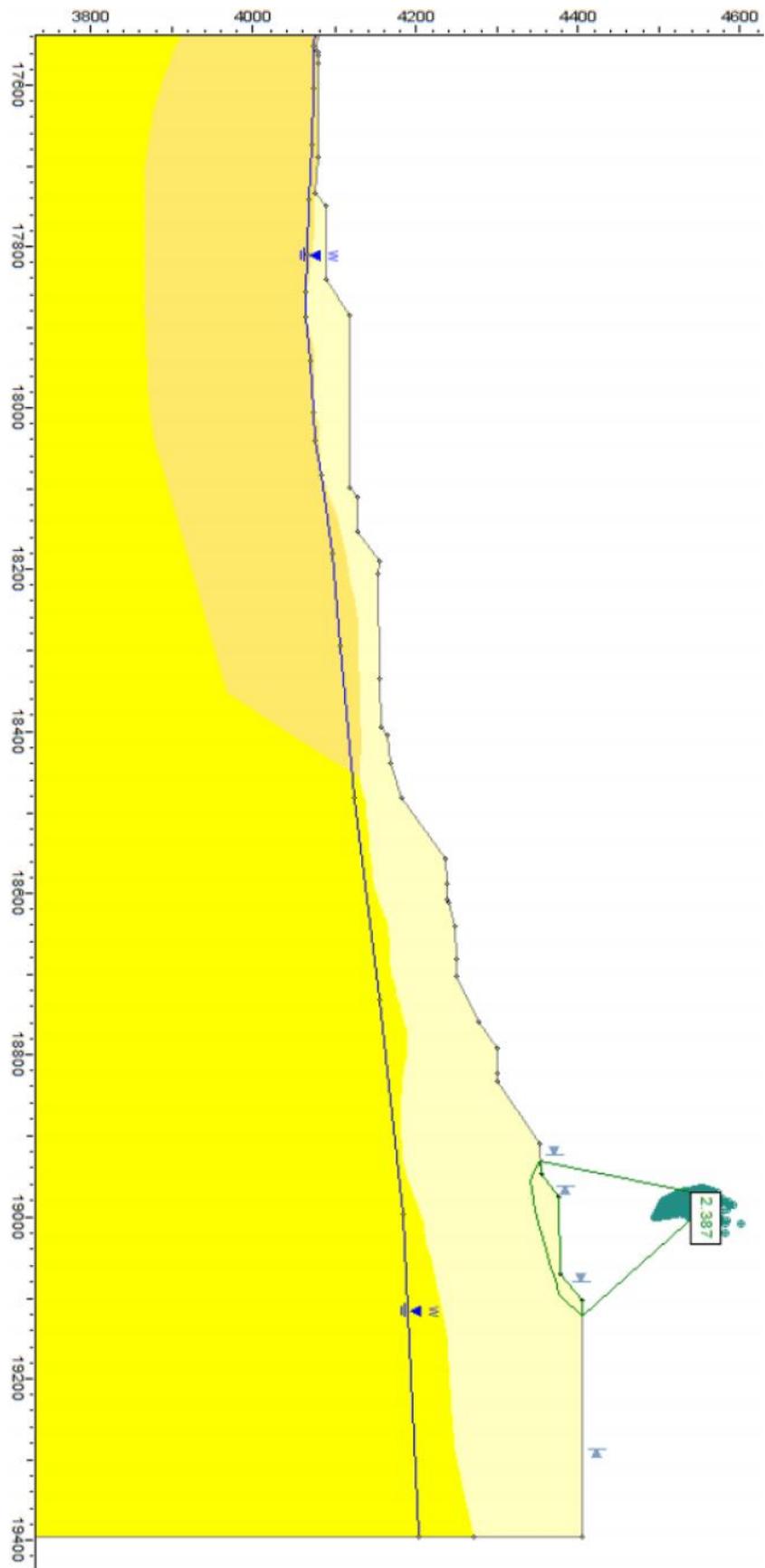
Anexo 98- Sección2, Superficie 0304, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



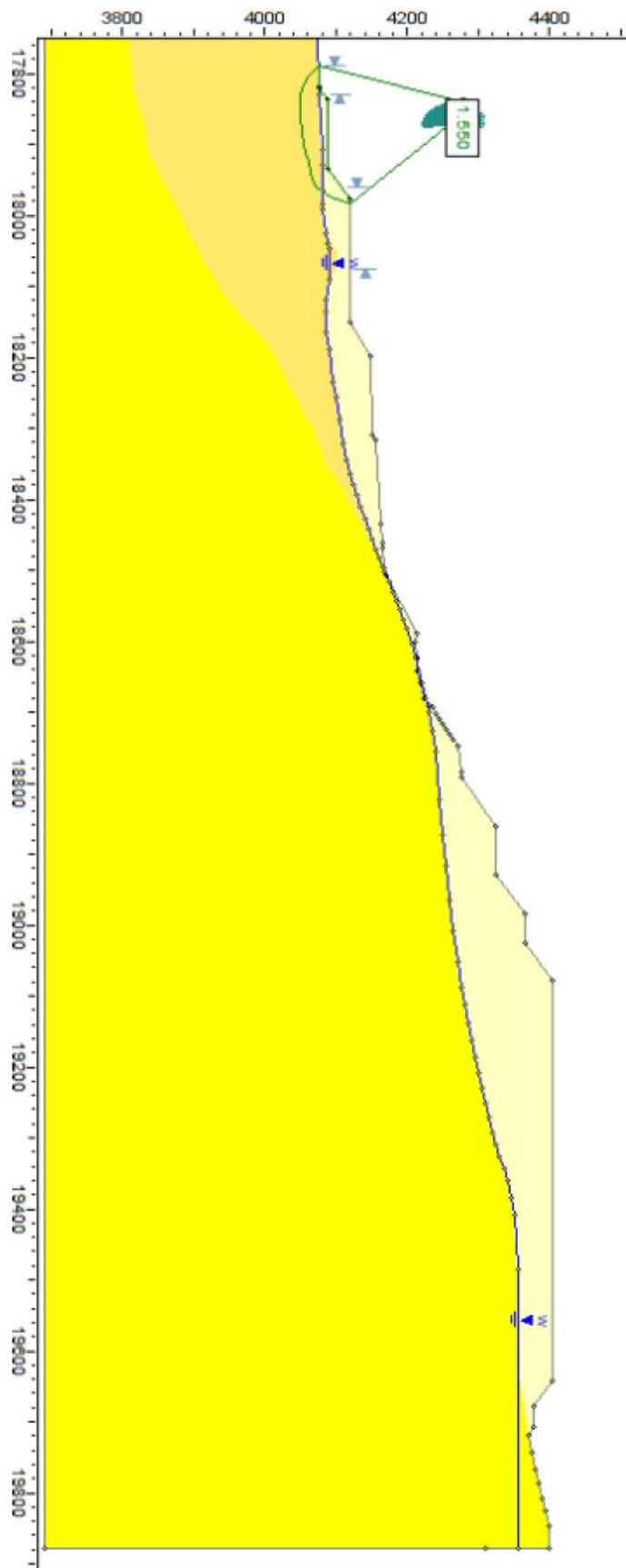
Anexo 99 - Sección2, Superficie 0404, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



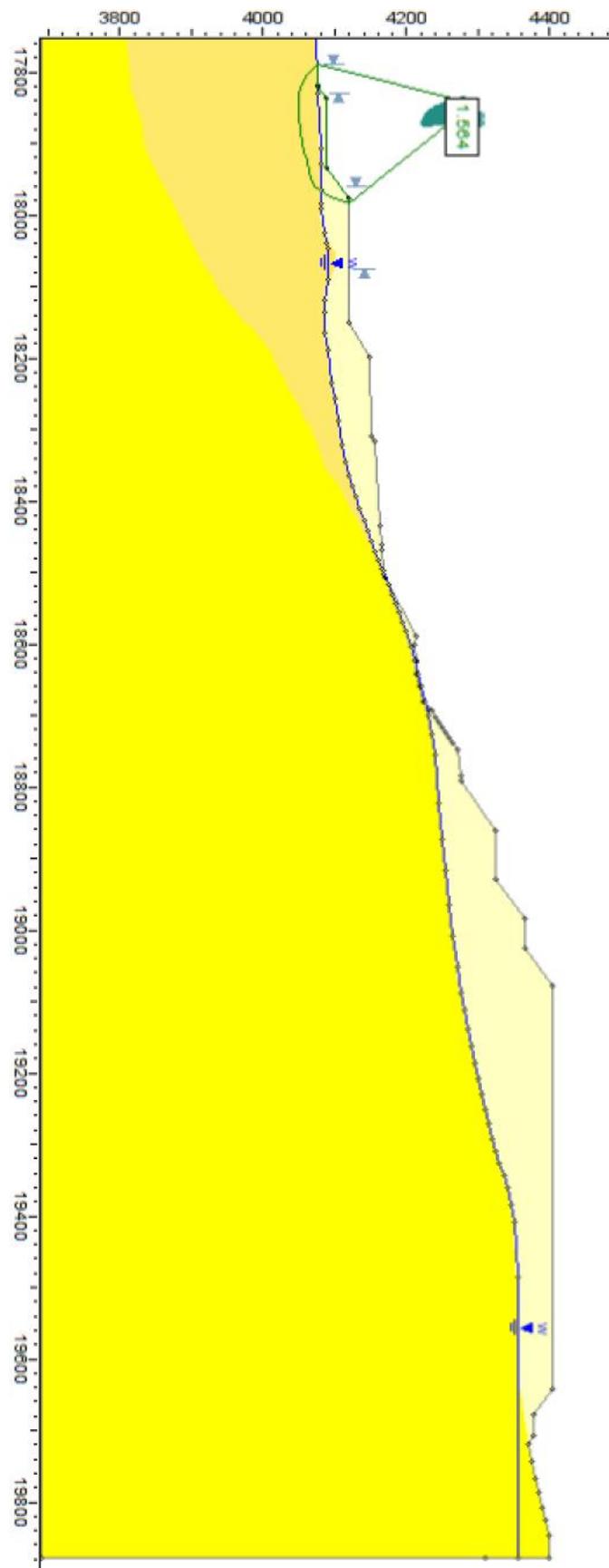
Anexo 100 - Sección2, Superficie 0404, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



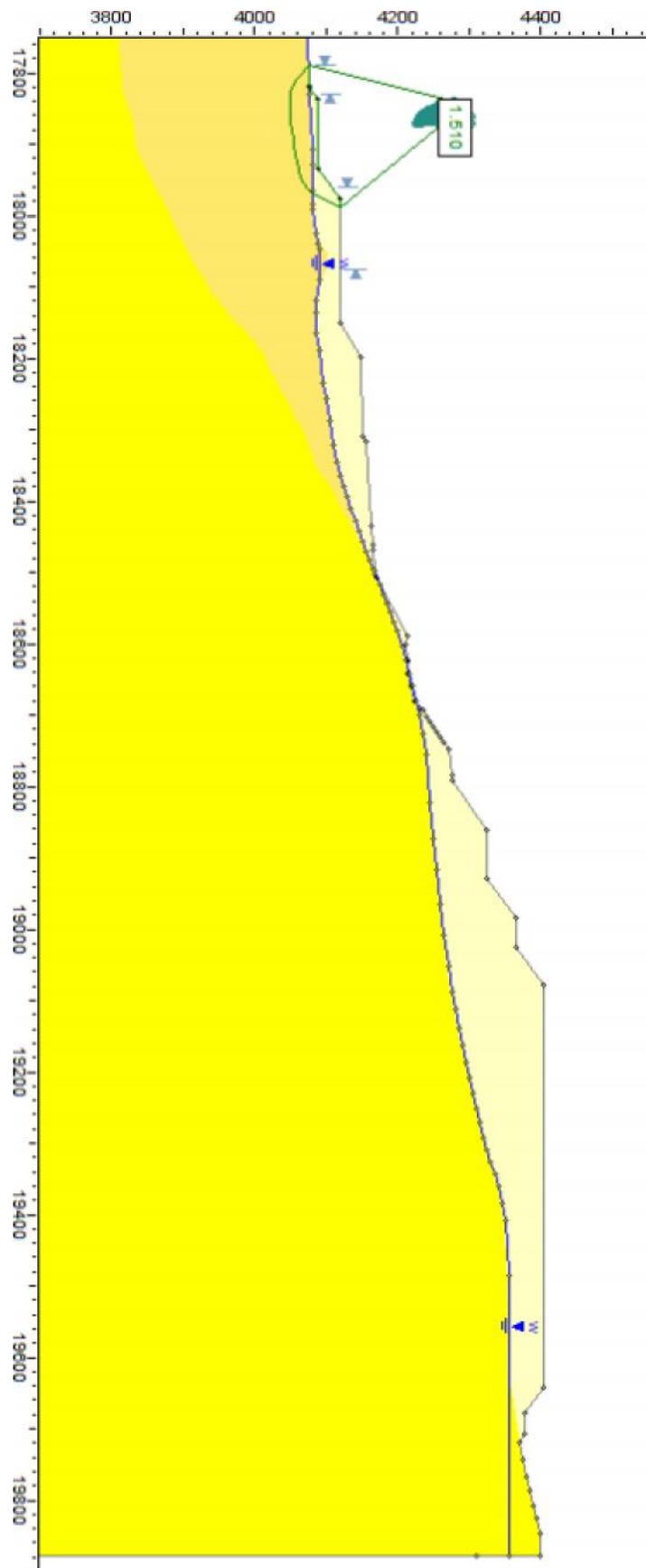
Anexo 101- Sección2, Superficie 0404, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



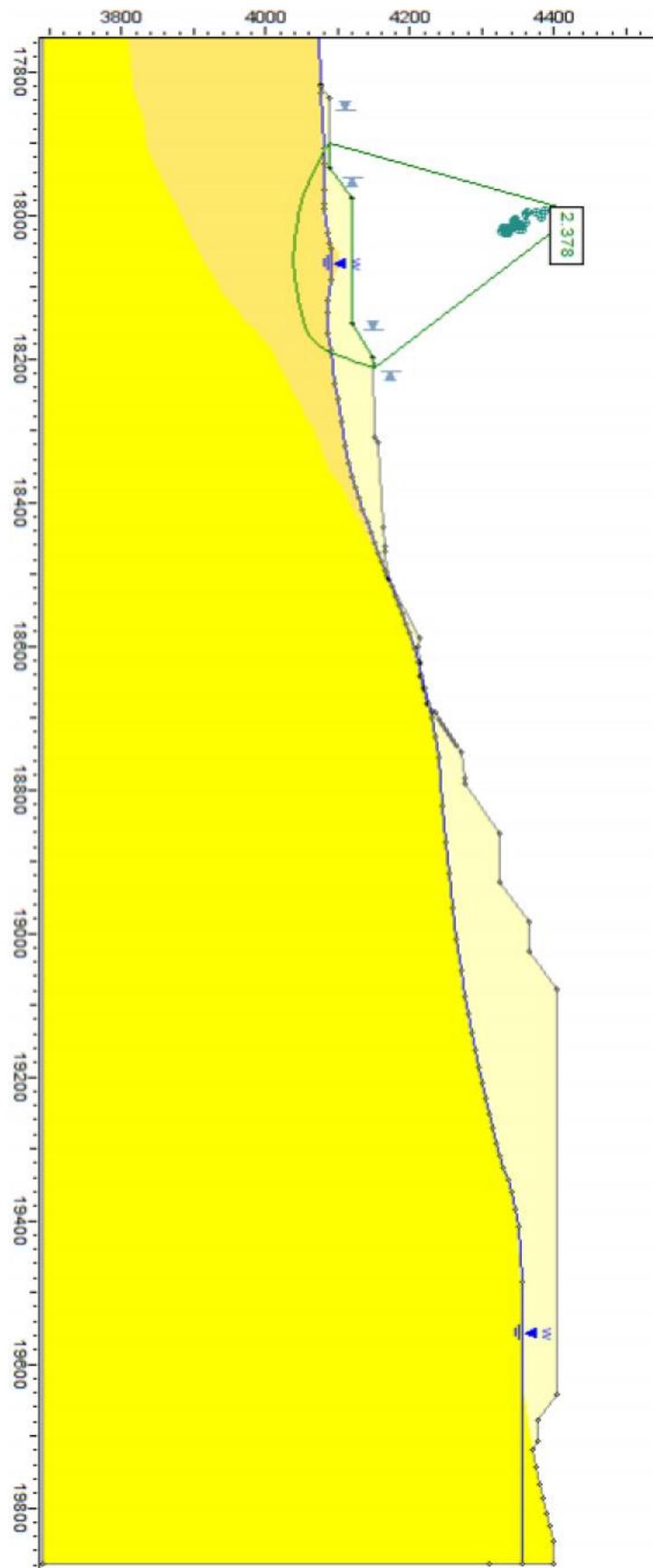
Anexo 102 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



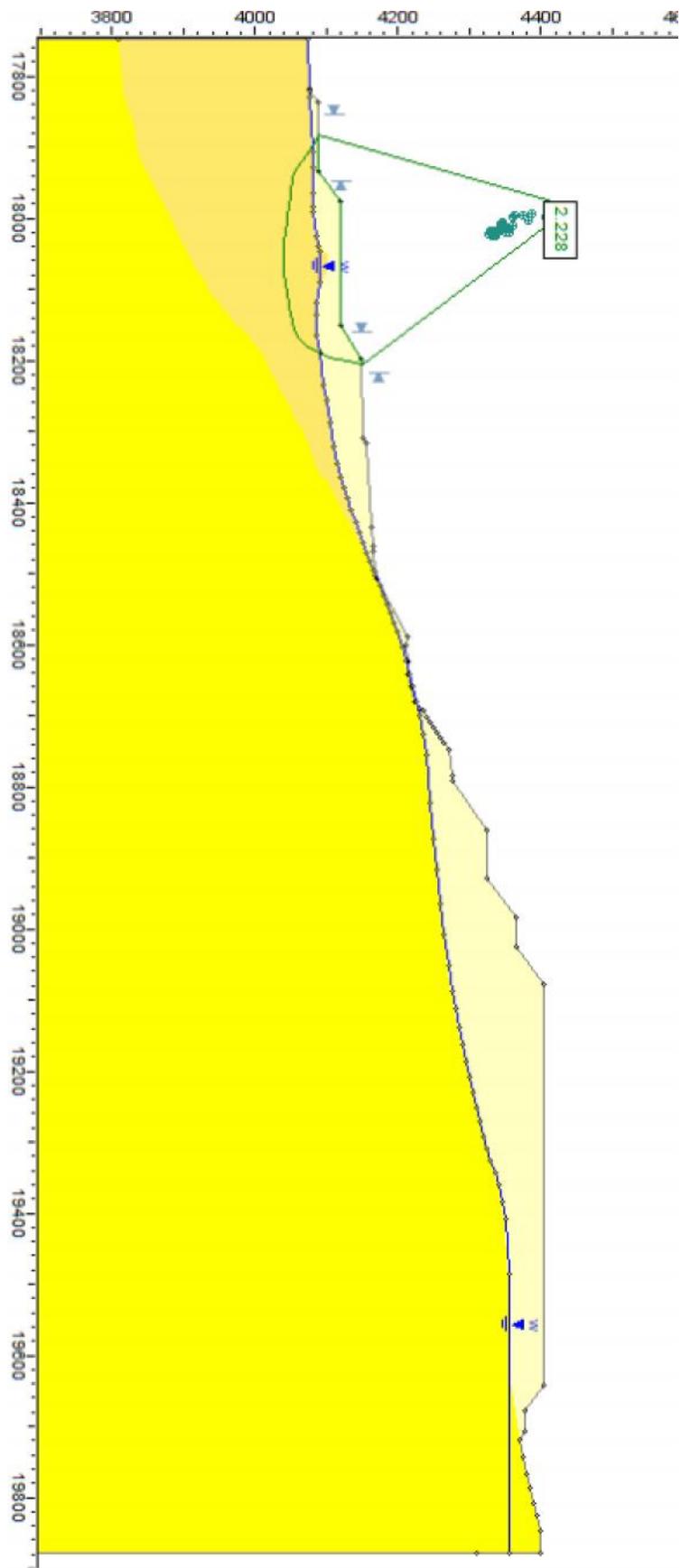
Anexo 103 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



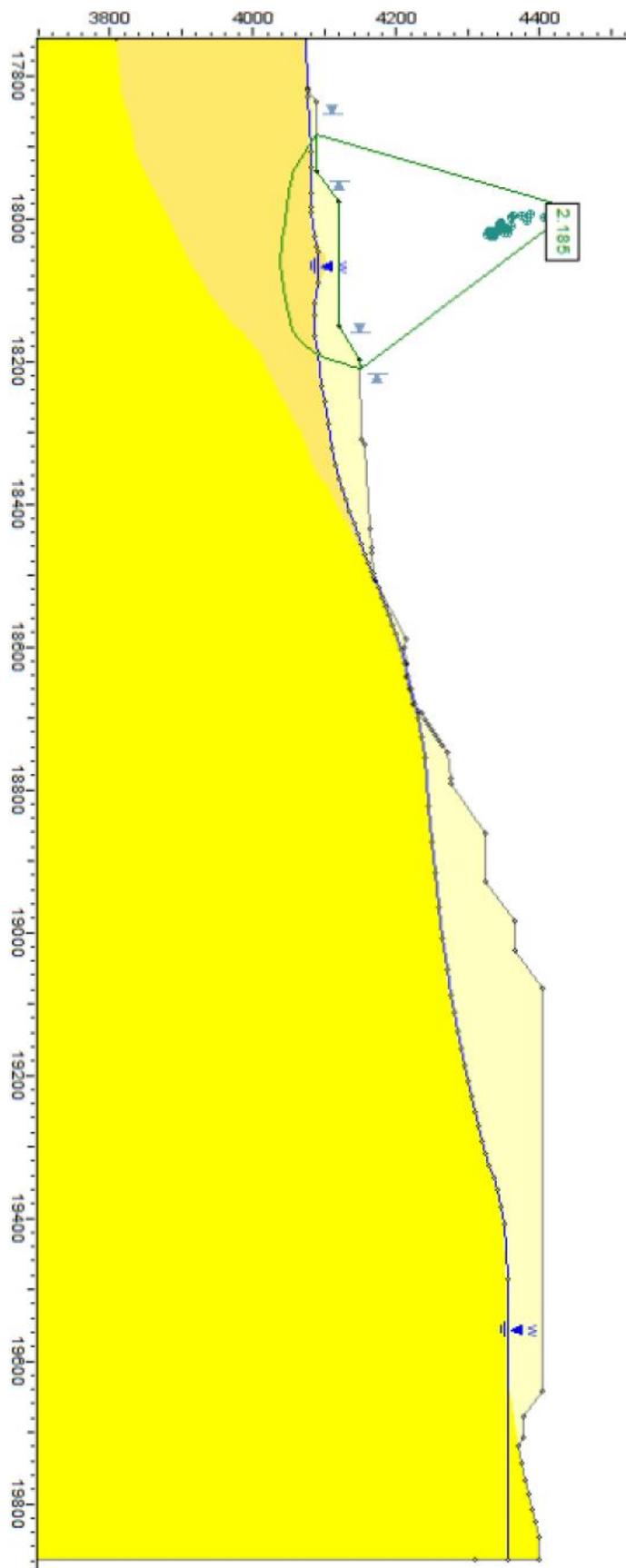
Anexo 104 - Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



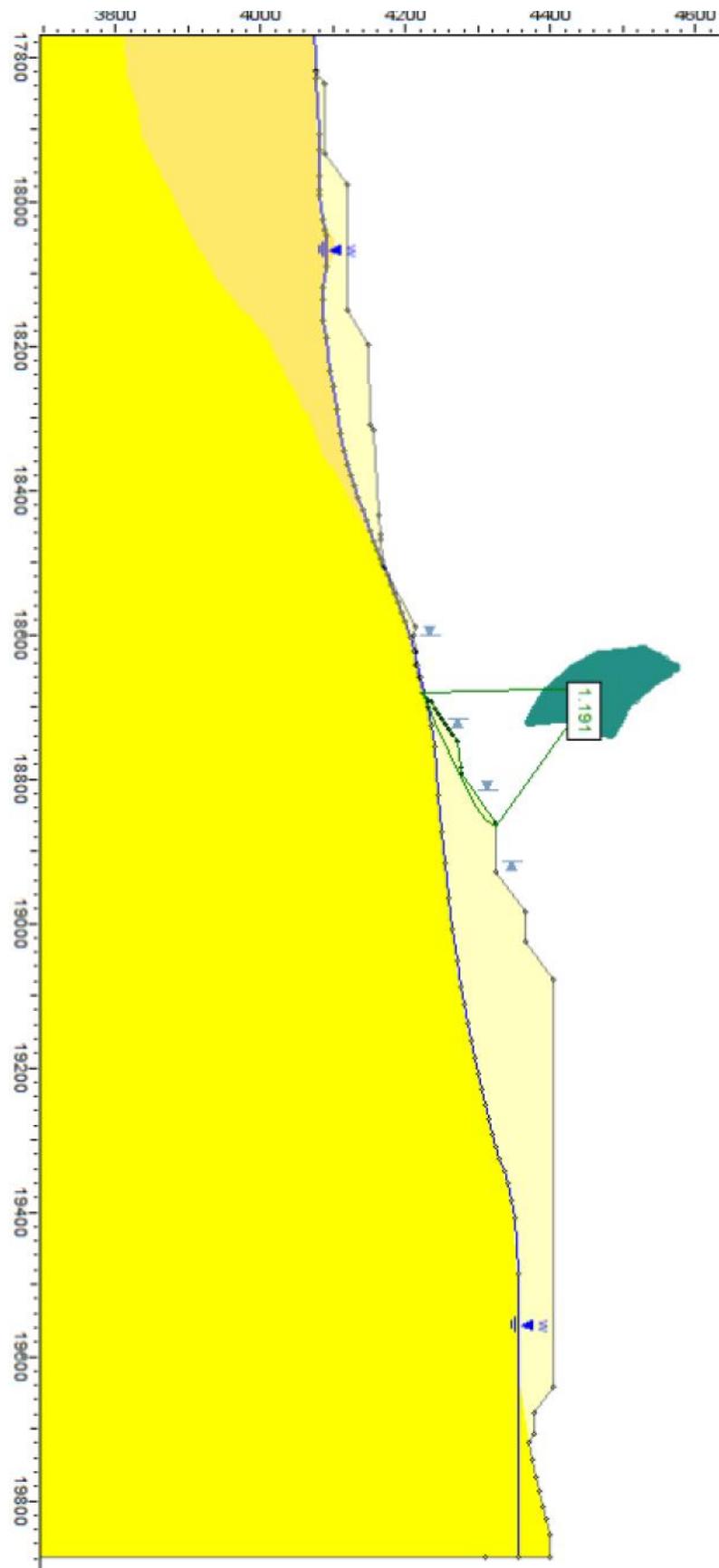
Anexo 105 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



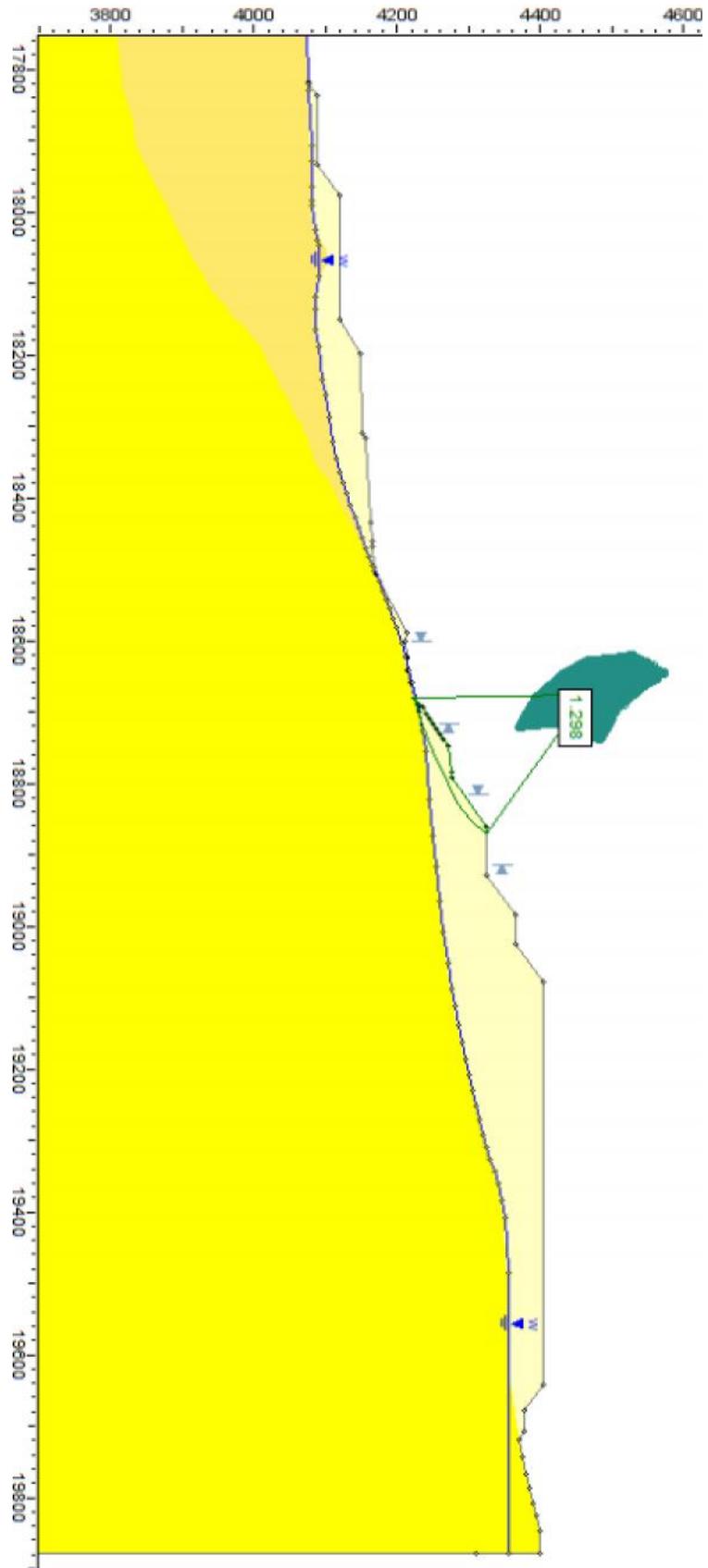
Anexo 106 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



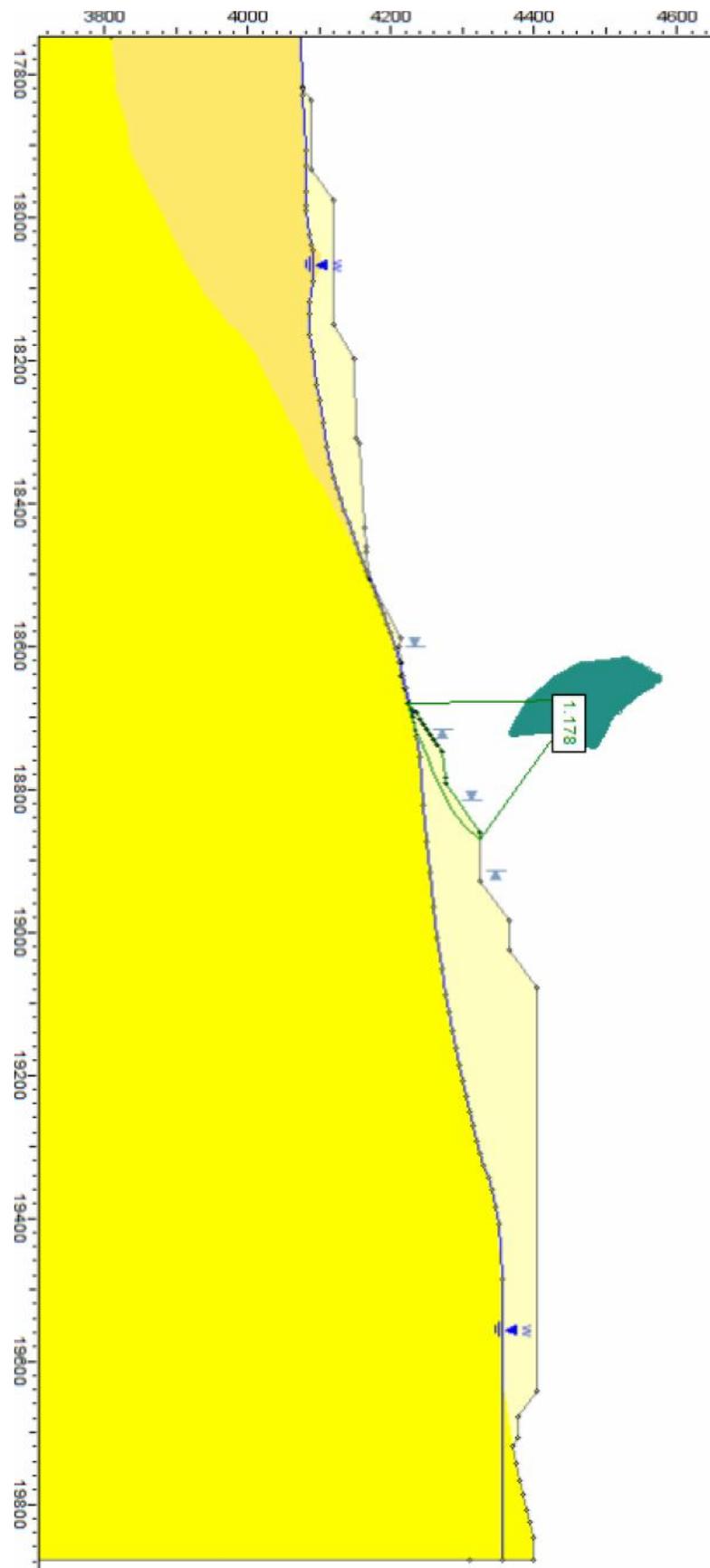
Anexo 107 - Sección3, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



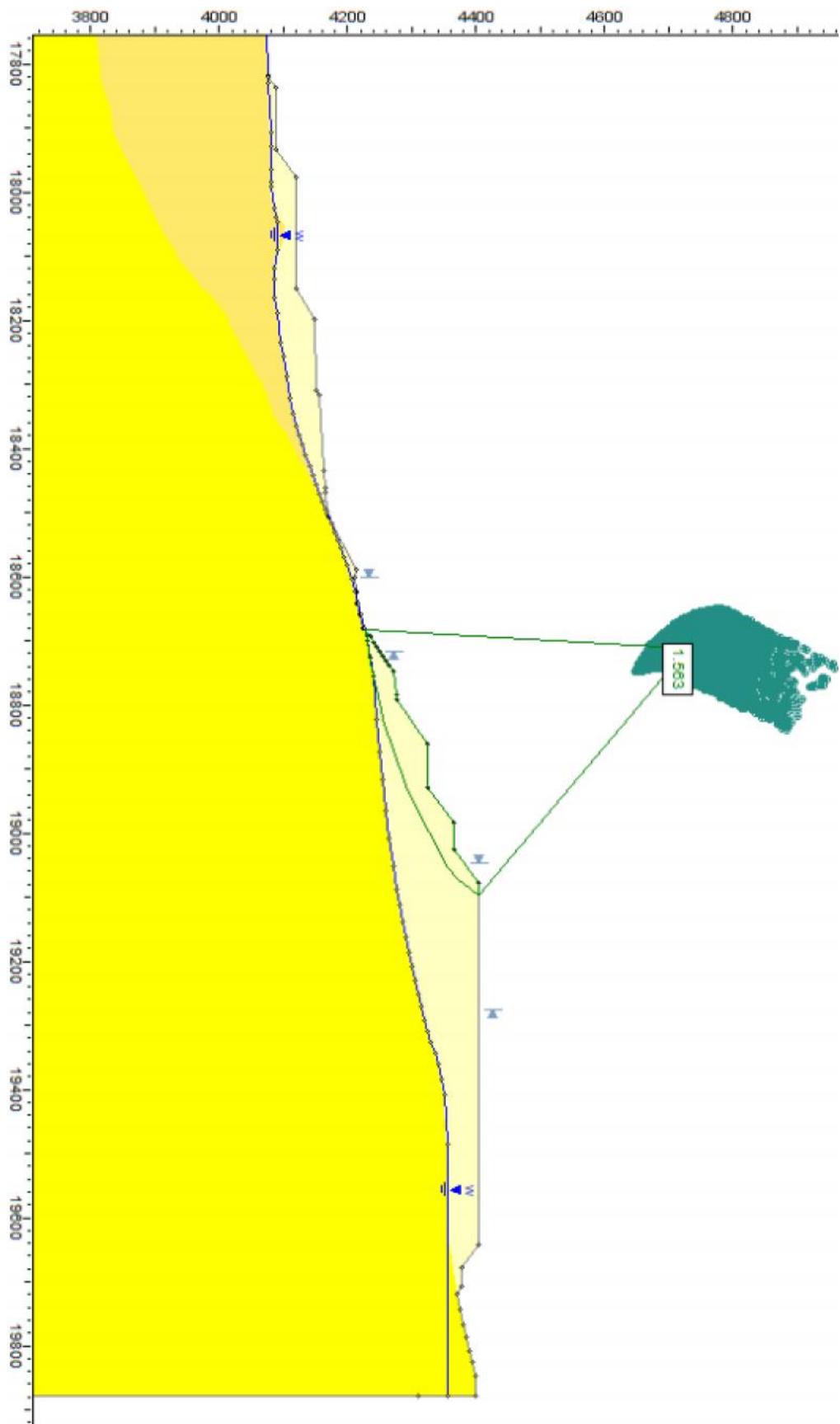
Anexo 108 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



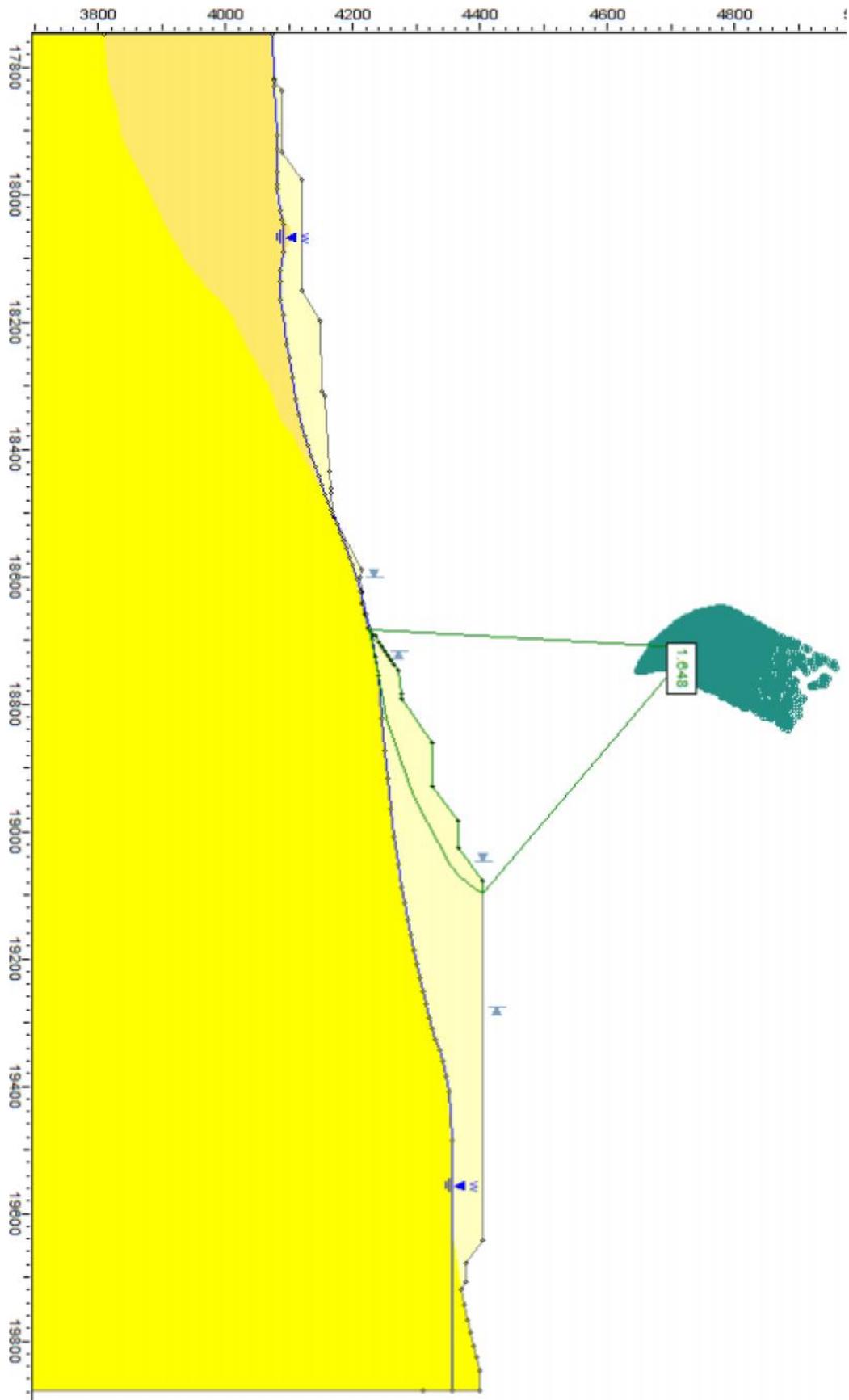
Anexo 109 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



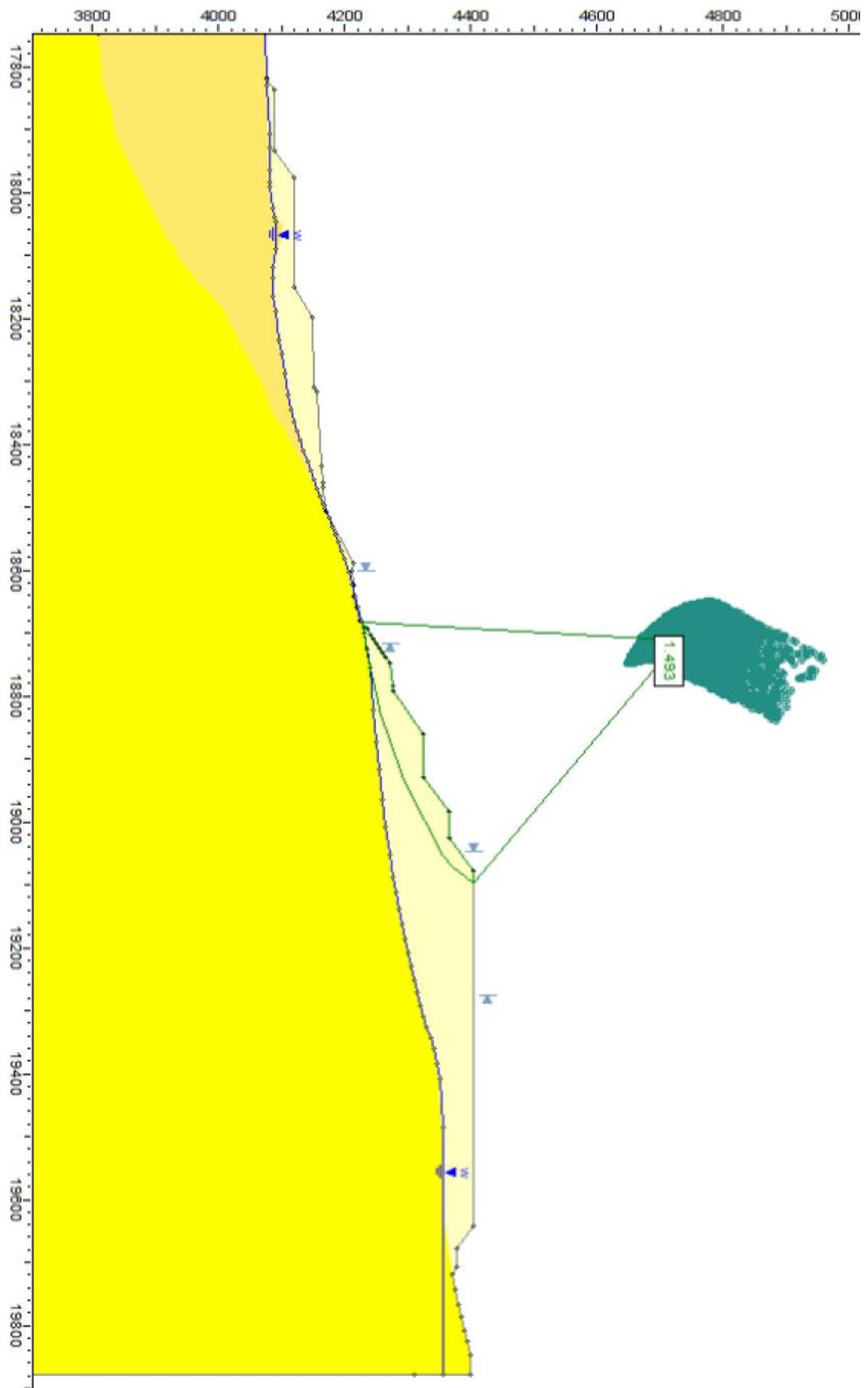
Anexo 110 - Sección3, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



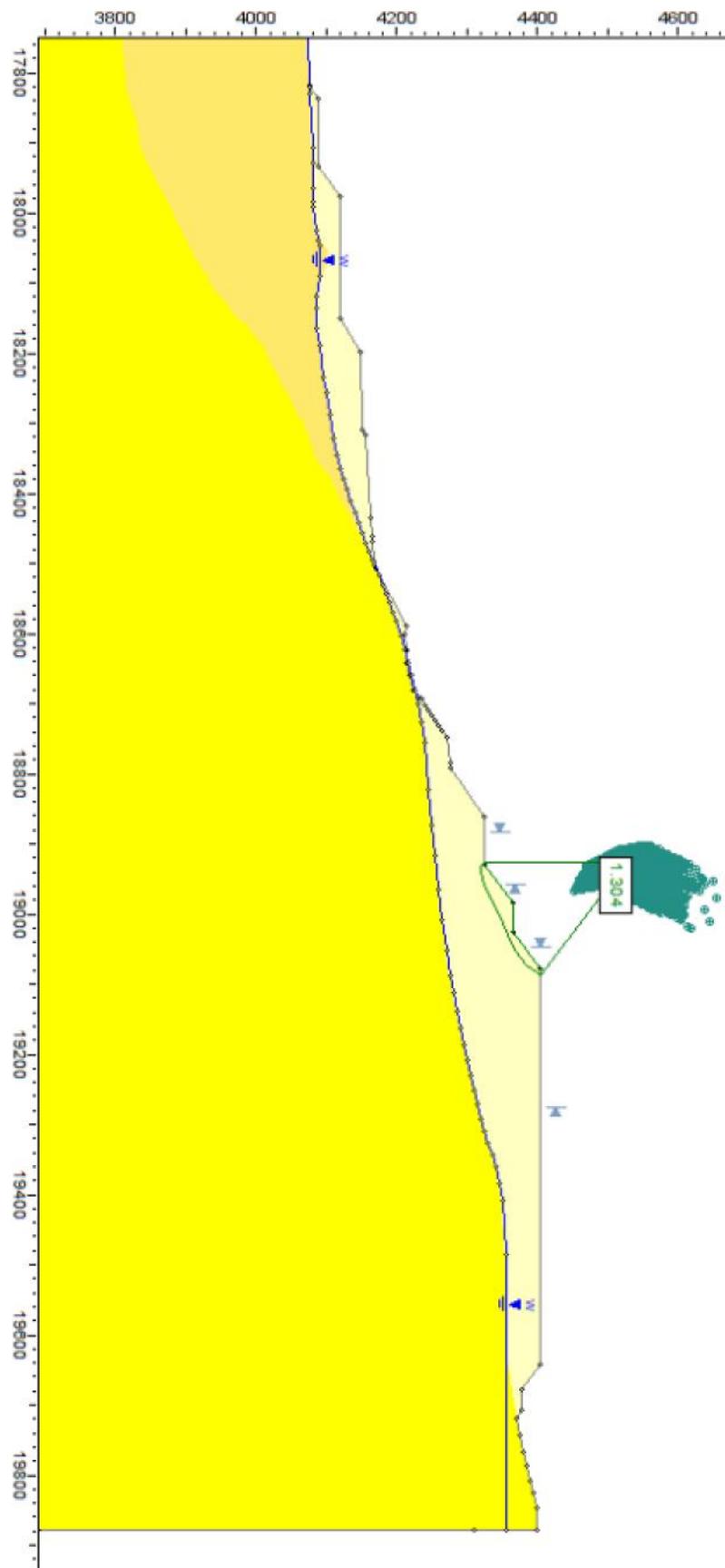
Anexo 111 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



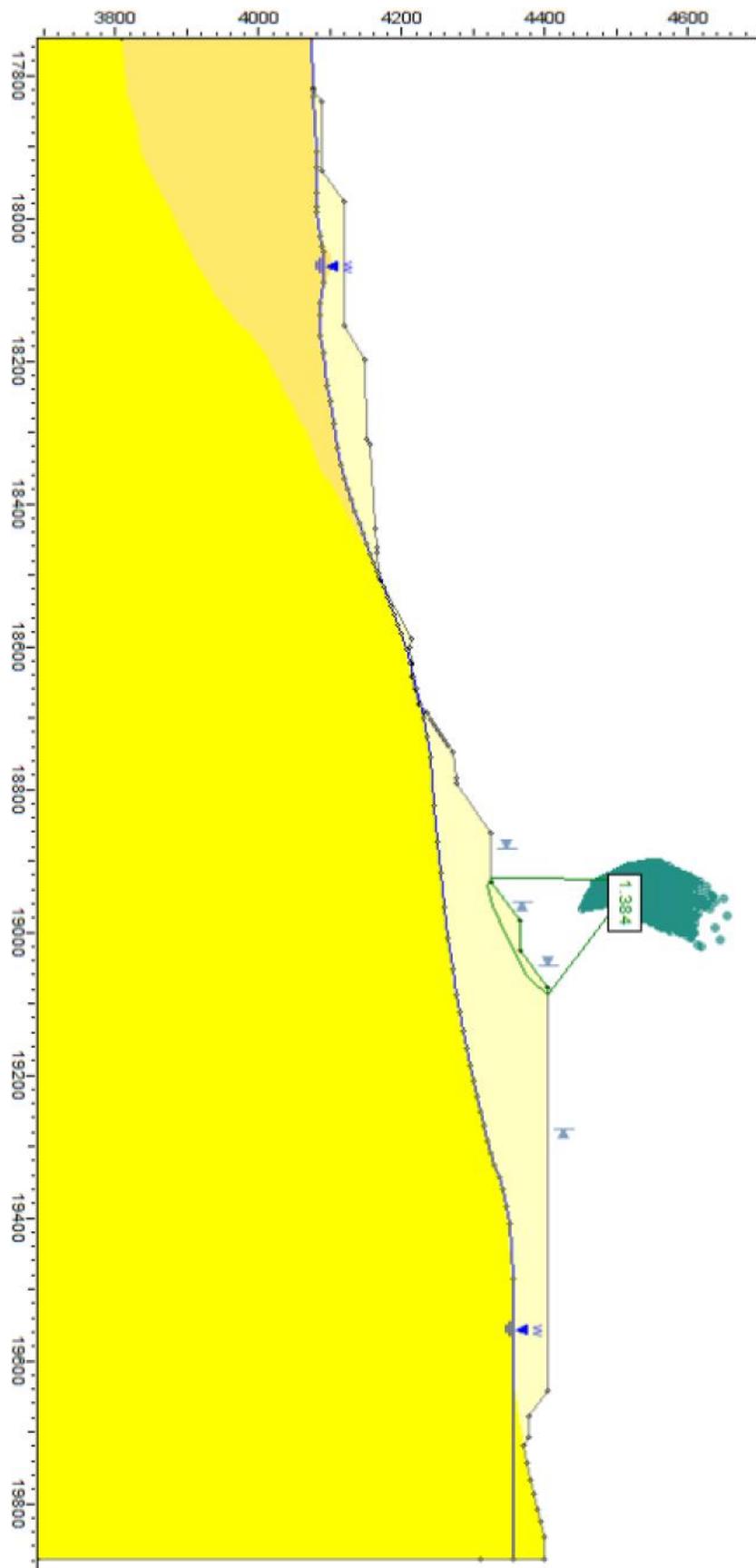
Anexo 112 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



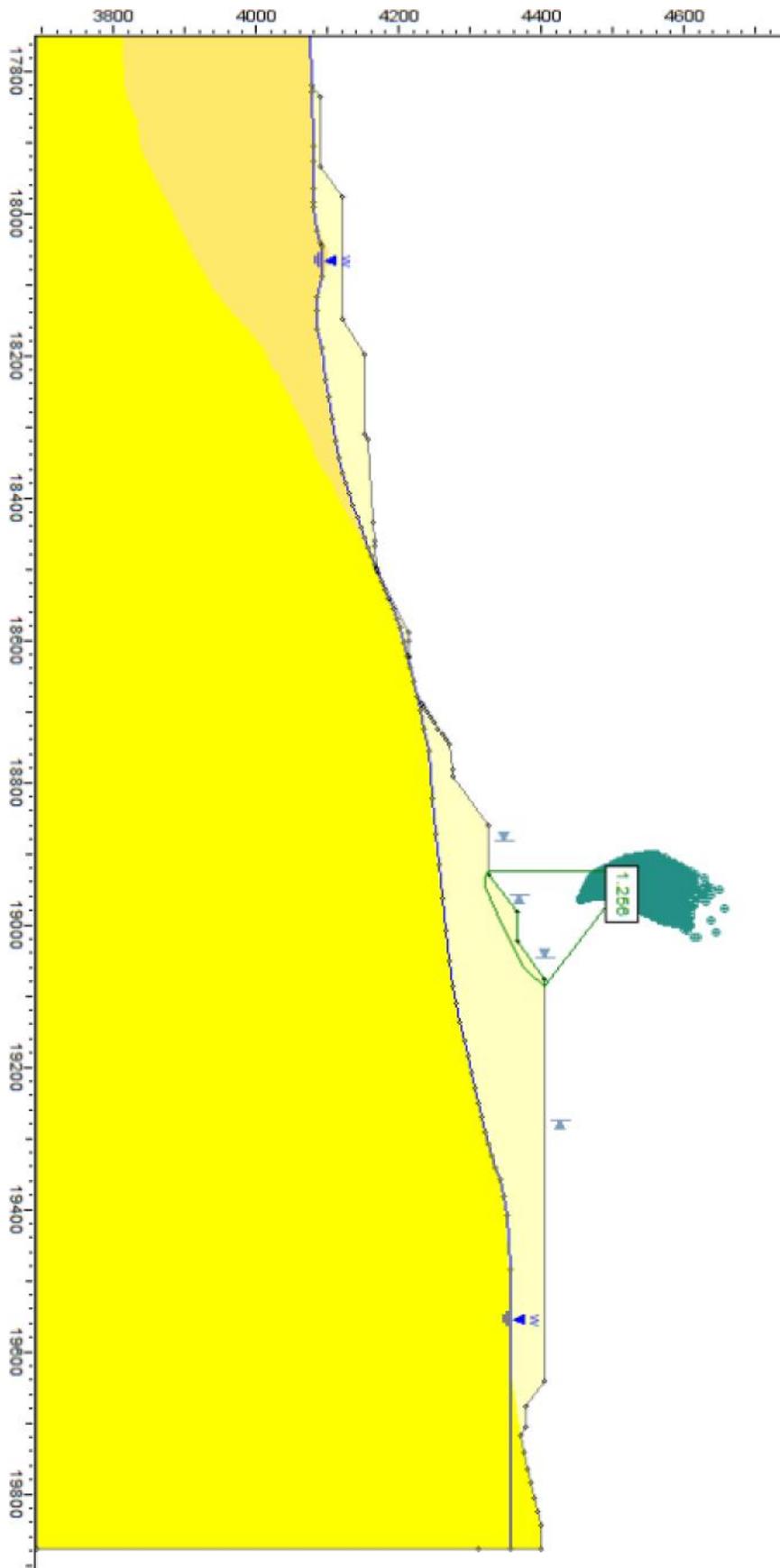
Anexo 113 - Sección3, Superficie 0304, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



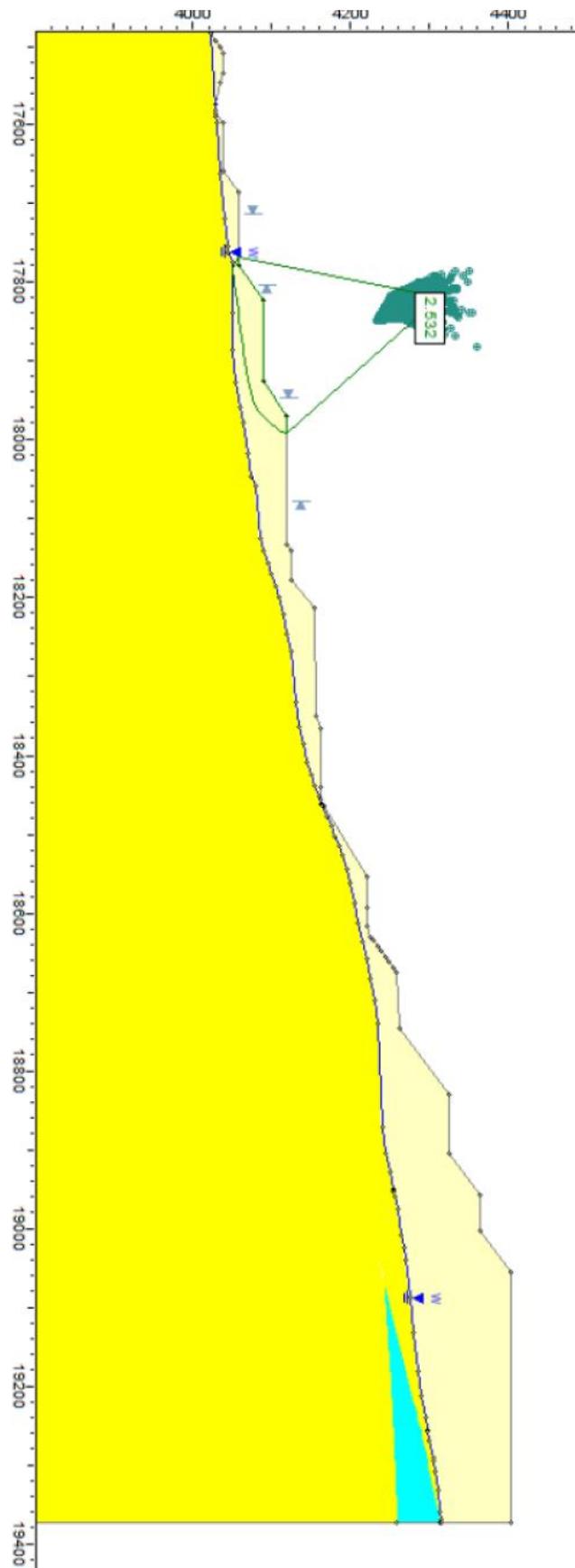
Anexo 114 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



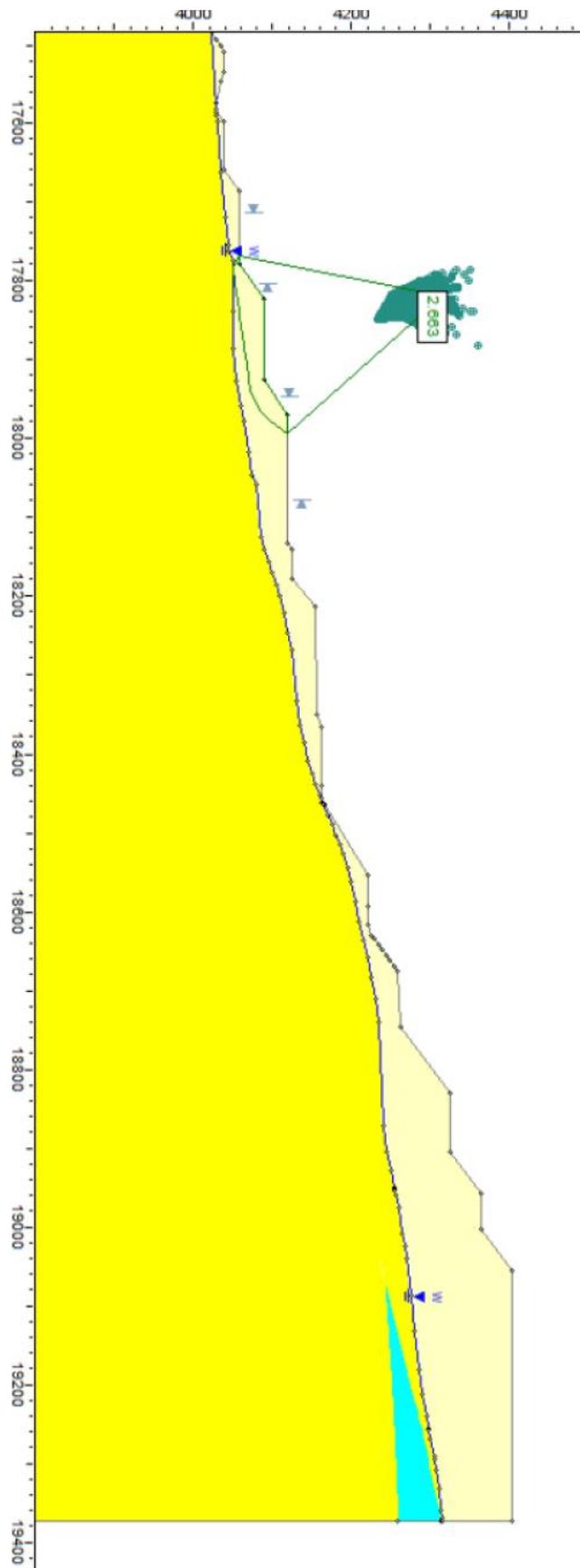
Anexo 115 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



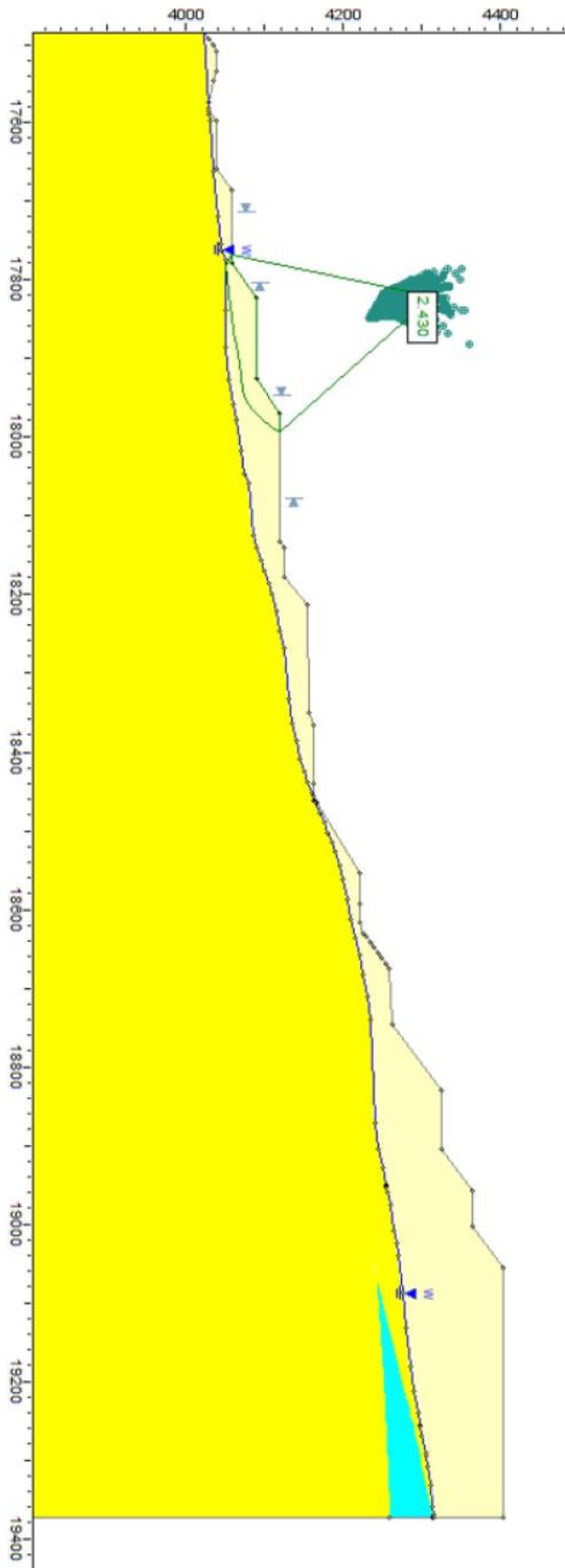
Anexo 116 - Sección3, Superficie 0404, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



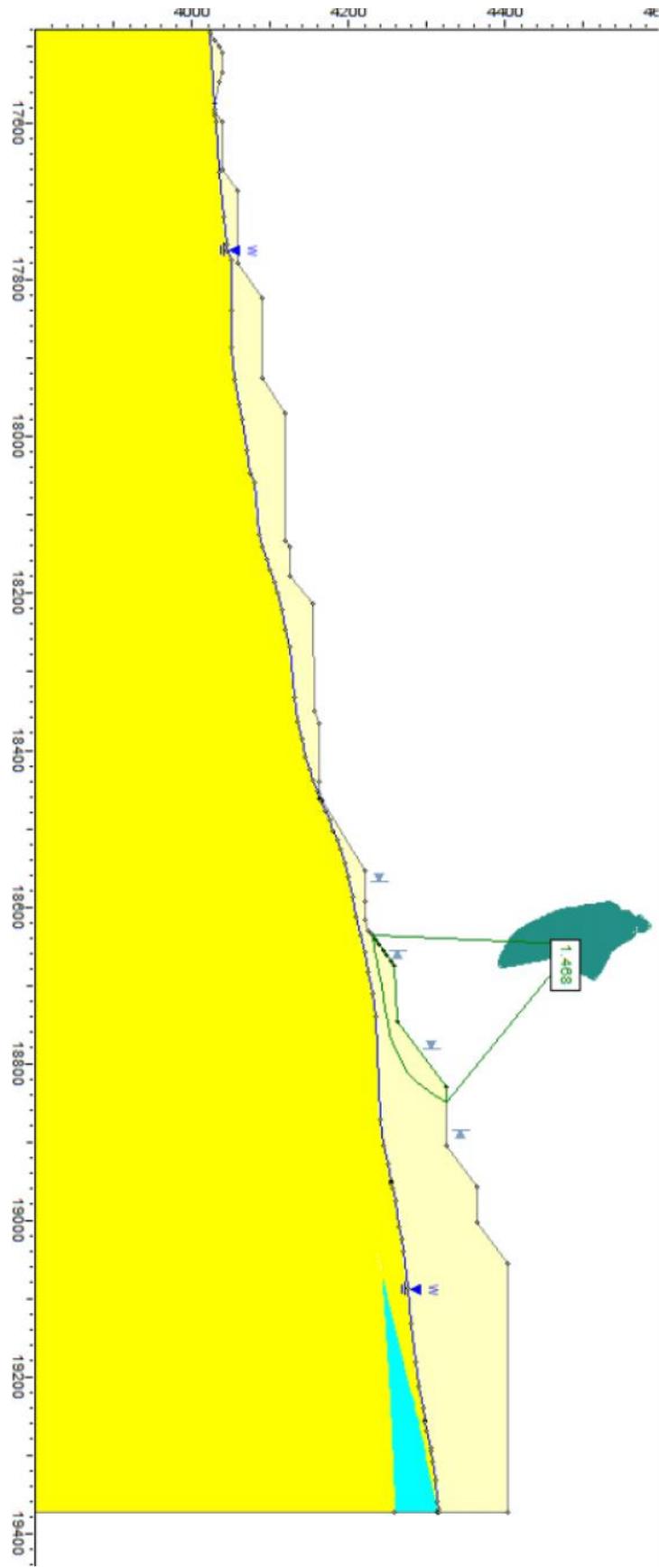
Anexo 117 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



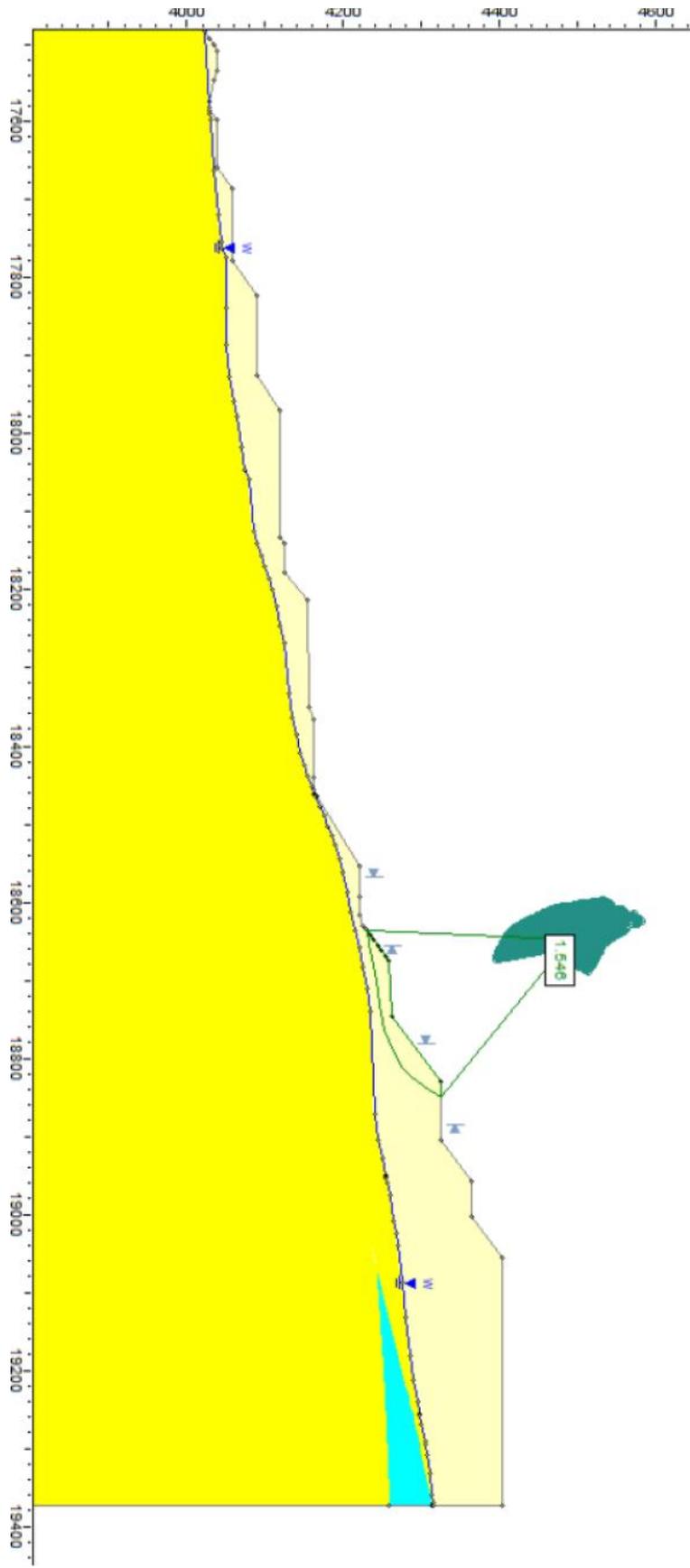
Anexo 118 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



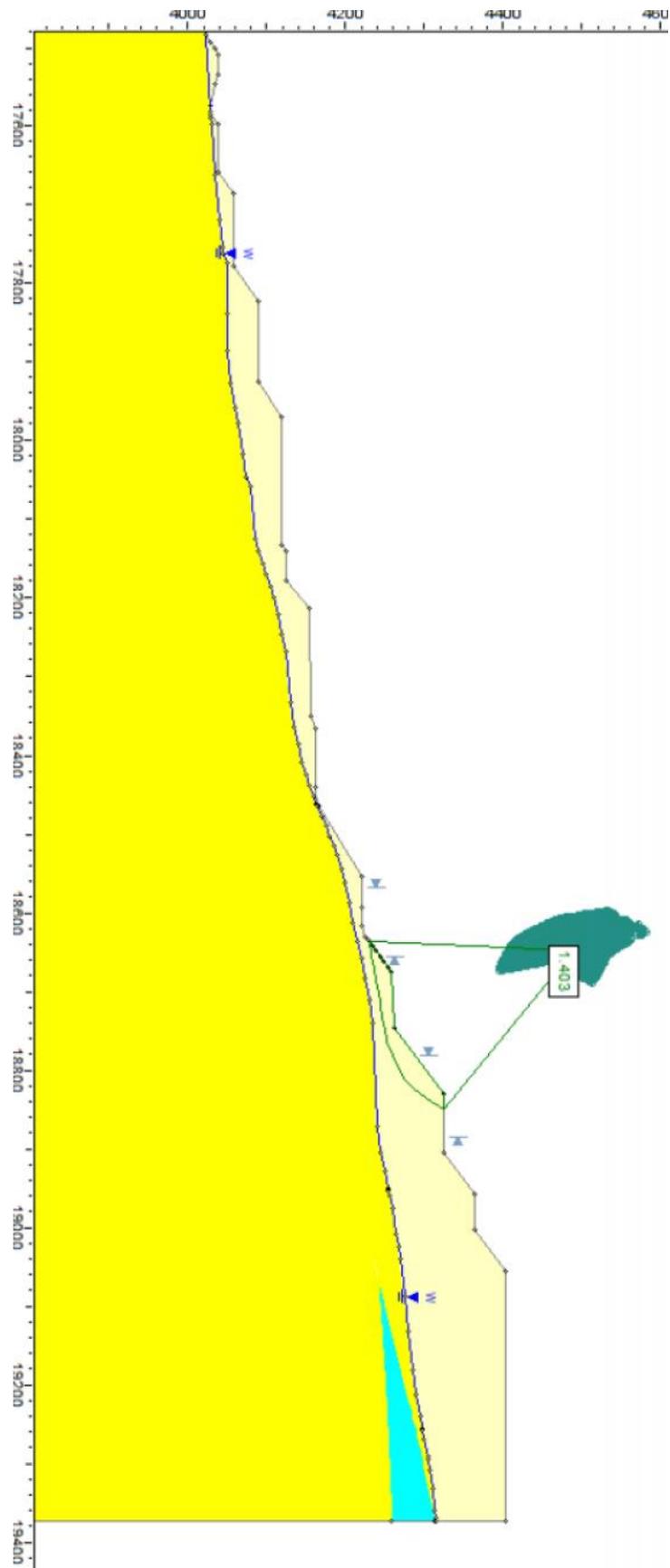
Anexo 119 - Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



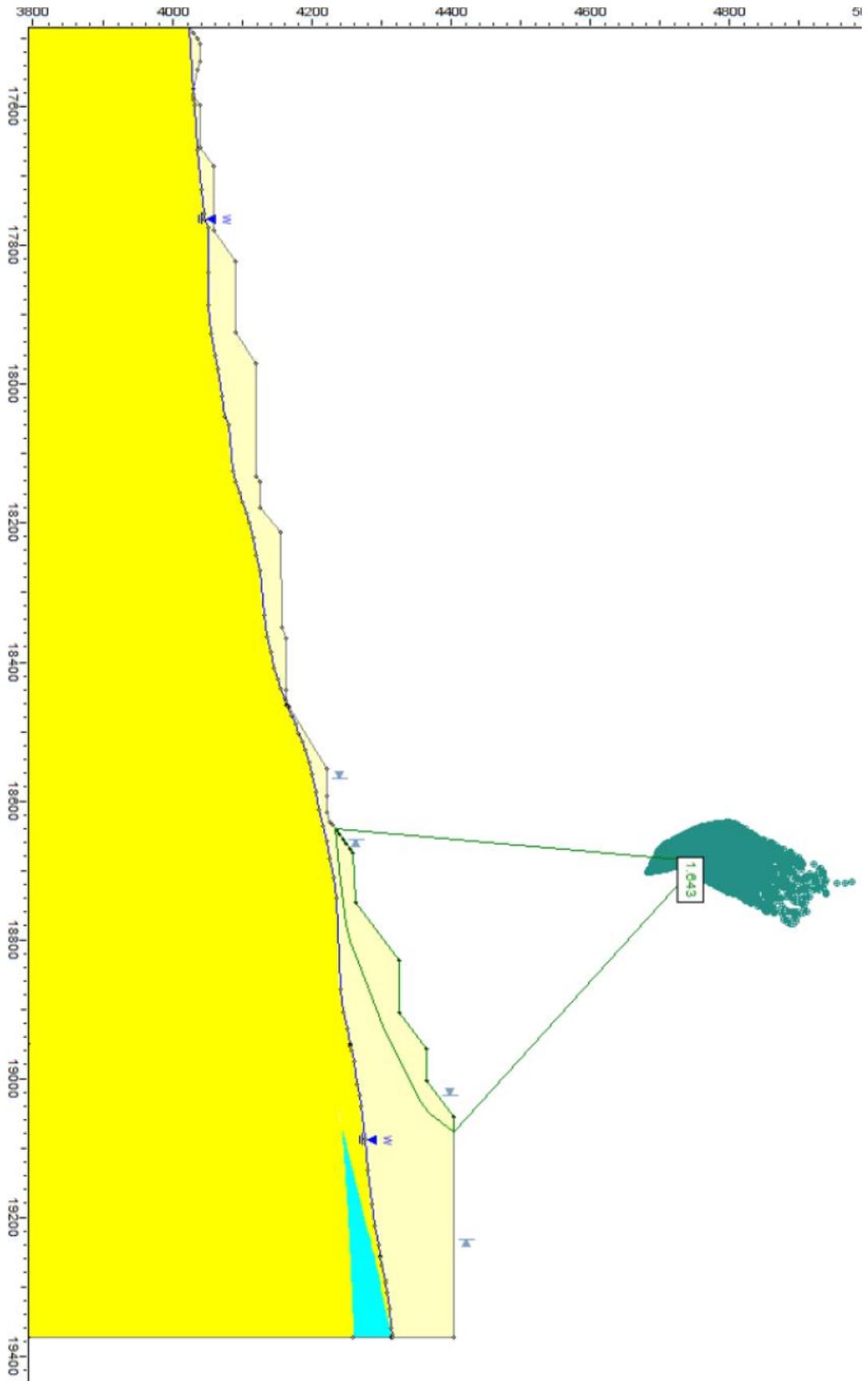
Anexo 120 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



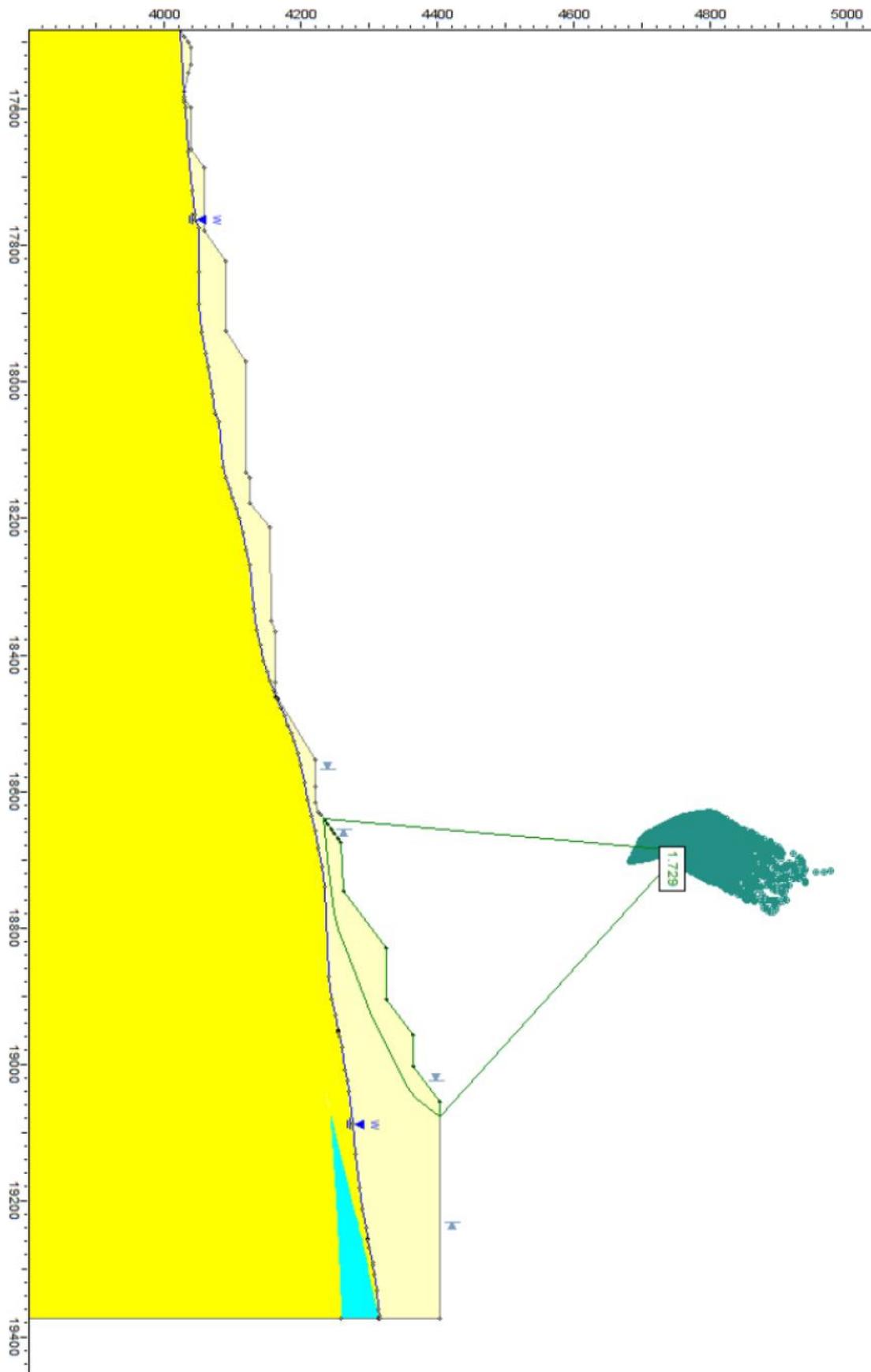
Anexo 121 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



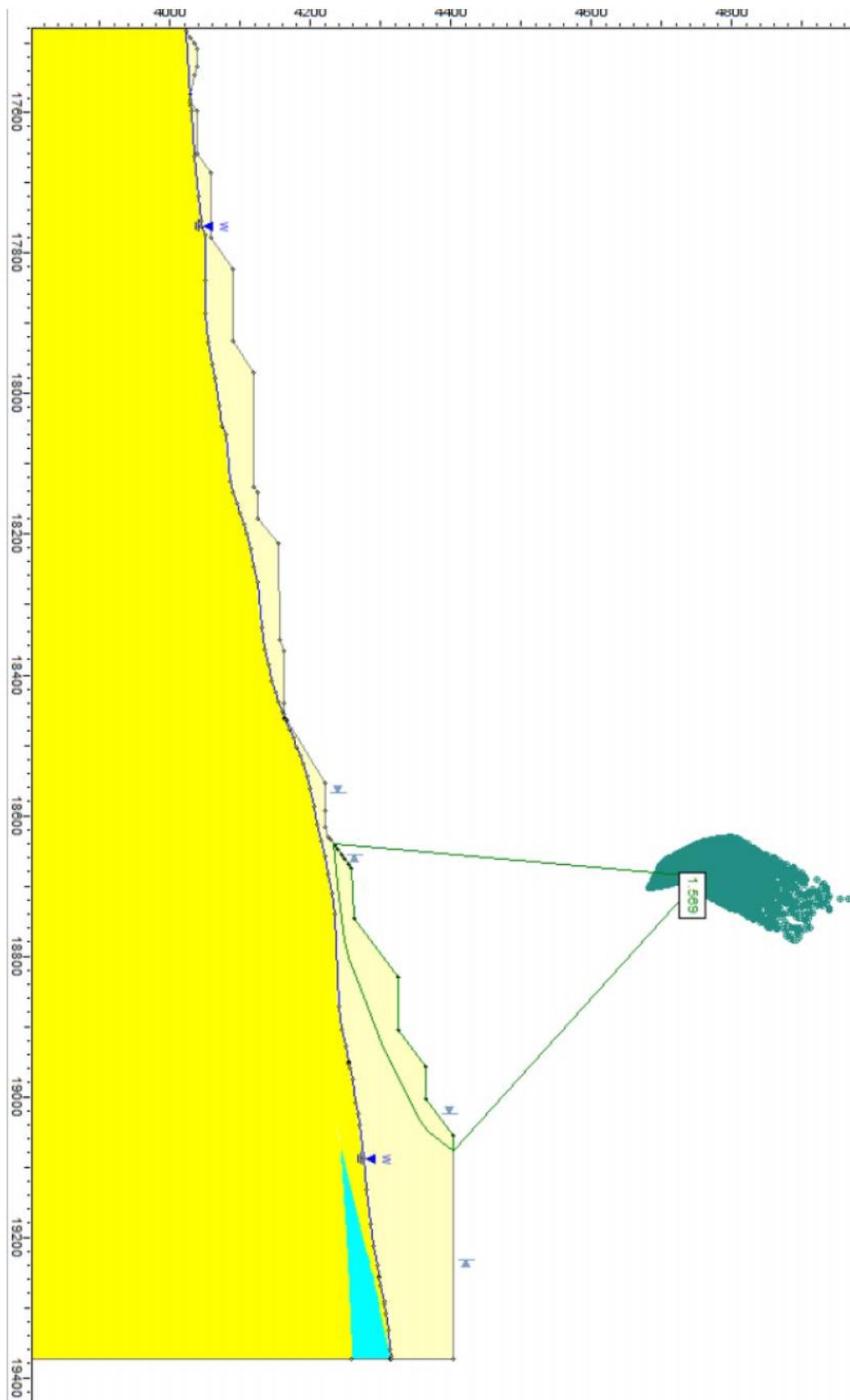
Anexo 122 - Sección4, Superficie 0202, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



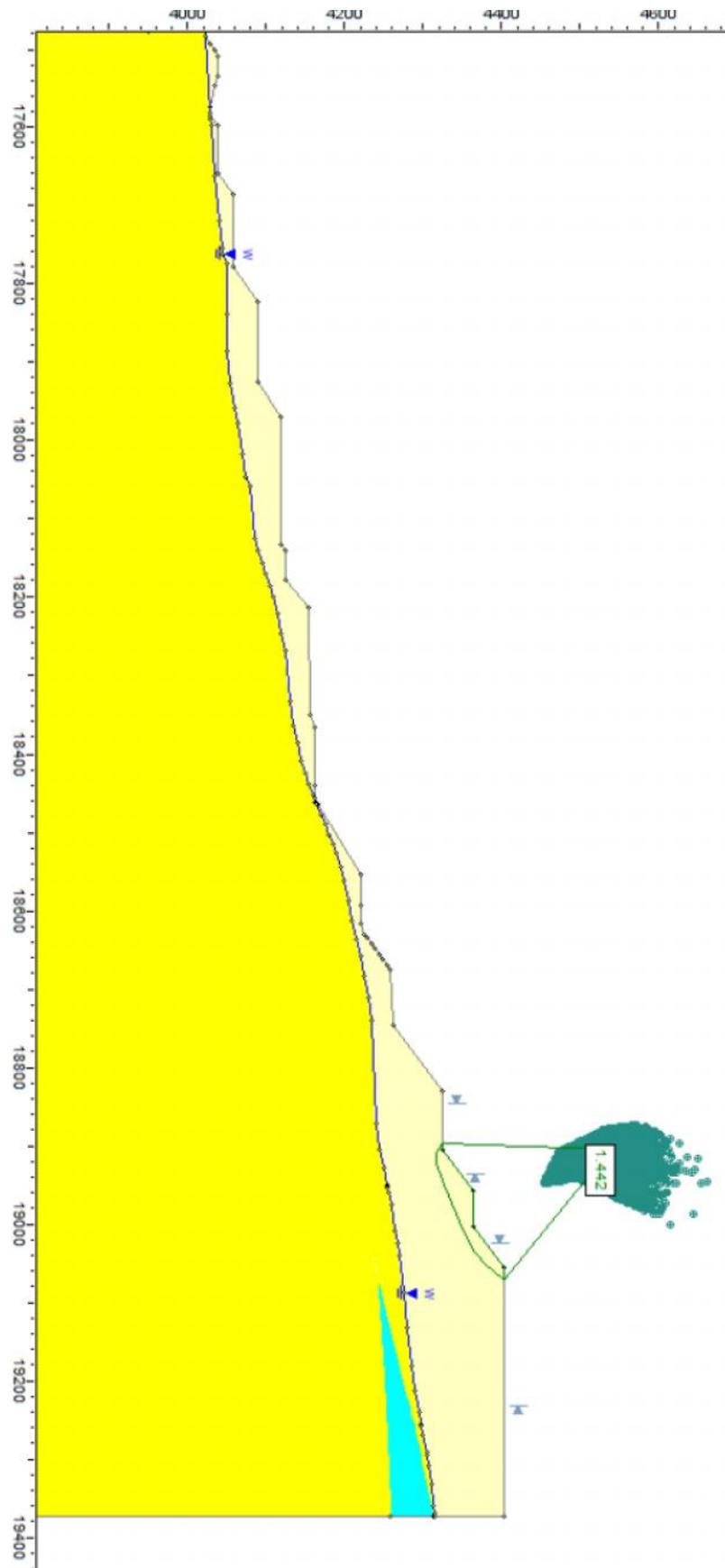
Anexo 123- Sección4, Superficie 0203, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



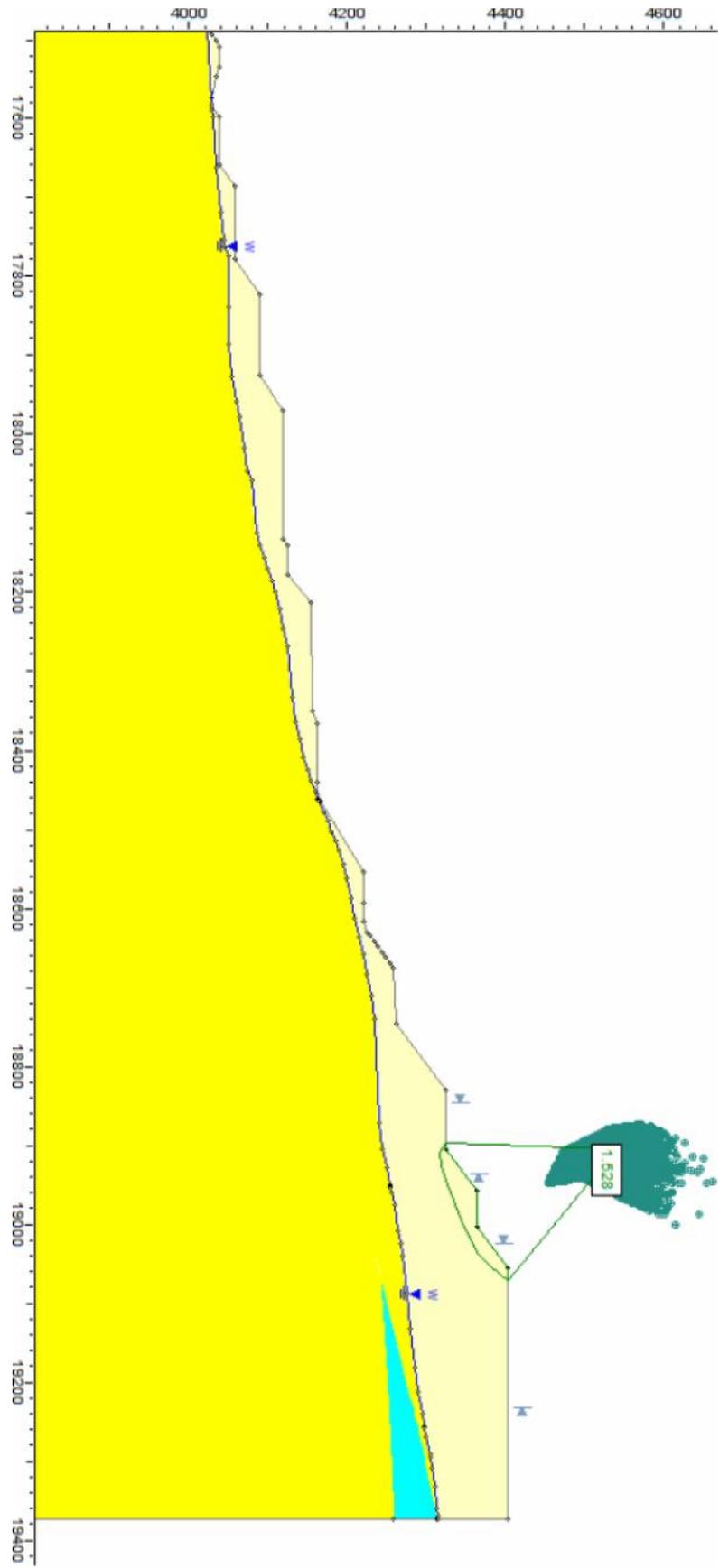
Anexo 124 - Sección4, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



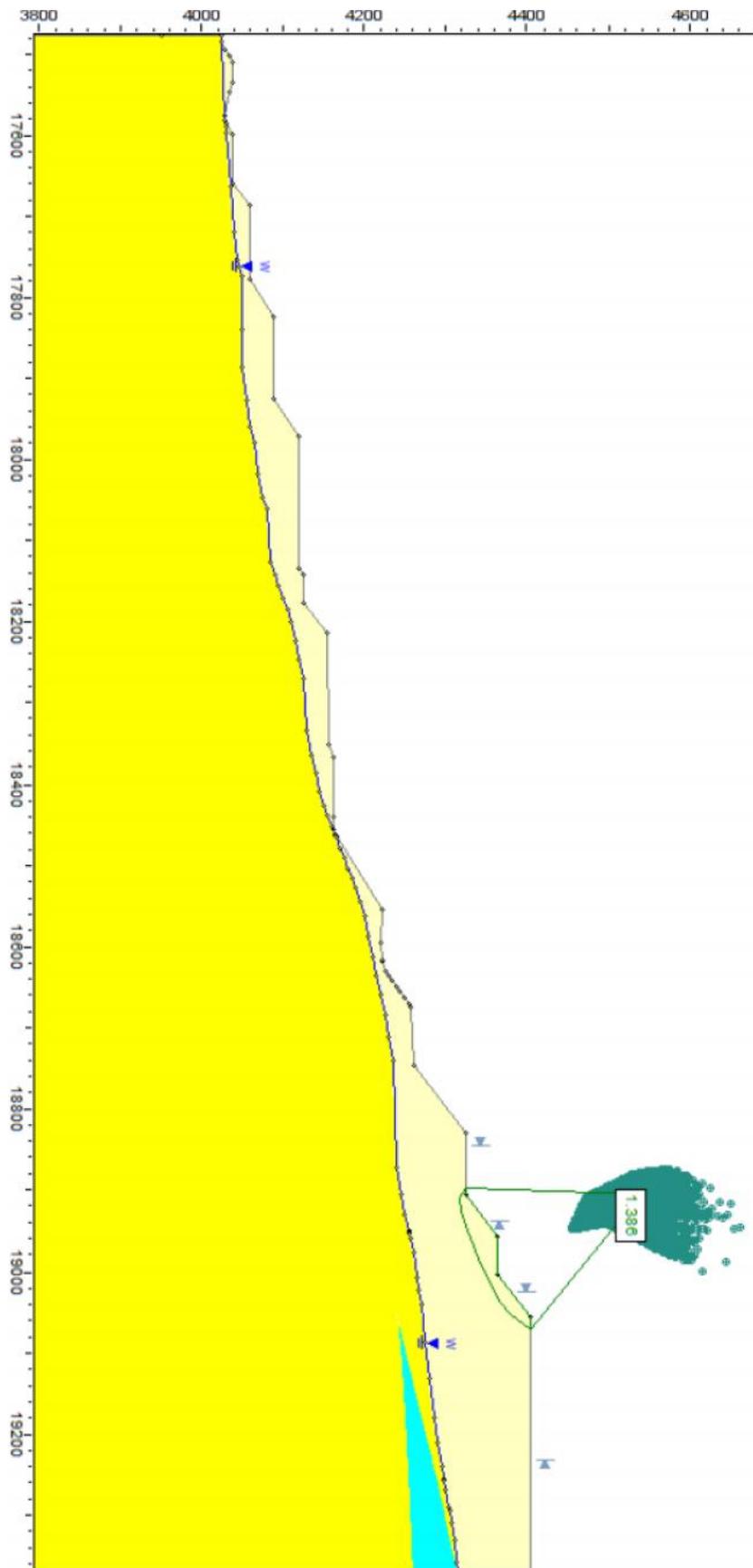
Anexo 125 - Sección4, Superficie 0203, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



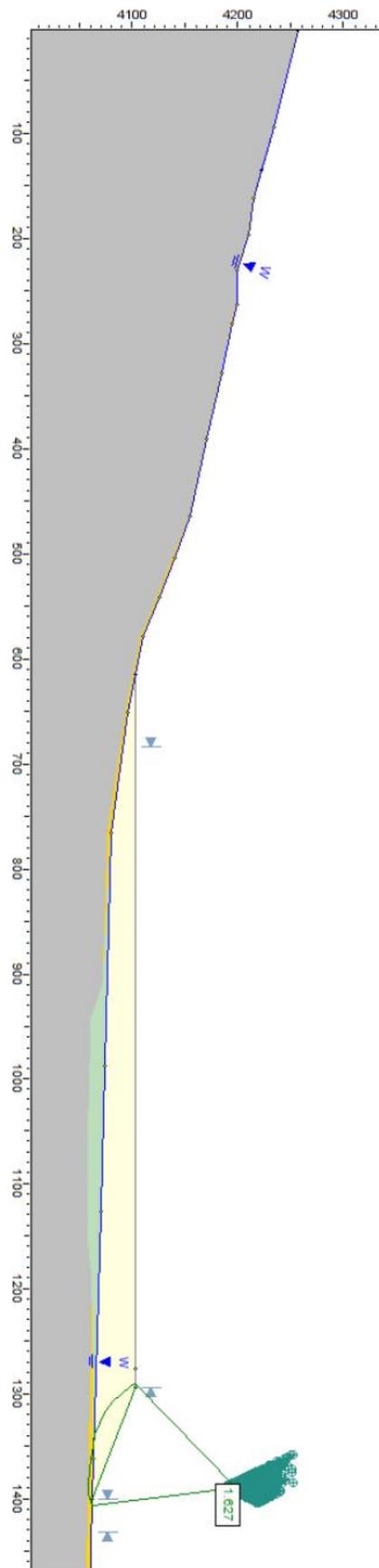
Anexo 126 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste simplificado, Quebrada Blanca



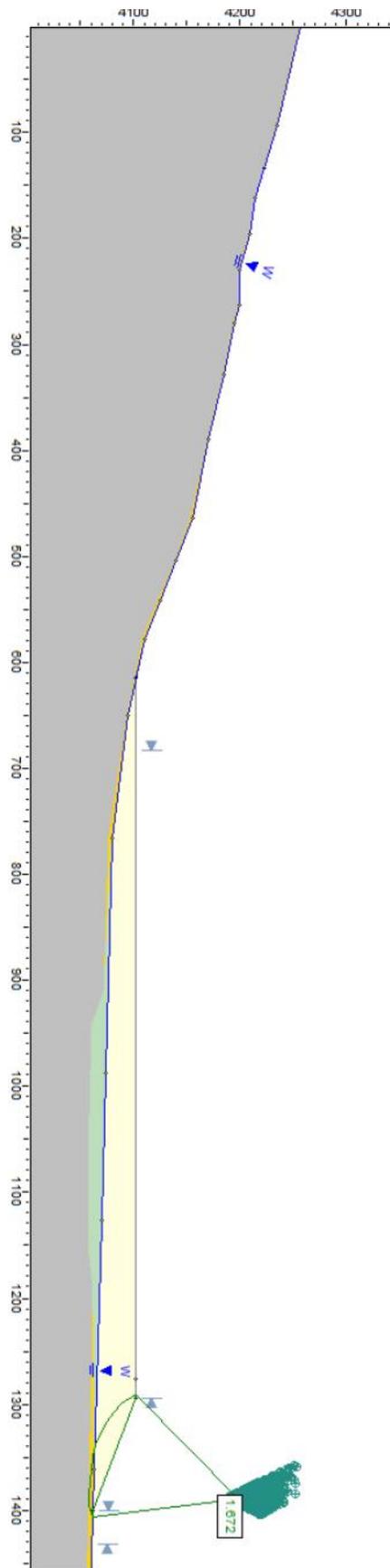
Anexo 127 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} < 80$, Quebrada Blanca



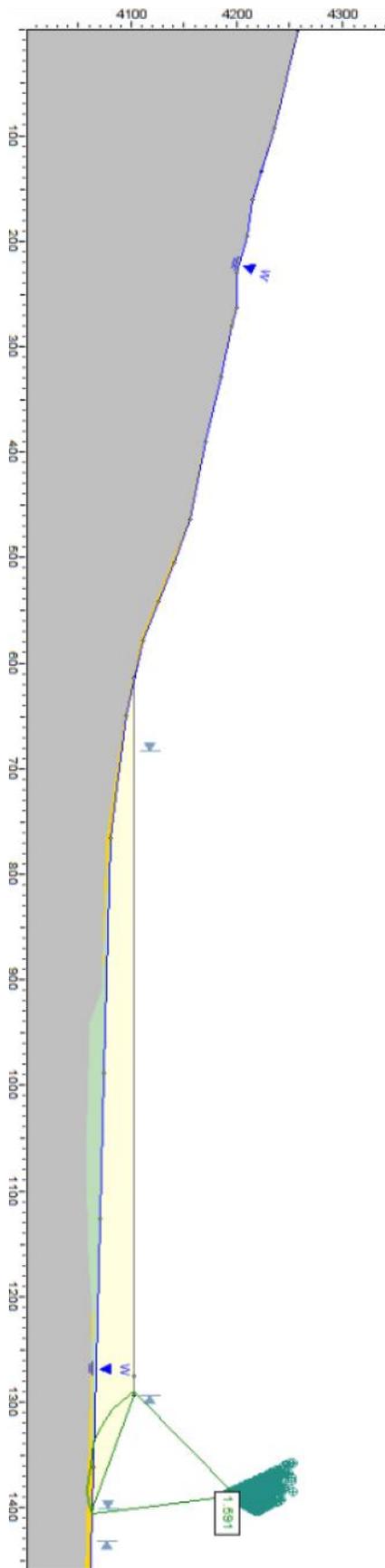
Anexo 128 - Sección4, Superficie 0303, Ajuste $d_{max} > 80$, Quebrada Blanca



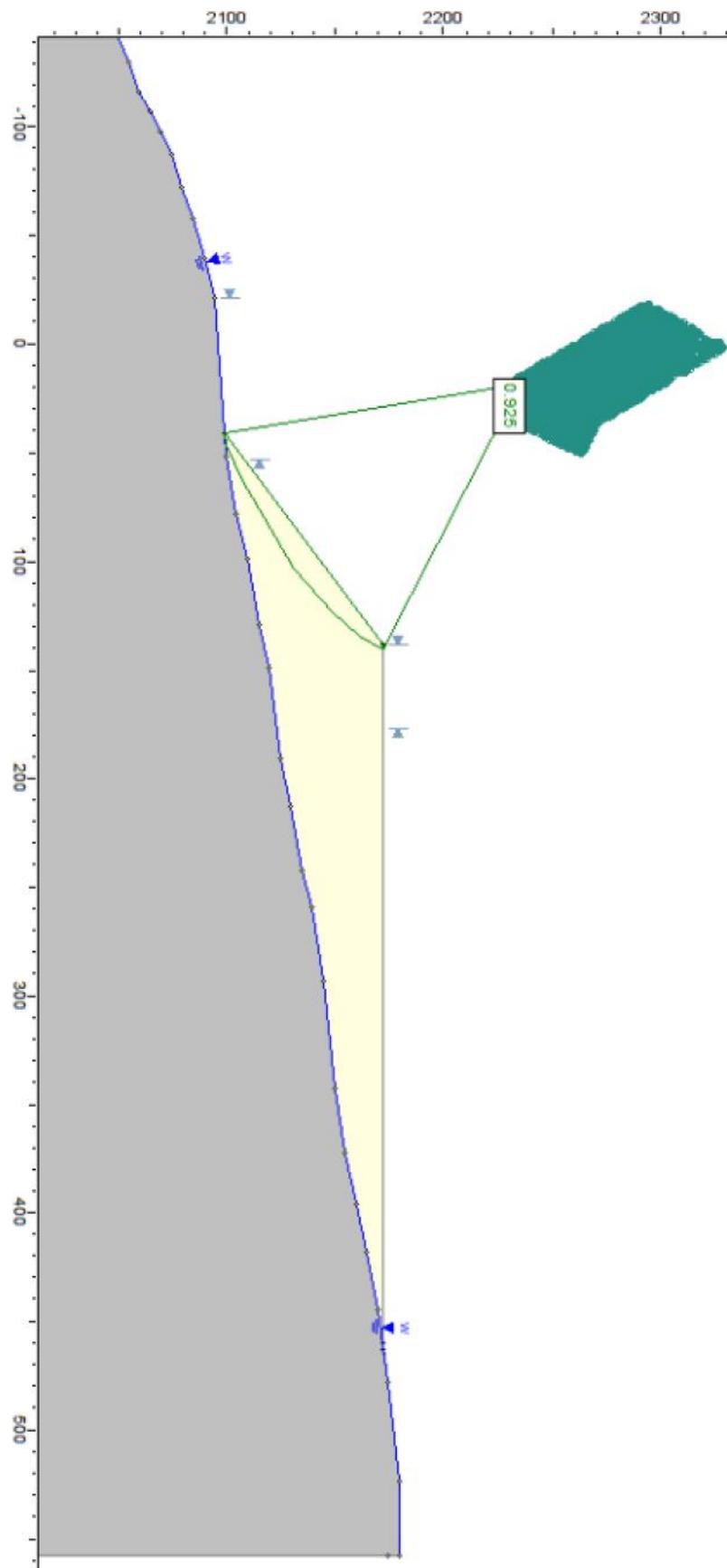
Anexo 129 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Antamina



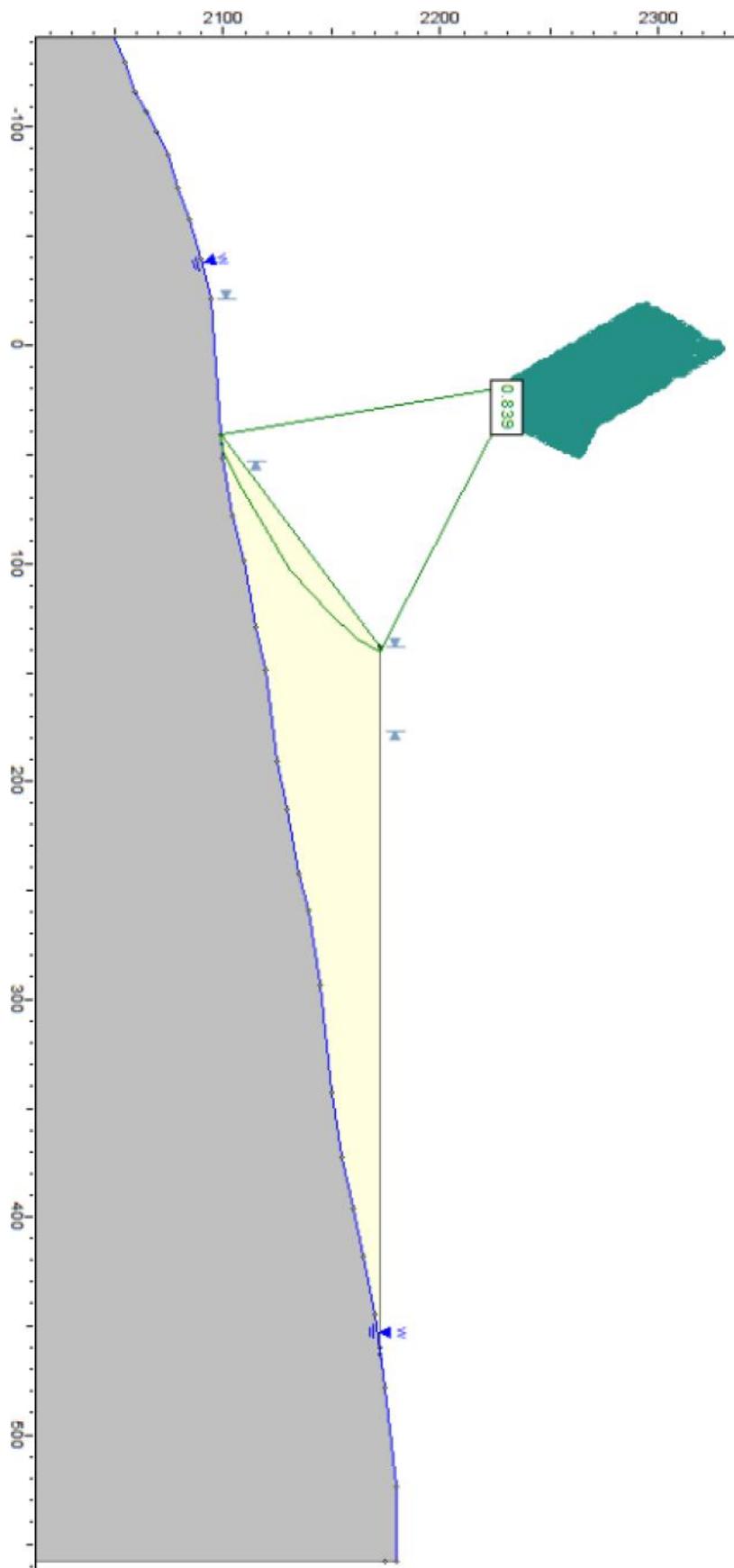
Anexo 130 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Antamina



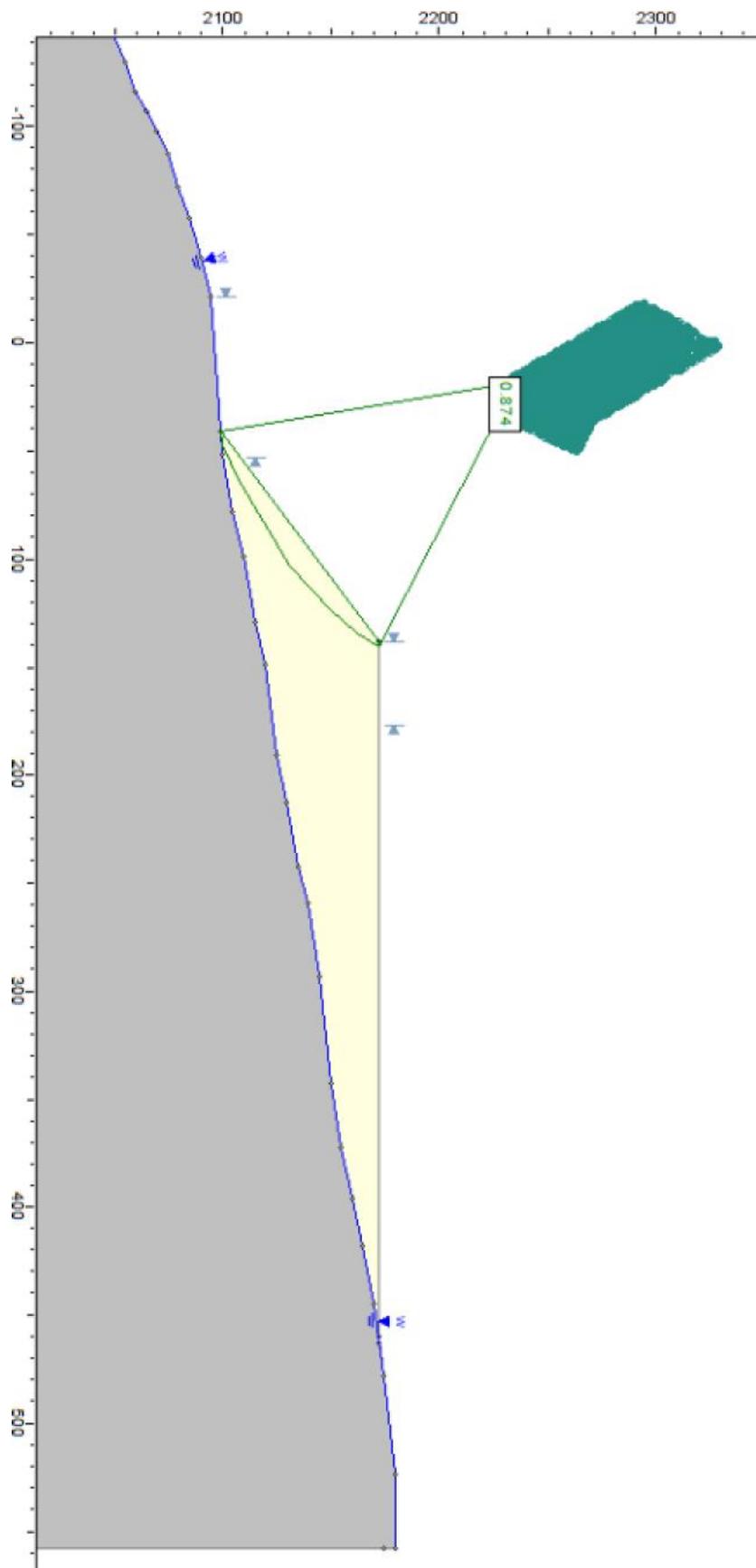
Anexo 131 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Antamina



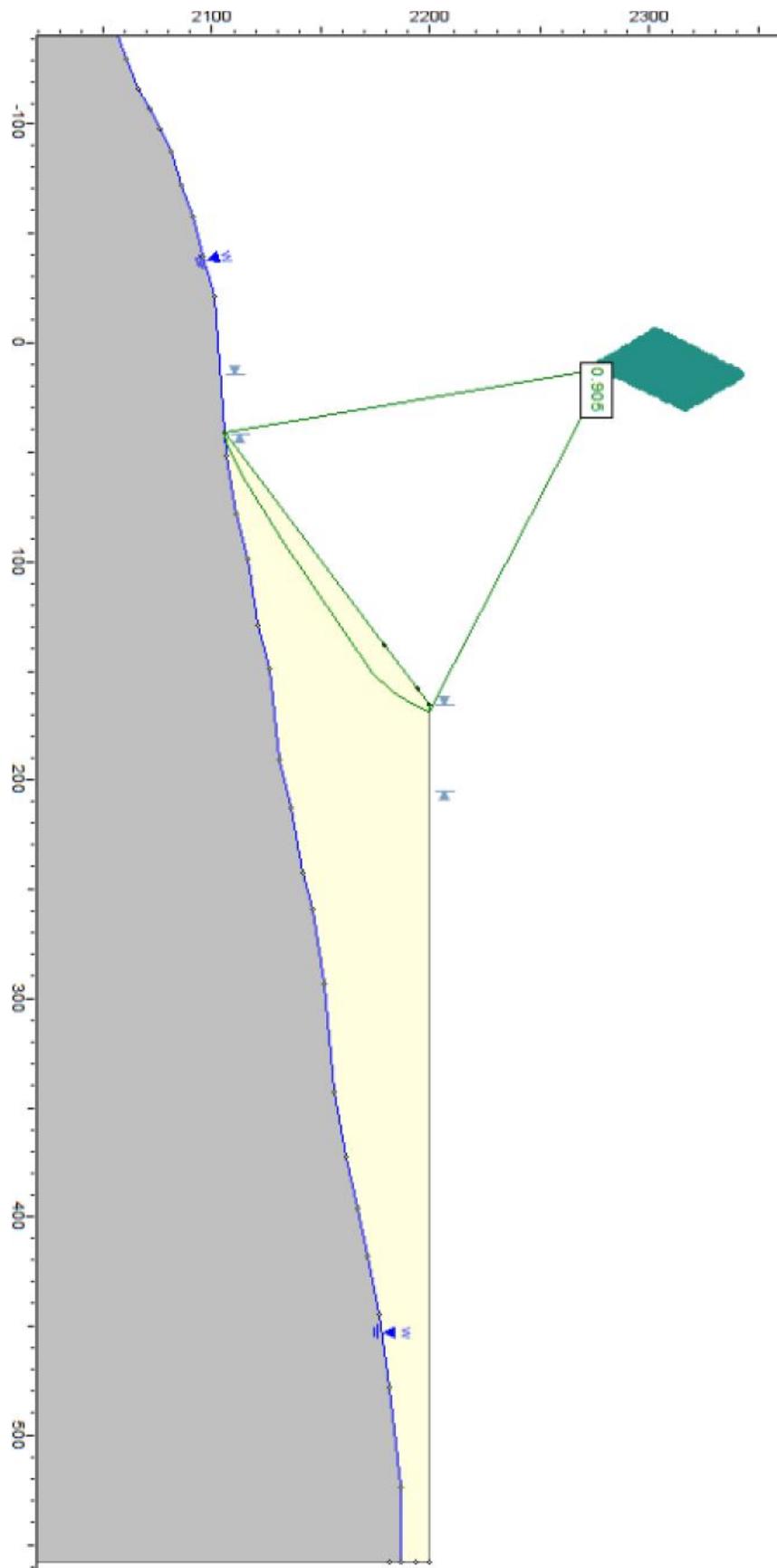
Anexo 132 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Line Creek



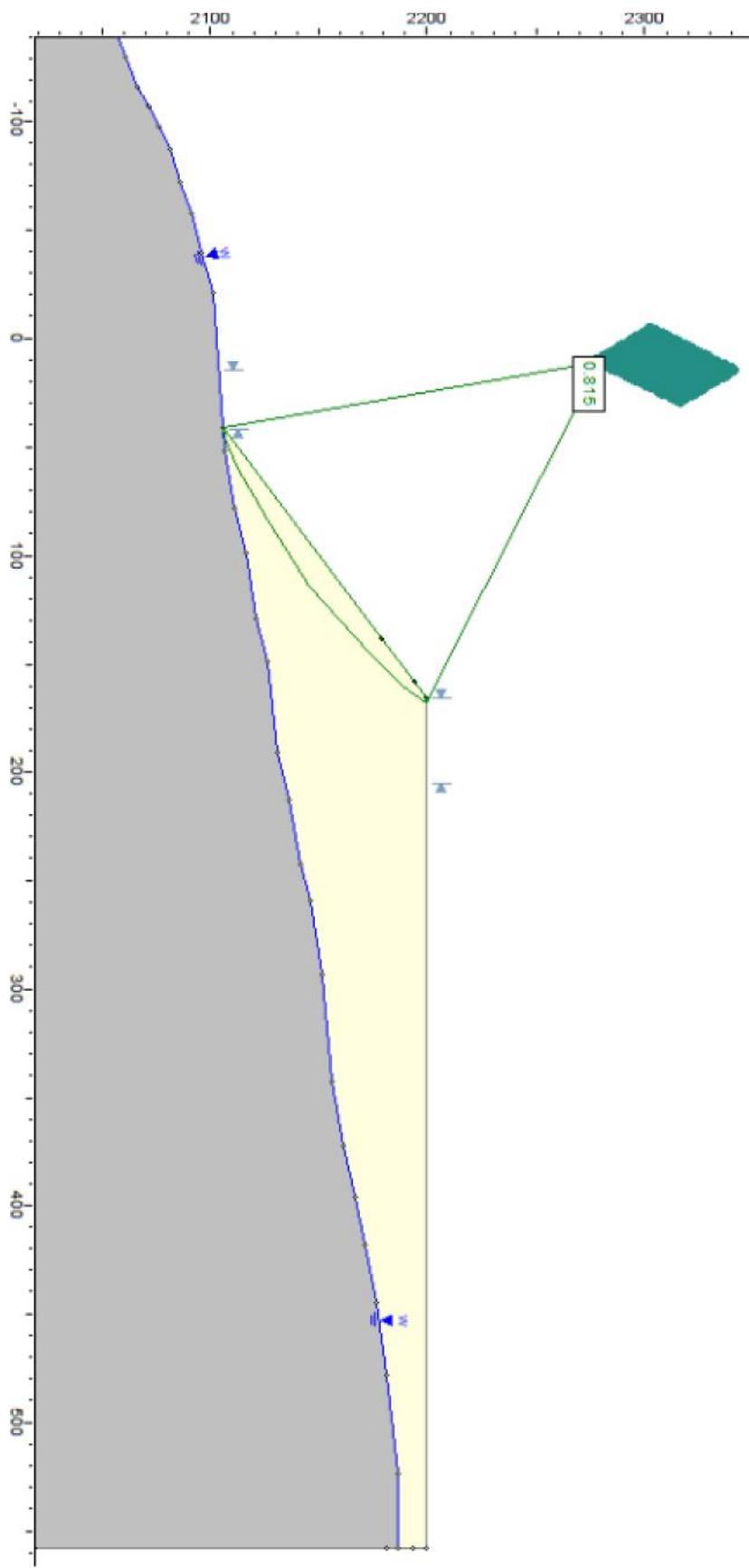
Anexo 133- Sección1, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Line Creek



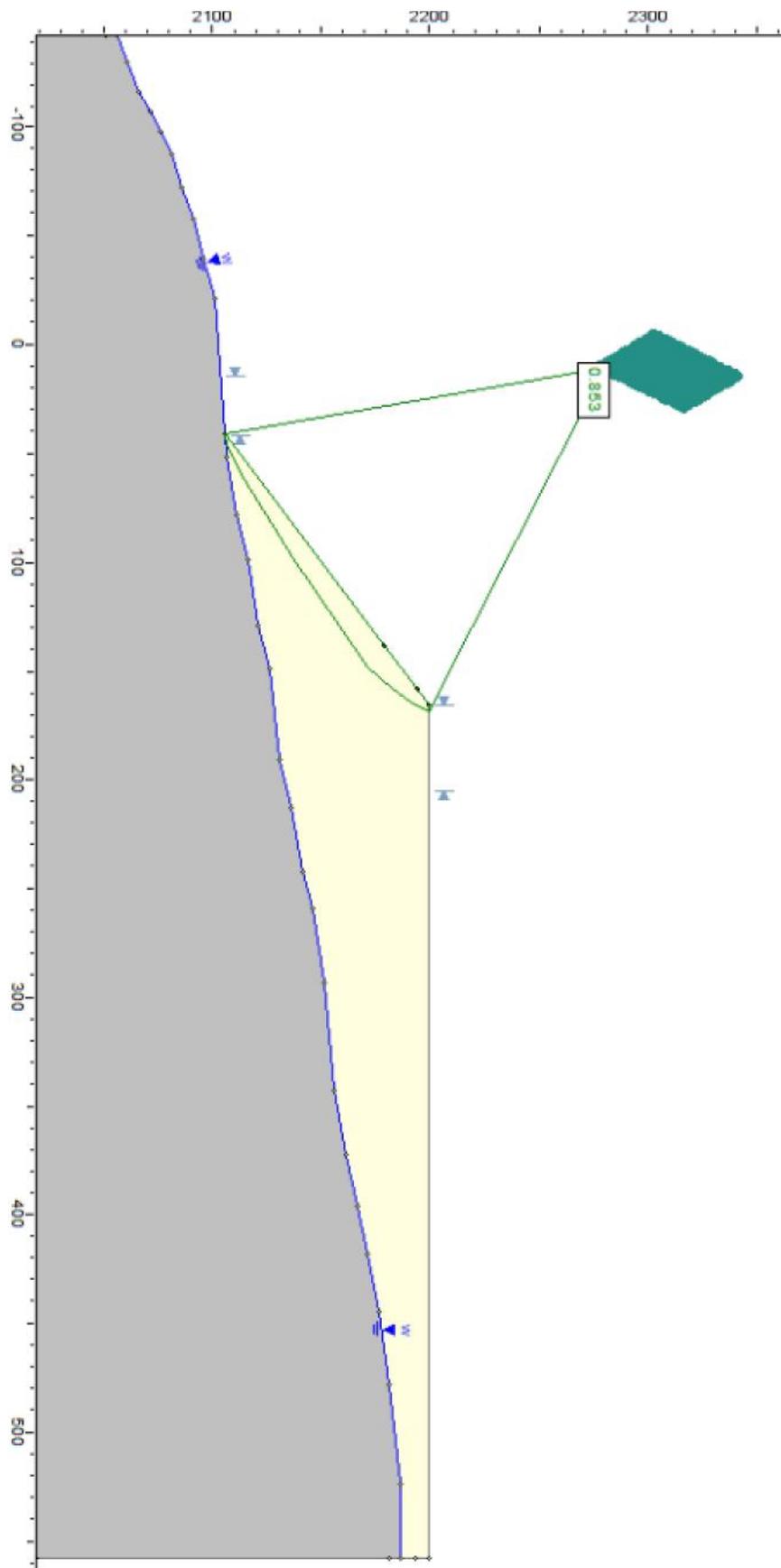
Anexo 134 - Sección1, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek



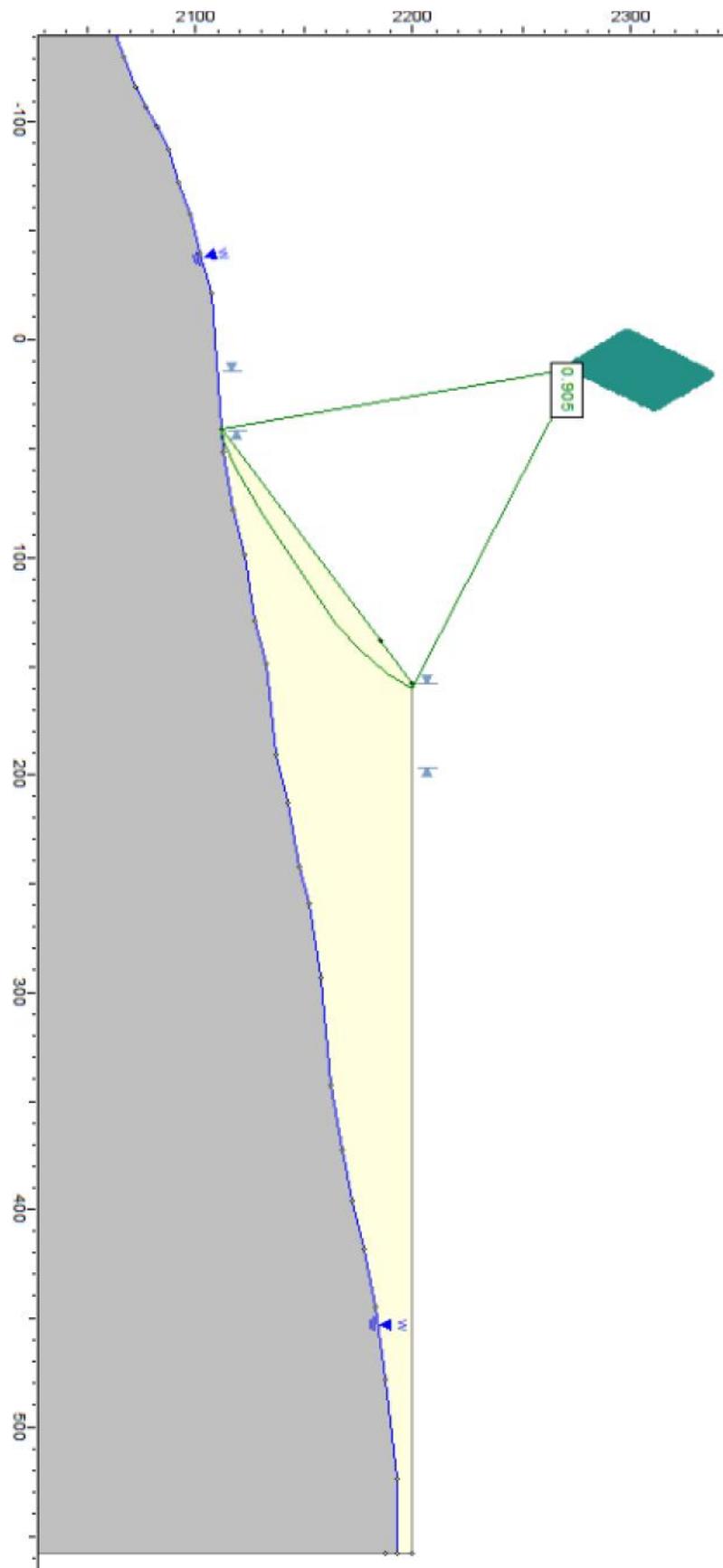
Anexo 135 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Line Creek



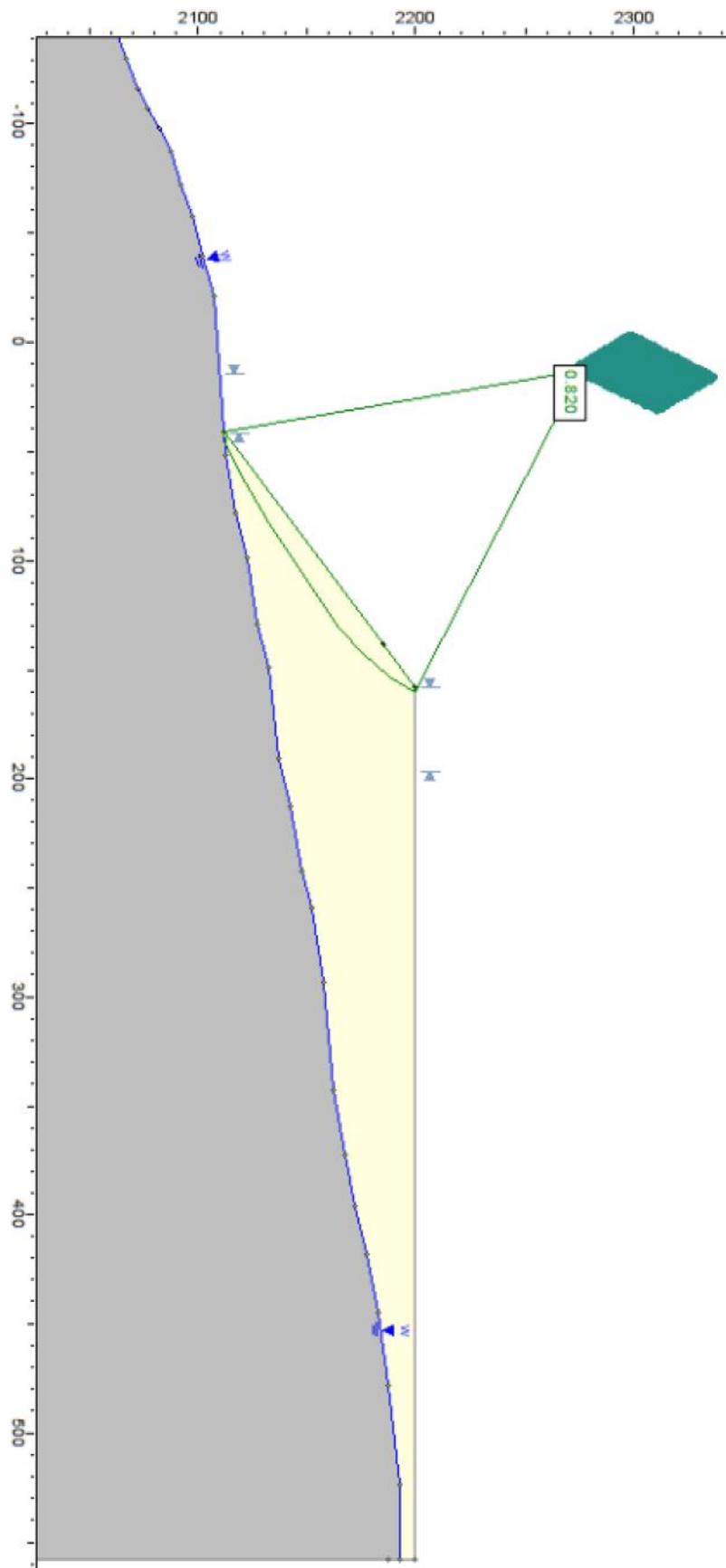
Anexo 136 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Line Creek



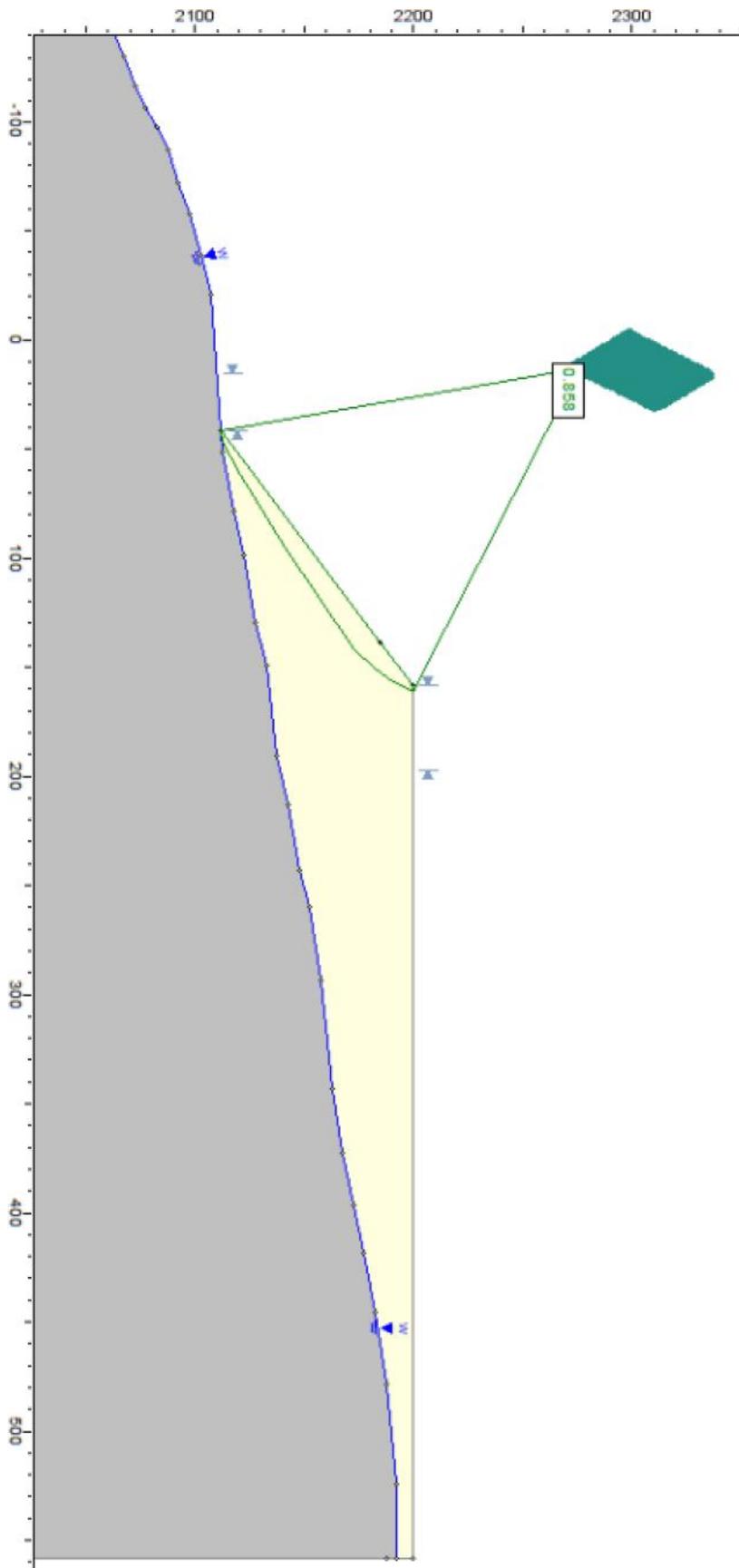
Anexo 137 – Sección2, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek



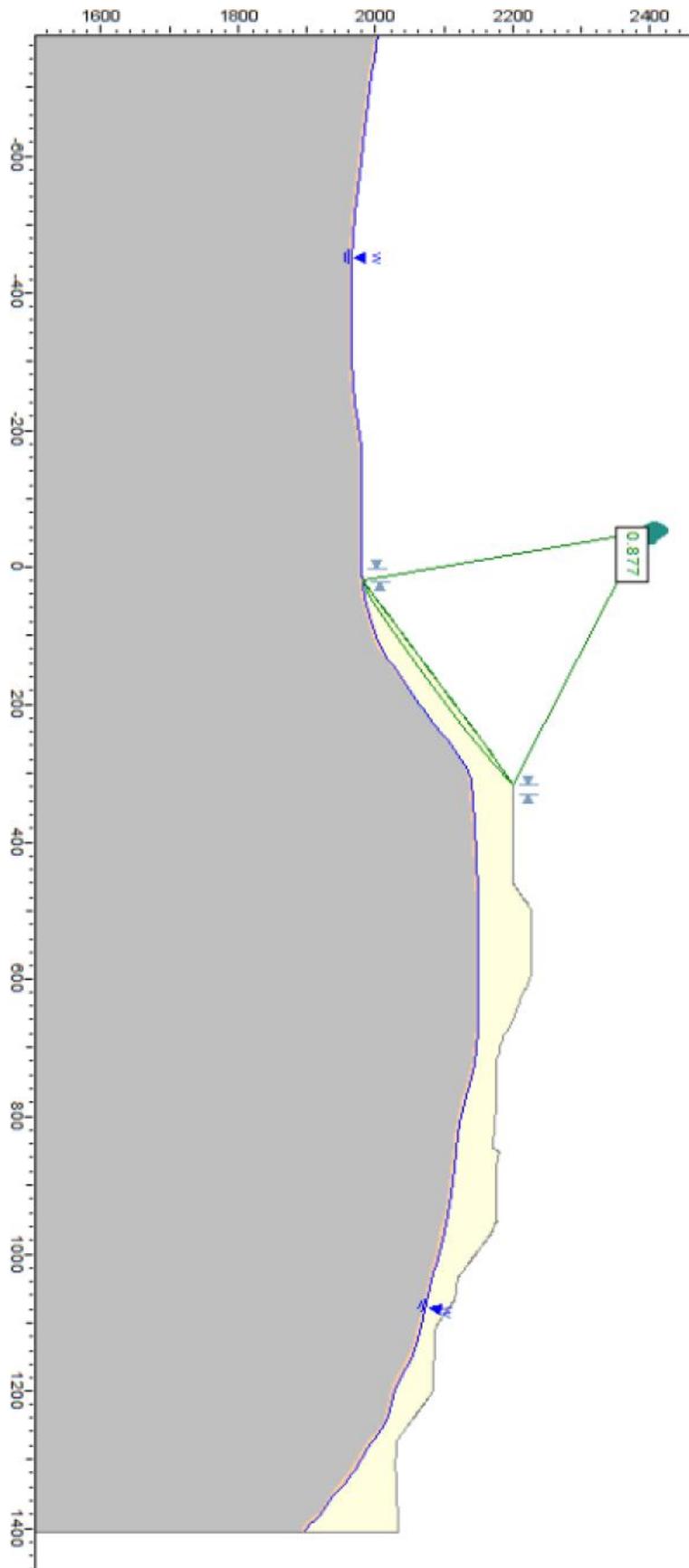
Anexo 138 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Line Creek



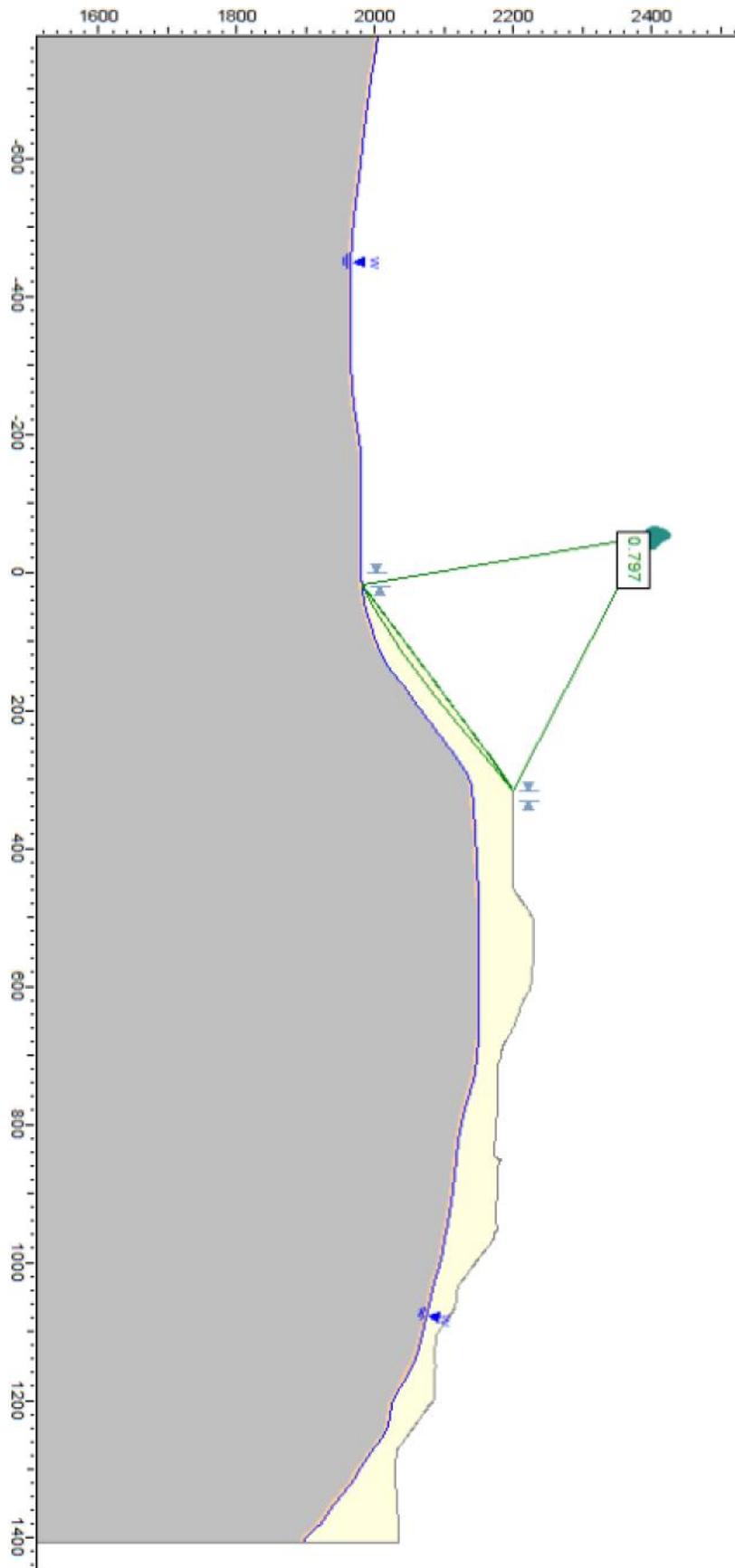
Anexo 139 - Sección3, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Line Creek



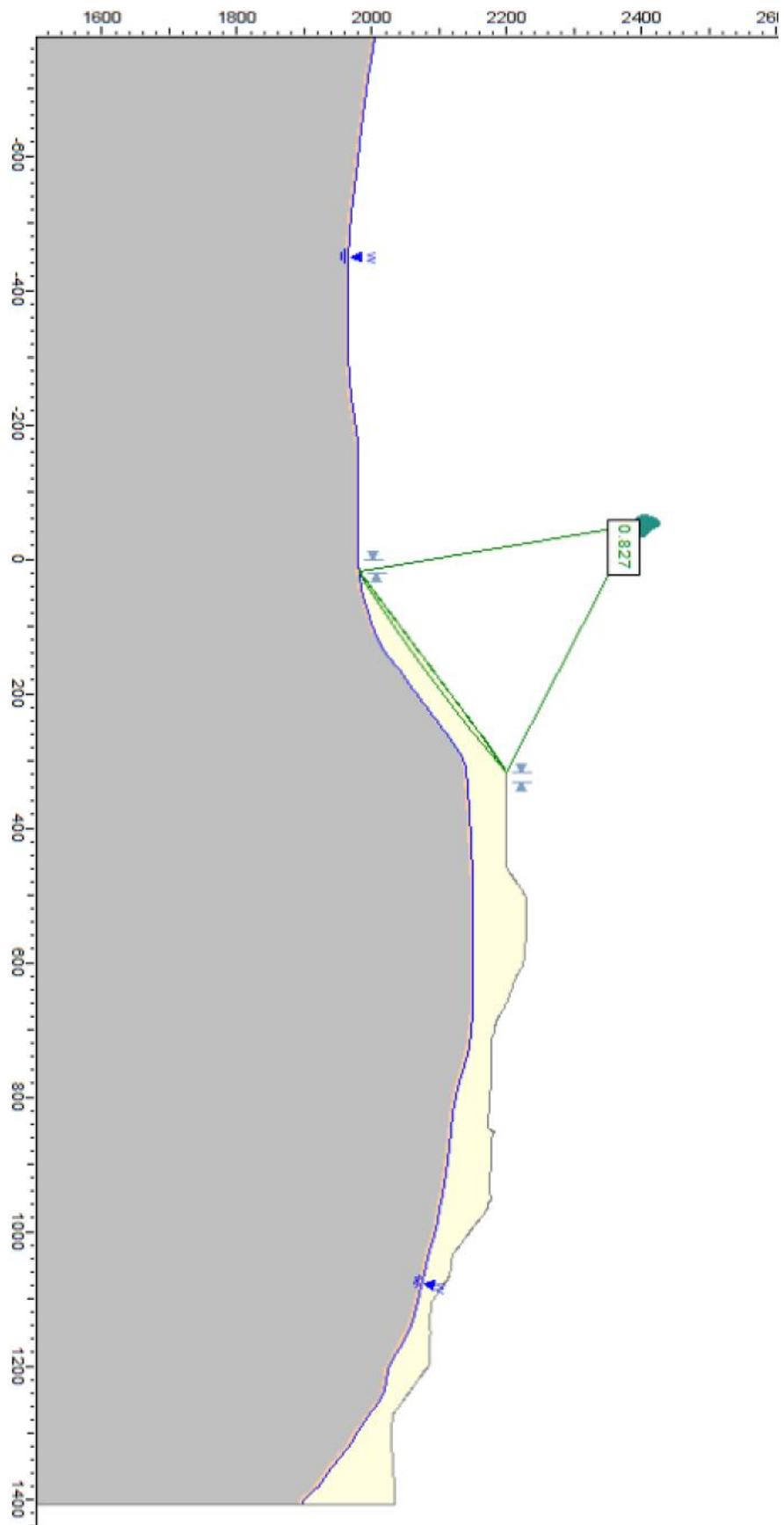
Anexo 140 – Sección3, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek



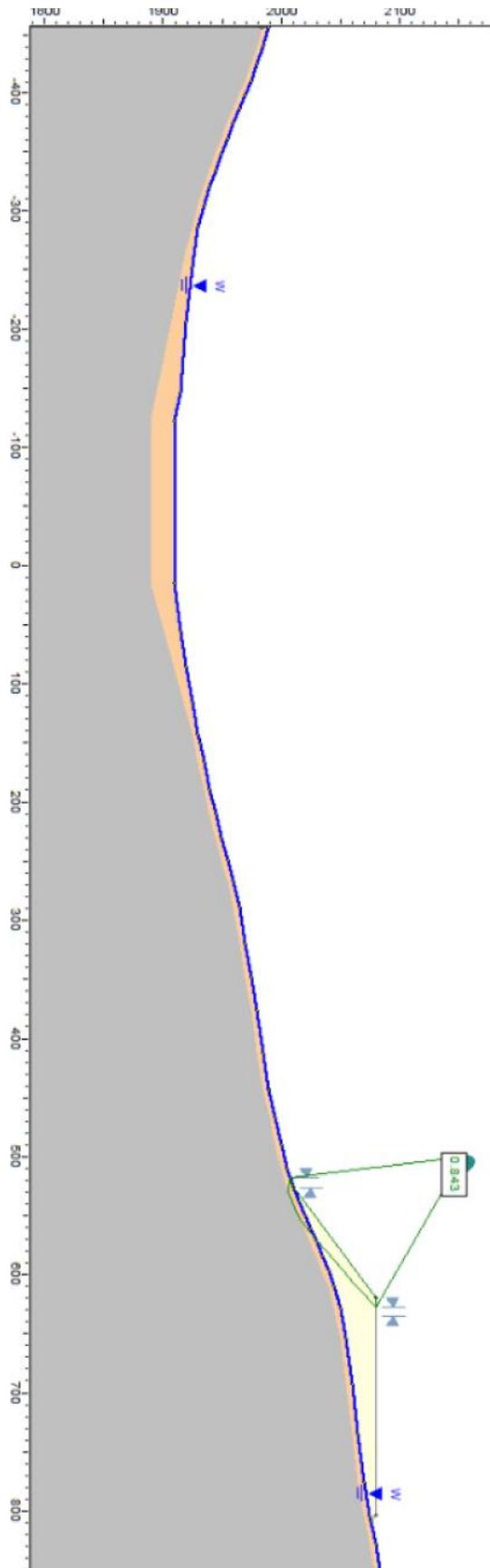
Anexo 141 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Line Creek



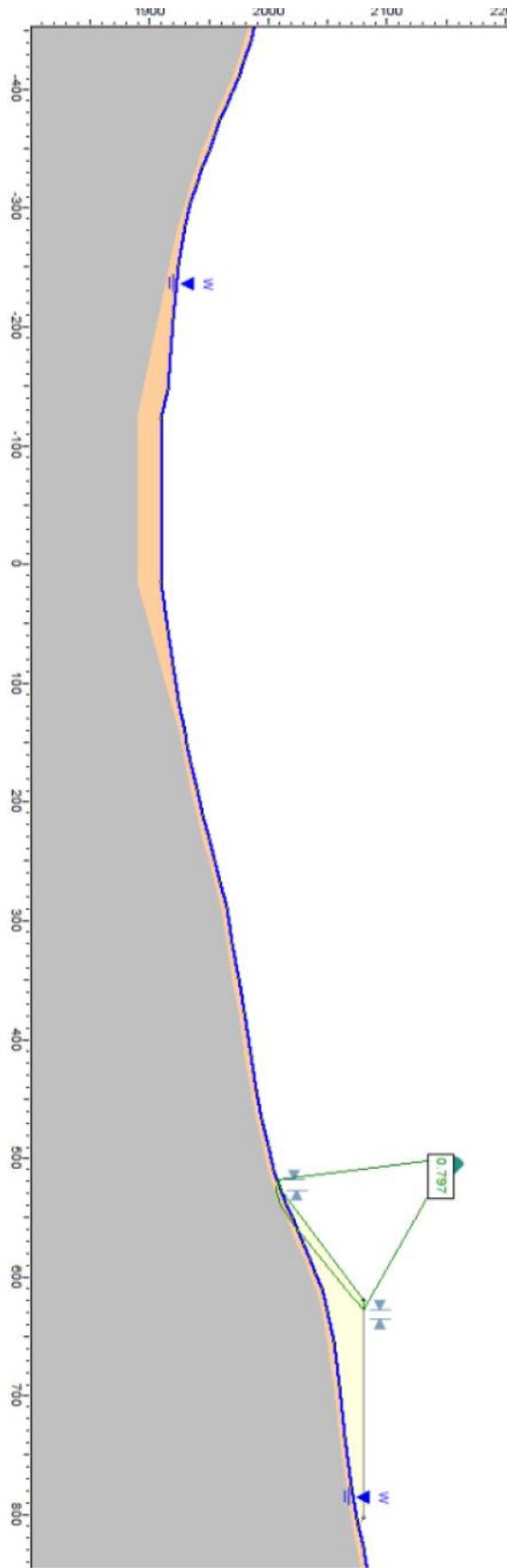
Anexo 142 - Sección4, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Line Creek



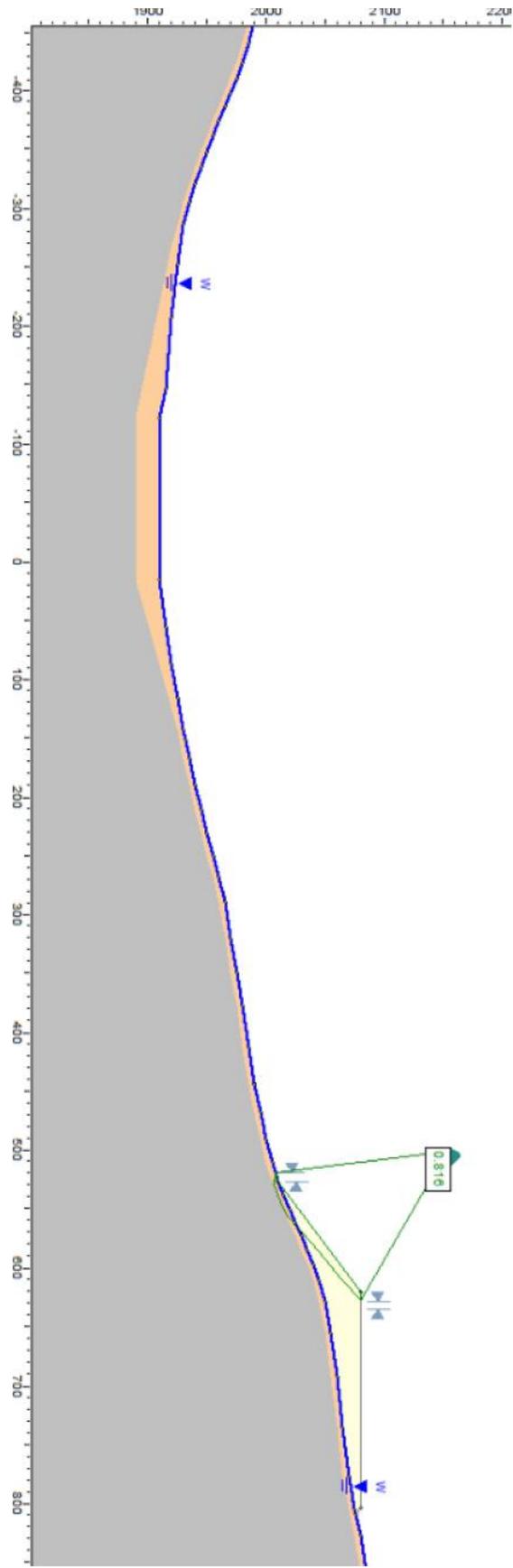
Anexo 143 – Sección4, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek



Anexo 144 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} < 80$, Line Creek



Anexo 145 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste $d_{max} > 80$, Line Creek



Anexo 146 – Sección5, Superficie 0101, Ajuste simplificado, Line Creek