



Título: Caracterización y Modelamiento 3D de una pileta de lodos para su posible explotación con fines térmicos. Evaluación del Contenido de Cenizas y Poder Calorífico Superior.
Yacimiento Carbonífero Río Turbio,
Güer Aike, Santa Cruz

Autor: Lic. Leopoldo Serpa

Director: MSc. Ariana Carrazana Di Lucia



2019

Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Exactas y
Naturales. Departamento de Ciencias Geológicas.

Carrera de Especialización en Geología Minera
Trabajo Final Integrador

Caracterización y Modelamiento 3D de una pileta de lodos para
su posible explotación con fines térmicos. Evaluación del
Contenido de Ceniza y Poder Calorífico Superior. Yacimiento
Carbonífero Río Turbio, Güer Aike, Santa Cruz

*Characterization and 3D modeling of a coal tailing pond for possible
exploitation for thermal purposes. Evaluation of Ash Content and Gross
Calorific Value. Yacimiento Carbonífero Río Turbio, Güer Aike, Santa Cruz*

Autor: Lic. Leopoldo Daniel Serpa

Director: MSc. Ariana Carrazana Di Lucía

TFI. Res: CS4653/16

Año 2019

Resumen

Se evalúan las características combustibles y distribución de materiales depositados en una Pileta de Lodos de la empresa Yacimiento Carbonífero Río Turbio (YCRT). Las características geológicas y físico-químicas del carbón, su método de extracción, el proceso de beneficio y el tipo de descarga utilizado, son claves para comprender la distribución de los materiales presentes en la pileta. La recuperación o re-utilización de carbón fino (<1 mm) de estas piletas presenta numerosos beneficios medioambientales que pueden traducirse en beneficios económicos. Este trabajo se basa en el estudio de 35 pozos perforados en una Pileta de Lodos cuyas muestras de sedimentos fueron analizados por Cenizas (Cz) y Poder Calorífico Superior (PCS). Estos datos fueron evaluados estadísticamente y modelados en 3D para finalmente realizar una estimación de recursos secundarios. Los resultados hasta la profundidad (2,50 m.b.b.p.) estudiada presentan un volumen de 39.950 m^3 cuyo tonelaje equivale a 42.746,5 t, con un contenido medio de Cz de 58,34 %wt (s/s) y un PCS de 3.129,11 Kcal/kg (s/s). El modelamiento permitió identificar zonas preferentes de concentración de carbón, arcilla y estériles que responden a los esquemas conceptuales de la literatura para los diques de colas. La evaluación de recursos secundarios de la pileta de lodos, estimada mediante IDW³ permitió cuantificar el potencial de estos residuos y muestra nuevas posibilidades en el uso y optimización de pasivos mineros. Esto representa una aproximación experimental que combinada con estudios ingenieriles y metalúrgicos complementarios podría optimizar los resultados de recuperación y el rendimiento óptimo planificado en la planta depuradora.

Palabras Claves: relaves de carbón, modelado 3D, reutilización, estimación, recursos secundarios.

Abstract

The combustion properties and spatial distribution of materials deposited in a coal tailing storage facility of the company Yacimiento Carbonífero Río Turbio (YCRT) are evaluated in this study. Geological, physical and chemical characteristics of coal, extraction methods, beneficiation process and types of deposition are of great importance for understanding the nature of the tailings. Recovery or reuse of fine coal (<1 mm) has several environmental and economic benefits. Samples collected from 35 drill holes former a coal tailing pond, were analyzed by Ash and Gross Calorific Value (CGV). The statistical evaluation and the 3D model of this data were made to estimate secondary resource. The results obtained up to 2,5 m under wellhead (investigation depth) show a volume of 39.950 m^3 which is equivalent to 42.746,5 t, with an ash content of 58,34 %wt (db) and a GCV of 3.129,11 Kcal/kg (db). Modeling enabled identifying preferential zones with coal, clays, and wastes that correspond to conceptual models of tailing dams. The secondary resource estimation using IDW³ quantify and shows new possibilities for reuse and optimization of mining wastes. This experimental approach combines with engineering and metallurgical studies could enhance recovery and reach optimum efficiency of the preparation plant.

Keywords: coal tailing, 3D modeling, reuse, estimation, secondary resources.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1.	Introducción	9
2.	Objetivos	10
3.	Marco teórico sobre Yacimiento Carbonífero Río Turbio	11
3.1.	Ubicación geográfica del área de estudio.....	11
3.2.	Empresas encargadas de la exploración y explotación del yacimiento	11
3.3.	Marco geológico regional y local	13
3.3.1.	Geología del Yacimiento Río Turbio	14
3.3.2.	Complejos Carbonosos en el Yacimiento	17
4.	El carbón.....	18
4.1.	Características técnicas.....	18
4.1.1.	Análisis de carbón	19
4.1.2.	Definición de Ceniza y Poder Calorífico Superior	20
4.2.	Métodos de explotación del carbón en YCRT	21
4.3.	El Proceso de depuración del carbón en YCRT.....	25
4.4.	Descripción de las piletas de lodos	29
4.4.1.	Pileta de Lodos N°2	30
4.4.2.	Distribución de los materiales dentro de la Pileta N° 2.....	32
5.	Recursos y reservas	32
5.1.	Aspectos económicos y mercado actual.....	33
5.2.	Legislación vigente	34
5.2.1.	El carbón en la legislación vigente	34
5.2.2.	Situación ambiental de las piletas de lodos	35
6.	Materiales y métodos.....	35
6.1.	Protocolos de trabajo desarrollados en la pileta de lodos N°2.....	35
6.1.1.	Toma de muestras.....	35
6.1.2.	Preparación de las muestras	38
6.1.3.	Ánálisis de las muestras	40
7.	Resultados	41
7.1.	Descripción macroscópica del sedimento muestreado en la pileta de lodos.....	41
7.2.	Ánálisis Exploratorio de Datos (EDA)	43
7.3.	Modelamiento 3D	52
7.3.1.	Modelamiento geológico de los sedimentos	52

7.3.2. Modelo de bloques de la variable Cz	57
7.4. Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (EDAS) para el Modelo de Bloques	60
7.5. Estimación de Tonelaje	65
8. Discusiones.....	67
9. Conclusiones.....	70
10. Agradecimientos	72
11. Bibliografía	73
Anexo 1: Ejemplo de cálculos del promedio ponderado de Contenido de Cenizas y Poder Calorífico Superior	79
Anexo 2: Análisis de Contenido de Cenizas y Poder Calorífico Superior a diferentes profundidades denominadas tramos.....	80
Anexo 3: Modelos de bloques realizados con diferentes software utilizados en este trabajo. Presentación de vistas en 3D.	86
Anexo 4: Ejemplo de cálculos del promedio ponderado de Contenido de Cenizas y Poder Calorífico Superior	89
Anexo 5: Tabla de Abreviaturas y conversión de unidades.....	90

LISTA DE ILUSTRACIONES

Fig. 1: Porcentaje de utilización de los residuos de la minería de carbón en China en el año 2002. Tomado y modificado de Bian <i>et al.</i> 2009.	9
Fig. 2: Ubicación y principales vías de acceso a la localidad de Río Turbio.	11
Fig. 3: Ubicación de las principales áreas operativas de Yacimiento Carbonífero Río Turbio (YCRT).....	13
Fig. 4: Distribución de facies carboníferas en Argentina. Tomado y modificado de Borrello (1956) en Brooks <i>et al.</i> 2006.....	14
Fig. 5: Mapa geológico a escala regional donde se indica el área del Yacimiento. Tomado y modificado de SEGEMAR 2019 (https://sigam.segemar.gov.ar/visor/)	15
Fig. 6 Mapa con la extensión de los mantos carboníferos y la posición del yacimiento con sus galerías principales (ENADIMSA, 1987).	16
Fig. 7: Mapa geológico de detalle del área del yacimiento. Tomado y modificado de Malumián <i>et al.</i> 2000.	16
Fig. 8: Perfil, sin escala, en dirección W-E atravesando el yacimiento, indicado en el mapa como A-A'. Tomado y modificado de Malumián <i>et al.</i> (2000).	17
Fig. 9: Columna estratigráfica simplificada (sin escala) tomada y modificada de ENADIMSA (1987). Se representan las formaciones reconocidas en la mina y un detalle de los complejos carbonosos.....	18
Fig. 10: Comparación entre resultados obtenidos por análisis próximo (a) y análisis último (b). Tomado de Speight (2015).	20
Fig. 11: Distribución en planta de las galerías principales y de ventilación de las minas subterráneas desarrolladas en el Yacimiento. Se indica además la zona donde se generó la explotación a cielo abierto.	22

Fig. 12: Vista en planta de frentes largos en retroceso (<i>retreat face</i>) y en avance (<i>advance face</i>). Tomado de <i>The Open University</i> (2019)	23
Fig. 13: Sistemas que componen el frente de explotación: Soporte (<i>roof support</i>), corte (<i>shearer</i>) y transporte (<i>main AFC</i>). Tomado de Caterpillar (2014).....	24
Fig. 14: A) Plano esquemático de algunos paneles de explotación (FL= frente largo) correspondientes a la zona del Chiflón 7 de Mina 5. B) Puede verse el manto de carbón, el equipo de sostenimiento y las cadenas blindadas de evacuación del material minado. En C) se ve el equipo de corte del carbón (rozadora).....	24
Fig. 15: Esquema de plantas de beneficio con cuatro circuitos paralelos para diferentes granulometrías de alimentación. (Fuente: Galvin e Iveson, 2013 y Rob <i>et al.</i> 2017).	25
Fig. 16: Diagrama de flujo (<i>flow-sheet</i>) simplificado del actual funcionamiento de la Planta Depuradora de YCRT.....	27
Fig. 17: Vista de las zarandas N°17, donde también pueden verse los rociadores para el lavado del carbón bruto. En la parte inferior se puede observar el separador de tambor (DISA).	28
Fig. 18: Separador de carbón grueso tipo <i>Drewboy</i> (DISA).	28
Fig. 19: A) Zarandas N°222, donde se puede observar la zaranda curva (estática), seguido por una vibratoria horizontal. B) Hidrociclos de medio denso.....	29
Fig. 20 Ubicación de las Piletas de Lodos de YCRT, diferenciando las colmatadas de las que se encuentran operativas.....	30
Fig. 21 Imagen histórica (2008) de Google Earth donde puede verse la zona de agua sobrenadante (<i>supernatant pond</i>) de la Pileta de Lodos Nº 2.....	31
Fig. 22: En A) una visual general de la pileta Nº 2 desde la zona de descarga; B) y C) resaltos observados en la superficie de la pileta.....	31
Fig. 23: A) Visual de las laminaciones originadas por los flujos de descarga en los laterales de la Pileta Nº 2. En B) detalle de las mismas. La escala en ambas fotografías corresponde a un lápiz.....	32
Fig. 24 Demanda de carbón proyectada para el período 2016-2022. Tomado de Gómez (2018).	34
Fig. 25: Ubicación de pozos, con su profundidad final, sobre la malla de 20x20 m diseñada para el muestreo de la Pileta Nº 2.....	36
Fig. 26 Principales etapas del procedimiento de muestreo. En números se representan las etapas enumeradas en el texto.....	37
Fig. 27: Ejemplo de un tramo muestreado de 0,50 m – 1,00 m, donde se indican las distintas mediciones de control realizadas.	38
Fig. 28 Procedimiento de preparación de muestras para análisis de carbón.....	39
Fig. 29 Etapa final, de la preparación de la muestra: pasos 6 y 7: a) cuarteador rifle, b) sub-muestra 3x0,5 mm, c) pulverizador, d) muestra para análisis (< malla #60 ASTM).	40
Fig. 30 Equipos del Laboratorio de Planta Depuradora en YCRT para la determinación de humedad, PCS y cenizas.	41
Fig. 31: Se muestran las características de los componentes descriptos como “carbón” y “arcilla” en el pozo E33, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).	42
Fig. 32: Se muestran las características de los componentes descriptos como “carbón con arcilla” en el pozo E1, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).	43

Fig. 33: Se muestran las características de los componentes descriptos como “estéril”, “estéril con carbón” y “carbón con estéril” en el pozo E13, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).....	43
Fig. 34: Histograma de frecuencia relativa (%) para la variable Cz (%wt) calculado con el software Statgraphics Centurion v16.1.03	45
Fig. 35: Histograma de frecuencia relativa (%) para la variable PCS (Kcal/kg) calculado con el software Statgraphics Centurion v16.1.03	45
Fig. 36: <i>Scatter plot</i> para PCS (s/s) vs Cz (s/s) junto con la ecuación de la recta de ajuste (regresión) realizado en Excel 2016	46
Fig. 37: <i>Q-Q plot</i> normal para Cz %wt (s/s) realizado con Statgraphics Centurion v16.1.03.....	46
Fig. 38: <i>Q-Q plot</i> normal para PCS Kcal/kg (s/s) realizado con Statgraphics Centurion v16.1.03.....	47
Fig. 39: <i>Box Plot</i> para Cz (realizado en Excel 2016) donde se puede visualizar la variación en dicho parámetro estudiando cada tramo y la totalidad de los datos.	48
Fig. 40: <i>Box Plot</i> para PCS (realizado en Excel 2016) donde se puede visualizar la variación en dicho parámetro analizando cada tramo y la totalidad de los datos.	48
Fig. 41: <i>Trend Analysis</i> para T2 (0,50m-1,00m) en ArcGIS v10.3 donde se identifica la tendencia W-E (verde) y N-S (celeste). El menor contenido de Cz se encuentra hacia el centro y laterales N-S. El eje Z representa Cz %wt	49
Fig. 42: <i>Voronoi Map</i> de desviación estándar para T1 (0,00m-0,50m) en ArcGIS v10.3. Se visualiza cómo en las proximidades de la descarga, la variación de la desviación estándar de Cz es mayor que en la dirección más lejana. Rojo indica mayor variación de la desviación estándar y verde menor variación... <td>49</td>	49
Fig. 43: Flujo de trabajo para obtener la longitud y descripción de los sedimentos utilizados en el modelo geológico. Se muestra el Pozo E3 con descripción de sedimentos del paso B y del paso E extraído del software Micromine v11.0.0 (exageración vertical 5 veces).....	50
Fig. 44: <i>Box Plot</i> (con Statgraphics Centurion v16.1.03) donde se representa la distribución de Cz en los distintos sedimentos.	51
Fig. 45: Visual 3D de la topografía generada a partir de la cota de los pozos y puntos topográficos. Exageración vertical 10 veces.....	52
Fig. 46: Visual 3D hacia el NNW de los materiales identificados en la Pileta de Lodos. Exageración vertical 10 veces.....	52
Fig. 47: Visual 3D hacia el NNW de los materiales identificados en la Pileta de Lodos. “Ubicacion_en_3D” son los sedimentos resultantes del agrupamiento realizado con la función <i>Group Lithologies</i> . Exageración vertical 10 veces.	53
Fig. 48: Visual 3D donde se pueden ver los sólidos modelados con Leapfrog Geo v4.4. Debido a que se modeló una única arcilla (esta equivale a arcilla intermedia). Exageración vertical 10 veces.	54
Fig. 49: Reporte de la estadística de la herramienta <i>New Evaluation</i> de Leapfrog Geo v.4.4. A la izquierda se ve el ajuste del sedimento con el correspondiente modelo; a la derecha se muestra los sólidos que describen el sedimento seleccionado, en este caso es Carbón Intermedio.....	54
Fig. 50: Sección W-E, con vista al N, donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón. Exageración vertical 10 veces.	55

Fig. 52: Sección N-S, con vista al E, donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón. Exageración vertical 10 veces.	55
Fig. 53: Vista en planta, cota 258 m.s.n.m., donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón.	56
Fig. 54 Visual hacia el SE de la distribución de los estériles en la pileta de lodos. Exageración vertical 10 veces. Leapfrog Geo v.4.4.....	57
Fig. 55: Visual hacia el SW de la distribución de los estériles en la pileta de lodos. Exageración vertical 10 veces. Micromine v11.0.0.....	57
Fig. 56: Sólido (wireframe) que define el volumen dentro del cual se realizarán las estimaciones. Exageración vertical 10 veces.....	59
Fig. 57: Modelo de bloques blancos, se resalta el mismo bloque para apreciar la diferencia en tamaño de cada uno. Izquierda: bloques de 5x5x0,5 m; Derecha: bloques de 10x10x0,5 m. Los bloques están vacíos, solo poseen coordenadas x, y, z, por lo que el color no representa ningún atributo. Exageración vertical 10 veces.....	59
Fig. 58: Menú de selección de parámetros para la construcción de modelos de bloques en Micromine v11.0.0. Se destacan los parámetros utilizados y descriptos en los puntos 2 a 5.....	60
Fig. 59: Selección de parámetros para el reporte de modelos de bloques en Micromine v11.0.0 Nótese la selección del valor de <i>cut off</i>	60
Fig. 60: Gráfico de frecuencia acumulada donde se comparan Cz de los datos, y las estimaciones.....	62
Fig. 61: <i>Blox Plot</i> (realizado en Excel 2016), donde se representan gráficamente los datos de la Tabla 13. Modelos de Bloques 10x10x0,5 m.	64
Fig. 62: Vista en 3D del modelo de bloques 10x10x0,5 m estimado en Leapfrog Geo v4.4 (RBF) sin restringir y restringiendo por tipo de material. Rojo indica mayor Cz y verde menor. Exageración vertical 10 veces.	64
Fig. 63: ejemplo esquemático de un suelo donde se indican las tres fases que lo componen, junto con los pesos y volúmenes correspondientes a cada fase. A la izquierda un suelo “real” y a la derecha separado en fases para identificar la relación entre ellas. W= peso; V= volumen, w=agua, s=sólidos, a=aire, v=vacíos. Tomado de: http://www.civil.uwaterloo.ca/maknight/courses/CIVE353/Lectures/Week%202/phase%20relationships.pdf	65
Fig. A.2.1: Histogramas de frecuencia para la variable Cz %wt (s/s) por tramos. En azul, curva de distribución normal. Realizado en Statgraphics Centurion v16.1.03. Referencias: Cz= contenido de cenizas, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades.	81
Fig. A.2.2: Histogramas de frecuencia para la variable PCS Kcal/kg (s/s) por tramos. En azul, curva de distribución normal. Realizado en Statgraphics Centurion v16.1.03. Referencias: PCS= Poder Calorífico Superior, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades.....	82
Fig. A.2.3: Gráficos de correlación PCS vs Cz para todos los datos y por tramos, realizado en Excel 2016. Referencias: PCS= Poder Calorífico Superior, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades	83
Fig. A.2.4: Gráficos obtenidos con la herramienta Trend Analysis del software ArcGIS v10.3 para evaluar tendencia en la distribución de Cz. En verde tendencia W-E y en azul N-S. La flecha azul indica el sentido de la descarga en la pileta de lodos N° 2. Referencias: Cz= contenido de ceniza, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades. Datos superficiales incluye las 35 muestras del T1 y 85 correspondientes a un	

muestreo del Laboratorio de YCRT llevado a cabo con pala hasta una profundidad de aproximadamente 0,50m.....	84
Fig. A.2.5: Mapas de Voronoi de desviación estándar por tramos obtenidos con la herramienta Voronoi Map del software ArcGIS v10.3. Rojo representa mayor variación en la desviación estándar y verde menor. La flecha azul indica el sentido de la descarga en la pileta de lodos N° 2. Referencias: T1 a T5= tramos a diferentes profundidades. Datos superficiales incluye las 35 muestras del T1 y 85 correspondientes a un muestreo del Laboratorio de YCRT llevado a cabo con pala hasta una profundidad de aproximadamente 0,50m.....	85
Fig. A.3.1: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Micromine v11.0.0. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.	86
Fig. A.3.2: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Micromine v11.0.0. Visual al SW y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.	86
Fig. A.3.3: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.	87
Fig. A.3.4: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Estéril Superior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.....	87
Fig. A.3.5: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Estéril Inferior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.....	87
Fig. A.3.6: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Arcilla realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.....	88
Fig. A.3.7: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Carbón Superior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.....	88
Fig. A.3.8: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Carbón Inferior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Análisis de carbón tomado de Brooks y Willet (2004):ar= <i>as received</i> ; d= <i>dry</i> y daf= <i>dry ash free</i> . 21	
Tabla 2: superficie de las piletas estimadas en función del perímetro interno definido con el software ArcGIS v10.3.	30
Tabla 3: Producción de carbón 2014-2016 reportada por la Dirección Provincial de Minería de Santa Cruz. Tomado de Castro (2018).....	33
Tabla 4: Ejemplo del informe de laboratorio para la muestra 00005-P, y el promedio ponderado calculado a partir de éste.	44
Tabla 5: Estadística descriptiva para Cz y PCS obtenida con Excel 2016.	44
Tabla 6: Estadísticas de regresión realizada con Statgraphics Centurion v16.1.03.....	46
Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste de Kolgomorov-Smirnov realizada con Statgraphics Centurion v16.1.03.....	47

Tabla 8: Resumen estadístico del análisis por sedimentos de Cz %wt (s/s) obtenido con Excel 2016 y que se representa en Fig. 44.	51
Tabla 9: Reporte de volúmenes en Pileta de Lodos Nº 2, por tipo de material, calculado con Leapfrog Geo v.4.4	53
Tabla 10: Resumen estadístico de las estimaciones obtenidas con el modelo de bloques de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m para Cz %wt (s/s). Se incluye también la estadística correspondiente a las muestras recolectadas para su comparación	61
Tabla 11: Reporte de volúmenes estimados con cada modelo de bloques y el correspondiente al sólido (<i>wireframe</i>) que los limita.	62
Tabla 12: Resumen estadístico de las estimaciones obtenidas con el modelo de bloques de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m para PCS Kcal/kg (s/s). Se incluye también la estadística correspondiente a las muestras recolectadas para su comparación	62
Tabla 13: Resumen estadístico reportado por Leapfrog Geo v.4.4, donde se informan los resultados de restringir el Modelo de 10x10x0,5 m obtenido en Micromine v11.0.0 con los sólidos modelados en Leapfrog	63
Tabla 14: Tonelajes estimados con el peso específico seco promedio, y el ponderado. El ponderador utilizado fue la longitud de cada tramo muestreado.	66
Tabla 15: Estimación de Tonelaje realizado con Micromine v11.0 con ley de corte (<i>cut off</i>) igual al parámetro de diseño de la Central Térmica de Río Turbio según informe interno de YCRT (no publicado).	67
Tabla 16: Resumen de pesos unitarios de FCR tomado y modificado de Hegazy <i>et al.</i> (2004)	67
Tabla A.1.1: Variables reportados por el laboratorio y valores calculados a partir de estos datos para determinar Cz y PCS ponderados.	79
Tabla A.2.1: Estadística descriptiva para Cz y PCS por tramos en Excel 2016.	80
Tabla A.2.2: Estadísticas de la correlación PCS vs Cz por tramos obtenida con Excel 2016.	83
Tabla A.4.1: Variables reportados por el laboratorio y valores calculados a partir de estos datos para determinar el peso específico húmedo y seco.	89
Tabla A.5.1: Abreviaturas utilizadas a lo largo de este trabajo. Algunas no tienen traducción al idioma español y se utiliza su término original en inglés.	90

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de depurado, beneficio, limpieza, lavado o preparación del carbón es el proceso por el cual las impurezas inorgánicas (cenizas) son separadas del carbón bruto de mina, produciendo así una mejora en las características combustibles del carbón (Robl *et al.* 2017).

En la empresa Yacimiento Carbonífero Río Turbio (en adelante YCRT) este proceso se desarrolla en la Planta Depuradora Ing. José Andrés Bacigalupo, mediante separación por medios densos (*float and sink* y ciclones) dando como resultado carbón depurado, estériles gruesos (1-100 mm) y lodos. Estos últimos constituyen las colas del proceso, compuestos principalmente por agua, magnetita, arcillas y carbón fino, siendo finalmente depositadas en las Piletas de Lodos.

La Planta, desde su construcción hasta la fecha del presente estudio, no posee un circuito de recuperación del carbón fino (< 1 mm), el cual contiene la menor proporción de cenizas (10-12 %wt s/s – ver tabla de abreviaturas en el [Anexo 5](#)) según comunicación oficial de la empresa YCRT en sus informes internos. La falta de este circuito de recuperación sumado a períodos con procesos de depuración poco eficientes, dan como resultado estimaciones de recuperación en el proceso de beneficio, que no alcanzan el rendimiento óptimo planificado.

Todos estos factores propician mayores estudios sobre los relaves de las piletas de lodos para comprender si es posible, en un futuro, su reutilización con fines económicos.

Los residuos de la minería del carbón son utilizados fundamentalmente para rellenos, como combustible en plantas de generación, materiales para la industria del cemento y para fabricación de ladrillos. Según Bian *et al.* 2009, el porcentaje de tratamiento, utilización y recuperación de residuos de carbón en China (Fig. 1), principal productor y consumidor mundial, es de aproximadamente el 42% (98 Mt).

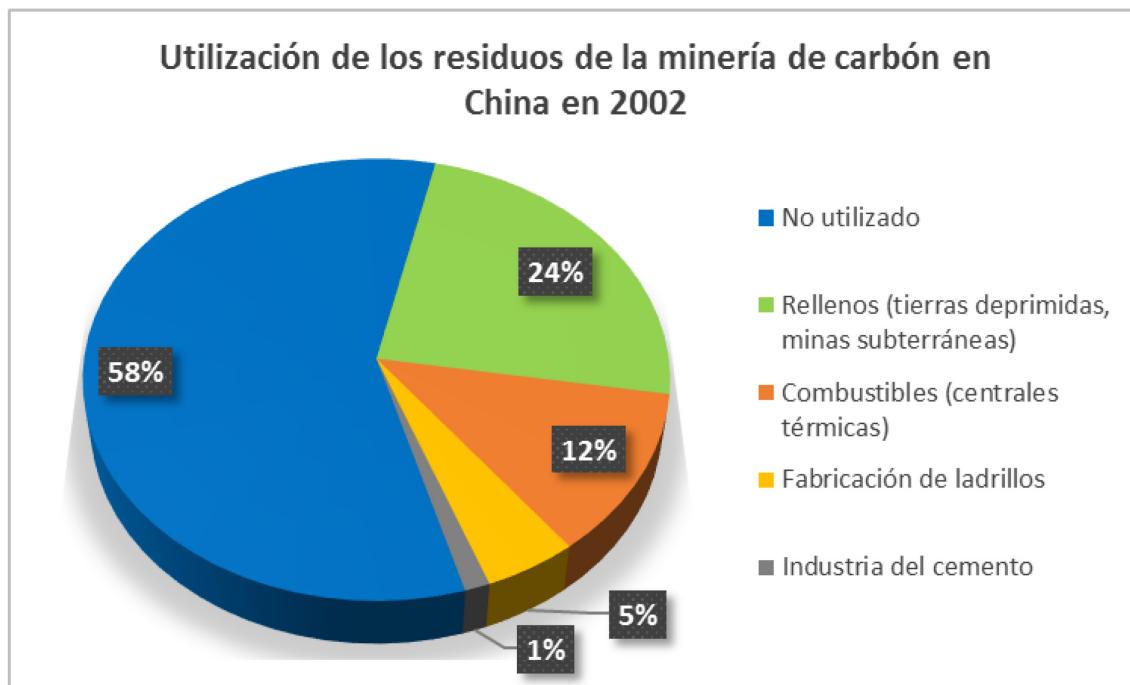


Fig. 1: Porcentaje de utilización de los residuos de la minería de carbón en China en el año 2002. Tomado y modificado de Bian *et al.* 2009.

Es importante plantear esta propuesta de trabajo como una primera aproximación experimental, dónde se pretende cuantificar el potencial de estos residuos, discriminando sus variables de interés, sin obviar la complicación que puede suponer, simular un ambiente de deposición no controlado, pero que puede seguir procesos de sedimentación acordes a controles gravitacionales, granulométricos y de densidad.

Finalmente, la utilización de residuos como materia prima persigue un doble objetivo, ya que permite valorizar el residuo y, además, reducir los costes de producción. Actualmente en algunos países ya se evalúa la posibilidad de clasificar a estos residuos como recursos secundarios, un ejemplo de ello es el *Horizon 2020 Programme* de la Unión Europea por el cual se trabaja bajo el título *Mapping the secondary resources in the EU (mine tailings, industrial waste)*.

Este trabajo pretende mostrar nuevas posibilidades en el uso y optimización de las colas dentro de un proceso minero, a la vez que se espera obtener resultados lo suficientemente satisfactorios como para demostrar que lo que actualmente se considera un pasivo ambiental podría convertirse en un posible recurso secundario.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del trabajo final integrador (TFI) es identificar y cuantificar las zonas con un mayor potencial de re-utilización del carbón fino dentro de la Pileta N° 2. Esta pileta estuvo operativa entre los años 2000-2010, y actualmente se encuentra colmatada.

Se pretende modelar el contenido de Cenizas (en adelante Cz) y el Poder Calorífico Superior (en adelante PCS) en una de las Piletas de Lodos de la empresa YCRT en vistas de una futura re-expLOTACIÓN de estos materiales. El contenido de cenizas afecta principalmente la eficiencia de la combustión; mientras que el PCS determina cuanta energía produce un carbón al ser quemado (Speight, 2013). Se modelarán numéricamente estas dos propiedades ya que son fundamentales para evaluar un carbón con fines térmicos.

Se analizará también la distribución de los materiales depositados, con el objetivo de realizar un modelo de distribución de arcillas, carbón y estériles y su posible correlación con el modelamiento numérico. Para ello, los resultados serán sometidos a un análisis exploratorio de datos (EDA) y representados en 2D y 3D mediante sistemas de información geográfica (SIG) y softwares de modelamiento geológico. Con los resultados de este análisis, se seleccionará el método de estimación estadístico o geo-estadístico que se ajuste mejor a los datos muestreados y sobre todo a los procesos que actuaron durante su deposición.

Finalmente, se estimarán las concentraciones y volúmenes con un determinado *cut off* o ley de corte, para las variables de interés (Cz %wt y PCS Kcal/kg), y se evaluará la factibilidad de predecir una posible correlación estratigráfica en función de los procesos de sedimentación dentro de la pileta de lodos.

3. MARCO TEÓRICO SOBRE YACIMIENTO CARBONÍFERO RÍO TURBIO

3.1. Ubicación geográfica del área de estudio

El Yacimiento Carbonífero de Río Turbio, se encuentra en las proximidades de la localidad de Río Turbio, sobre la Ruta Complementaria N°20, en el Departamento de Güer Aike, al SO de la Provincia de Santa Cruz, Argentina (Fig. 2). Las principales vías de acceso, son:



Fig. 2: Ubicación y principales vías de acceso a la localidad de Río Turbio.

- **Desde Río Gallegos:** recorriendo un total de 310 Km, a través de la Ruta Provincial N° 5 hasta La Esperanza, y luego tomando la ruta Nacional N° 40 con destino a Río Turbio. Al llegar a la rotonda de Julia Dufour se dobla a la derecha, empalmando con la Ruta Complementaria N° 20.
- **Desde El Calafate:** recorriendo un total de 330 Km, a través de la Ruta Provincial N° 11 y la Nacional N° 40. Al llegar a La Esperanza, tomar el desvío hacia Río Turbio, continuando por ruta Nacional N° 40. Al llegar a la rotonda de Julia Dufour se dobla a la derecha, empalmando con la Ruta Complementaria N° 20.
- **Desde la República de Chile:** recorriendo 30 Km, desde la localidad de Puerto Natales. Se toma la ruta N° 9, luego el desvío hacia Villa Dorotea por la ruta N° 250 y se llega al complejo fronterizo Dorotea. Se ingresa a Argentina, y se llega a destino.

3.2. Empresas encargadas de la exploración y explotación del yacimiento

En el año 1936, la Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF) decidió realizar una exploración geológica en la parte austral de Santa Cruz para dar apoyo a la búsqueda de petróleo. Esta zona comprendía la región de Río Turbio, la cual cobró relevancia desde la óptica de los afloramientos de mantos de carbón descubiertos con anterioridad entre 1887 y 1892 (<http://www.y crt.gob.ar>).

Históricamente, como se documenta en la línea de tiempo de la página web oficial de la empresa YCRT, en 1943 se crea la Dirección Nacional de Energía, por Decreto N° 12648, la cual, a su vez da origen a la Dirección General de Combustibles Sólidos Minerales, encargada de la apertura e

inicio de la denominada Mina 1 en la zona sur de la provincia de Santa Cruz (actual Centro Invernal Valdelén, pista de esquí de Río Turbio).

En 1947 se hace la apertura de Mina 2 con un promedio de extracción de 80 toneladas diarias, mediante explotación manual. Para 1950 se abre Mina 3 con el objeto de explotar el manto carbonífero Dorotea, también se inaugura una planta depuradora y se da inicio a la construcción del ramal ferroviario que uniría las localidades de Río turbio y Río Gallegos (<http://www.yCRT.gob.ar/linea-de-tiempo/>).

En 1958 se crea Yacimientos Carboníferos Fiscales (YCF) mediante decreto presidencial N° 3.686, sustituyendo a Combustibles Sólidos Minerales. En 1977 YCF logra un record de producción de 1.450.000 toneladas de carbón bruto y 750.000 toneladas de carbón depurado. Hasta 1980 se trajeron un total de 3.500.000 toneladas de carbón mineral bruto.

En 1994 el ejecutivo nacional privatiza YCF, que pasa a denominarse Yacimientos Carboníferos Río Turbio Sociedad Anónima (YCRT S.A.); y en 2002 se re-estatiza, anulando la concesión mediante Decreto 1034/02 por parte del gobierno nacional, adoptando la figura de intervención y denominando YCRT a la empresa.

La empresa YCRT actualmente es un complejo carbonífero que se dedica a la explotación, extracción, procesamiento y comercialización de carbón. Asimismo, produce energía para el consumo de diversas áreas del yacimiento a través de una Usina de 21 Mw, y se espera la comercialización de energía una vez finalizada la Usina de 240 Mw. Desde octubre de 2018 la explotación se lleva a cabo de forma continua (<http://www.yCRT.gob.ar>) y sus principales áreas operativas (Fig. 3) son:

- Mina: se encuentra actualmente en explotación la denominada Mina 5, con extracción de carbón mediante el sistema de “frente largo, en retroceso, con derrumbe de techo controlado”.
- Planta Depuradora: sitio donde se prepara el carbón, para lograr los requerimientos comerciales demandados.
- Complejo Ferro - Portuario: a través del tren se lleva el carbón hacia la localidad de Río Gallegos, para ser embarcado en el Puerto de Punta Loyola y de allí ser enviado a los distintos clientes.
- Talleres Centrales: en ésta área se realizan todas las tareas relacionadas con el transporte de personal, maquinarias viales utilizadas, pañoles, obras civiles, entre otras.

Los principales usos comerciales que ha tenido el carbón de YCRT a lo largo de su historia de producción han sido:

- Carbón bruto (molido): calefacción de hogares y viviendas familiares carenciadas y sin acceso a gas en la Cuenca Carbonífera (Río Turbio-Julia Dufour-28 de Noviembre) y en la provincia de Santa Cruz.
- Carbón depurado grueso: para generación de electricidad en la Usina de 21Mw (grueso molido), y también para calefacción.
- Carbón depurado fino: con fines térmicos para la industria del cemento (hornos de caleras, de cementeras), para la fabricación de moldes de fundición. Sin embargo, la principal utilización ha sido para generación de energía eléctrica, siendo la Central Térmica de San Nicolás (CTSN) el principal destino.



Fig. 3: Ubicación de las principales áreas operativas de Yacimiento Carbonífero Río Turbio (YCRT).

Actualmente, otro de los usos del carbón depurado fino es para *blending* con carbones bituminosos de alto contenido en azufre, para la generación de energía. Su rango de Sub-Bituminoso A, a Bituminoso Alto en Volátiles C, sumado a su bajo contenido en azufre (<http://www.y crt.gob.ar>), lo colocan en buena posición para estos fines. Según el inventario mundial de calidad del carbón (Brooks *et al.* 2006) Argentina está en el top 40 del ranking mundial de reservas de carbón, con un puesto 34 según los informes de Agramonte y Díaz (1983) y en el puesto 39 según EIA (2005).

3.3. Marco geológico regional y local

Los recursos carboníferos de Argentina se hallan distribuidos en secuencias sedimentarias de edad Carbonífero-Pérmino, Triásico, Jurásico y Eoceno-Oligoceno-Mioceno (Castro y Alfaro, 2011). Las principales manifestaciones y reservas de carbón en Argentina (Fig. 4) se encuentran en la Cuenca Carbonífera de Río Turbio, las cuales fueron explotadas desde la década del 40 (Malumián *et al.* 2000). Históricamente Río turbio y Pico Quemado han sido los yacimientos más importantes de Argentina (Borrello, 1956 en Brooks *et al.* 2006).

El Yacimiento Río Turbio, se encuentra en el borde SO de la Cuenca Austral, en la denominada Cuenca Carbonífera de Río Turbio, de edad Terciaria. En la Fig. 5 se puede visualizar la geología regional del área de estudio, comprendida principalmente por sedimentitas paleógenas epiclásticas marinas y parálicas. Según Malumián *et al.* 2000 en la hoja geológica 5172-III Yacimiento Río Turbio, se hace referencia al Tte. de Navío Agustín del Castillo como el descubridor del carbón en esta zona. En su viaje realizado en el año 1887, en la zona de Cancha Carrera, 40 Km al norte de la localidad de Río Turbio, descubre los afloramientos carbonosos.

Desde ese momento, numerosos trabajos geológicos (Hünicken, 1955; Santos García, 1988; Azcuy y Amigo, 1991) y paleontológicos (Berry, 1937; Archangelski, 1969; Romero, 1977; Malumián y Caramarés, 1997, Estebeenet *et al.*, 2012; entre otros) fueron realizados en el área de Río Turbio desde la década del 30.

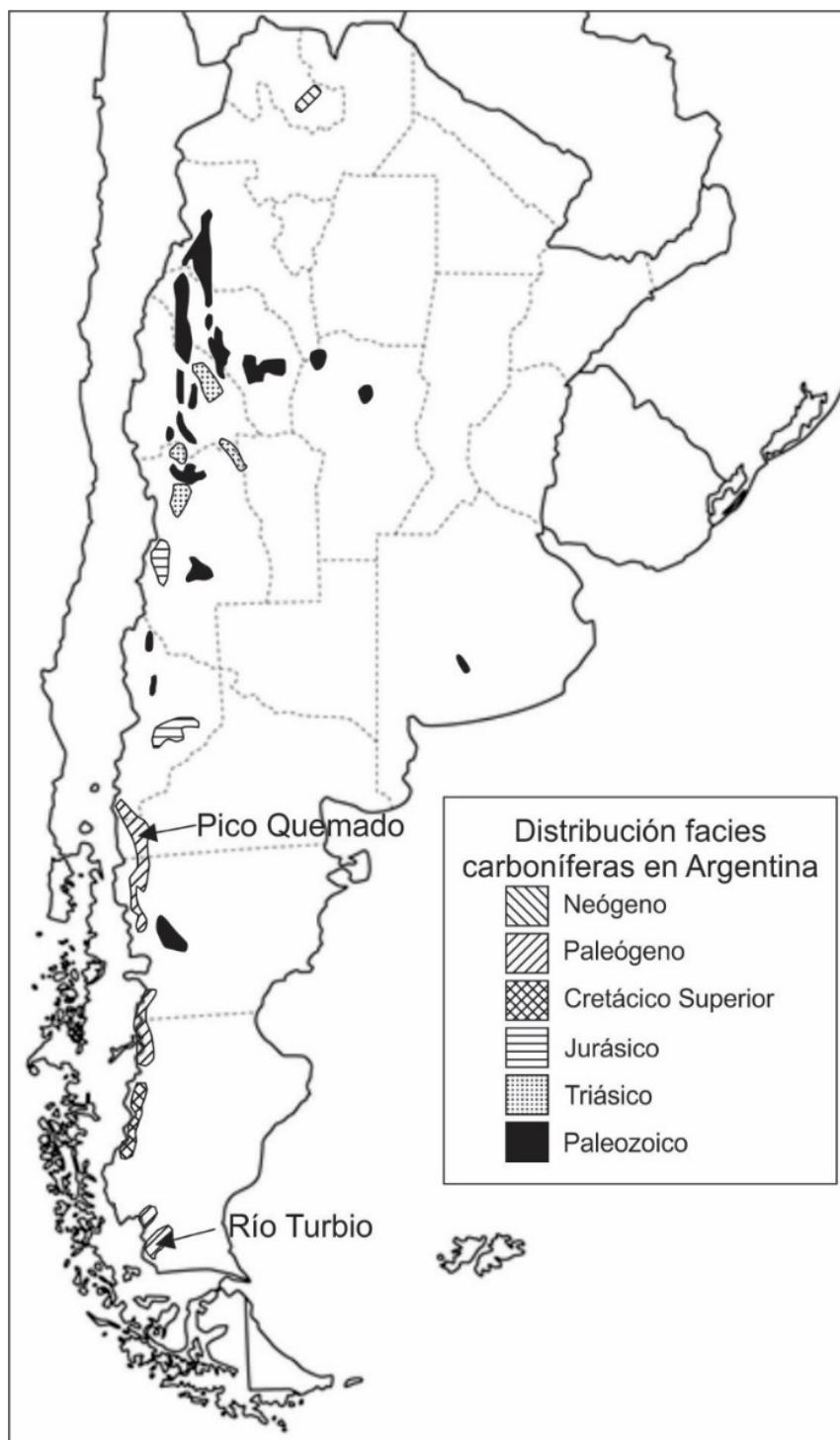


Fig. 4: Distribución de facies carboníferas en Argentina. Tomado y modificado de Borrello (1956) en Brooks *et al.* 2006.

3.3.1. Geología del Yacimiento Río Turbio

El campo carbonífero en el área de Río Turbio (Fig. 6), ocupa una extensión N-S de aproximadamente 47 Km y un ancho entre 2 y 7 Km (Santos García, 1988). Trabajos exploratorios de las secuencias carboníferas en la Mina y en áreas cercanas al Yacimiento, fueron llevados adelante por Angelelli (1941), Bergmann (1950, 1959), Carrizo (1977), Danfender (1982) entre otros. Sin embargo, la investigación más importante desde el punto de vista técnico-económico

de los recursos de carbón del Yacimiento fue desarrollado por la empresa ENADIMSA (1987), que incluyó además de la caracterización geológica (estratigrafía, estructura) de la mina, recomendaciones en cuanto a métodos de explotación, servicios de mina (ventilación, electromecánica, transporte, etc.) estimación de recursos, reservas y comercialización.

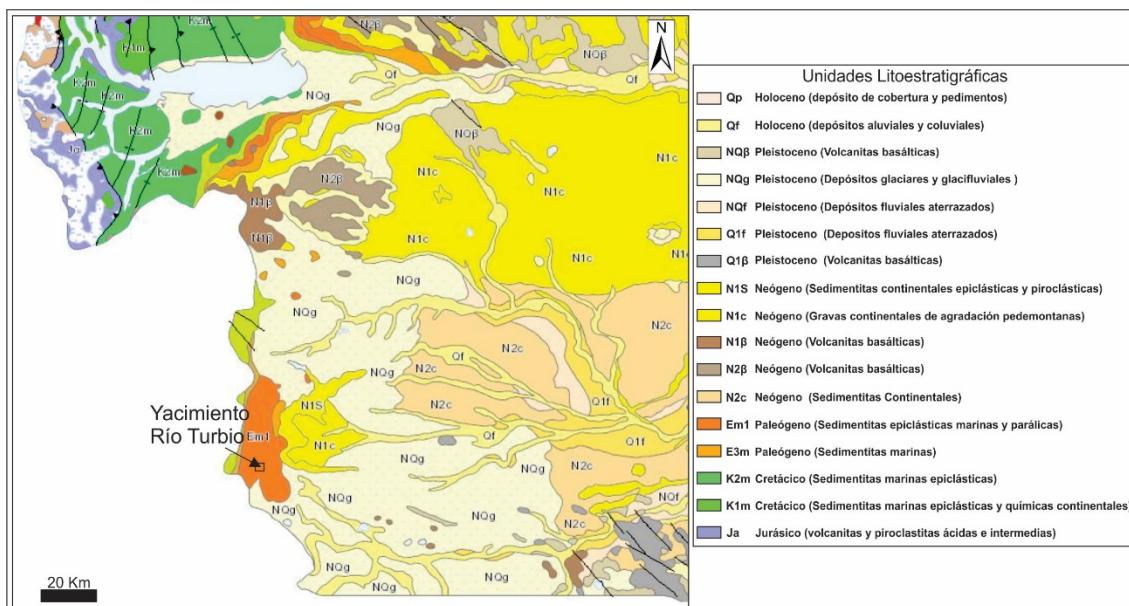


Fig. 5: Mapa geológico a escala regional donde se indica el área del Yacimiento. Tomado y modificado de SEGEMAR 2019 (<https://sigam.segemar.gov.ar/visor/>)

Las rocas más antiguas en la zona del yacimiento son de origen marino y corresponden a las areniscas y conglomerados con intercalaciones de coquinas de la Formación Cerro Dorotea. Esta formación es asignada al Paleoceno (Daniano) según Malumián y Caramarés (1997). En el área de la Mina, las perforaciones no han alcanzado su base. Sin embargo, hacia el W (límite con Chile) aflora la formación que la infrayace (Formación Monte Chico) y es en esta zona donde la Formación Cerro Dorotea alcanza un espesor de aproximadamente 500 m según Furqué y Caballé (1993). En la Fig. 7 y Fig. 8 se representa la geología de detalle de las secuencias descriptas mediante un mapa y un perfil litoestratigráfico.

En discordancia, se depositan las sedimentitas de la Formación Río Turbio, portadora de los principales mantos carbonosos. Está constituida por arenas finas a gruesas, asociadas con niveles de conglomerados finos, pelitas y coquinas. Son depósitos terrestres y marino costeros alternantes, caracterizados por abundantes restos vegetales y mega y microfauna (Malumián *et al.* 2000). La potencia de la secuencia asignada por Romero (1977) y ENADIMSA (1987) es de 600 a 650 m. Esta formación ha sido dividida en dos secciones (Inferior y Superior) por varios autores, tales como Cuerda (1950), Hünicken (1955) y Archangelsky (1969). Sin embargo, ENADIMSA (1987) realizó una subdivisión en tres tramos (Inferior, Intermedio y Superior) separados por los complejos carbonosos.

La edad de la Formación Río Turbio, ha sido asignada al Eoceno por Hünicken (1966) y Archangaeski (1969). Malumián *et al.* (2000) considera al miembro Superior como Eoceno medio superior a Eoceno superior bajo, mientras que el miembro Inferior como post-Paleoceno y pre-Eoceno medio superior.



Fig. 6 Mapa con la extensión de los mantos carboníferos y la posición del yacimiento con sus galerías principales (ENADIMSA, 1987).

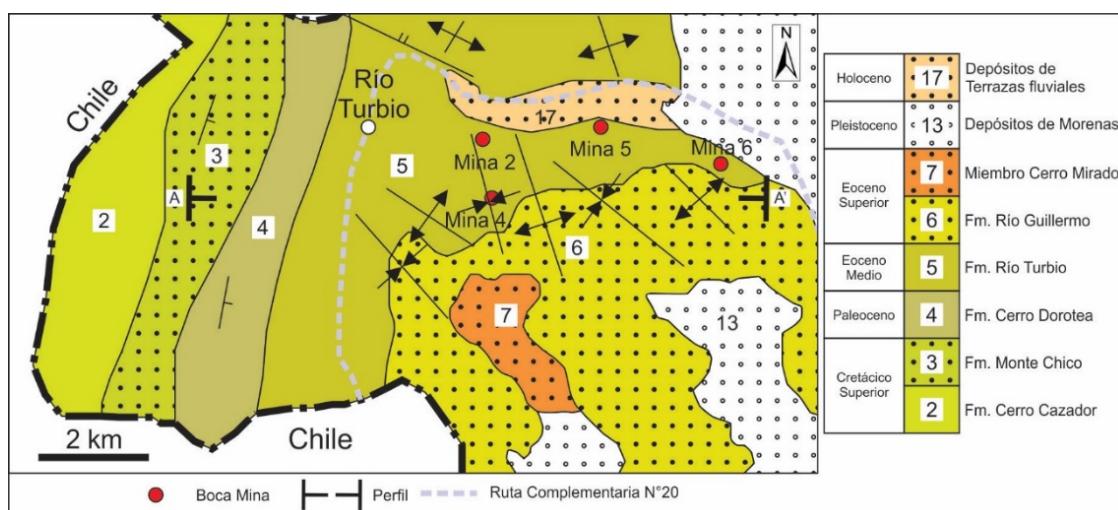


Fig. 7: Mapa geológico de detalle del área del yacimiento. Tomado y modificado de Malumián *et al.* 2000.

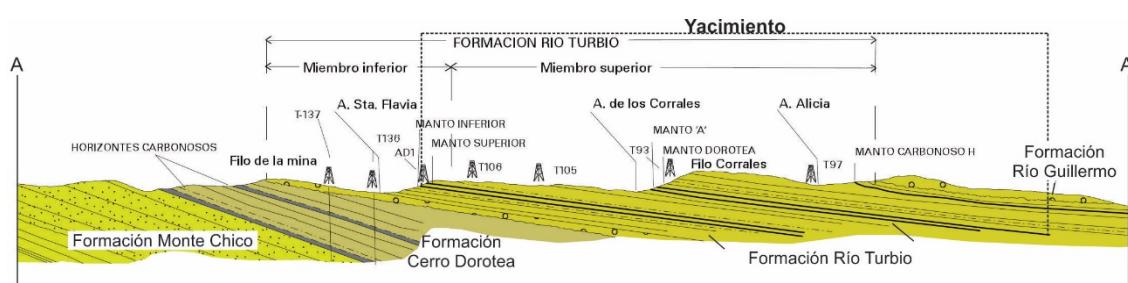


Fig. 8: Perfil, sin escala, en dirección W-E atravesando el yacimiento, indicado en el mapa como A-A'. Tomado y modificado de Malumián *et al.* (2000).

Fosdick *et al.* (2015) realizaron dataciones radiométricas sobre circones detríticos posicionando al miembro Inferior en el Eoceno Inferior (47-46 Ma), mientras que el miembro Superior se deposita durante la transición Eoceno-Oligoceno 33-34 Ma y continúa hasta ≤ 26 Ma.

Mediante una discordancia erosiva de importancia, la Formación Río Turbio es cubierta por las psefitas, psamitas y escasas pelitas con niveles carbonosos de la Formación Río Guillermo. Su ambiente de deposición es fluvial de alta energía y corresponde al Eoceno Cuspidal (Malumián *et al.* 2000). Fosdick *et al.* (2015) le han asignado una edad $\leq 23,5$ Ma (transición Oligoceno-Mioceno). Esta formación marca el inicio de la continentalización de la cuenca en el área. Su potencia alcanza los 150 m según perforaciones de ENADIMSA (1987).

En contacto discordante con la Fm. Río Guillermo se halla la Formación Río Leona, siendo interpretados los conglomerados del Cerro Mirador como su miembro basal (Malumián *et al.* 2000). ENADIMSA (1987) ha utilizado el término “conglomerados Cerro Mirador” para diferenciar los conglomerados aflorantes en el cerro homónimo ubicado en la zona más alta del yacimiento. El espesor en base a perforaciones alcanza los 68 m.

En la zona de la mina, la secuencia sedimentaria descripta previamente es de tipo homoclinal con rumbo NNE-SSW e inclinación hacia el SE. La misma va disminuyendo de NW a SE, pasando de 20° a 2-8° (ENADIMSA, 1987 y Malumián *et al.* 2000). Afectando localmente a la secuencia que contiene los mantos productivos de carbón, existen algunas fracturas poco significativas, flexuras y pequeños pliegues secundarios.

3.3.2. Complejos Carbonosos en el Yacimiento

Los mantos carbonosos en la zona de la mina fueron muy bien definidos por ENADIMSA (1987). El Informe Técnico llevado adelante por esta empresa, entre 1983 y 1987, comprendió estudios geológicos, sedimentológicos, petrológicos, paleontológicos, palinológicos y geofísicos realizados sobre más de 20.000 metros de perforación. Sobre la base de esta información se resumen las características más importantes de las secuencias carbonosas (Fig. 9):

- Los principales mantos de carbón, desde el punto de vista productivo, se encuentran en la Formación Río Turbio y están distribuidos en dos complejos carbonosos, separados entre sí por el Tramo Intermedio de la Formación Río Turbio, cuyo espesor promedio es de 200 m.
- El Complejo Carbonoso Inferior (CCI) tiene un espesor promedio de 30 m y contiene dos mantos de carbón. El primero denominado Manto Inferior, definido como carbón arcilloso, posee más de 3 m de potencia. Separado por 10-12 m de areniscas y arcilitas, se encuentra el segundo, denominado Manto Superior con más de 2 m de espesor.

- El Complejo Carbonoso Superior (CCS) tiene un espesor promedio de 55 m, y en su máxima expresión posee 8 mantos carbonosos, destacándose por su potencia, continuidad y propiedades físico-químicas, los mantos Dorotea y manto A.
- Los principales mantos productivos en la historia del yacimiento han sido el Manto Superior, el manto Dorotea y el manto A. Estos son clasificados en base a su rango, según la norma ASTM D388, como Sub-bituminoso A, a Bituminoso Alto en Volátiles C.

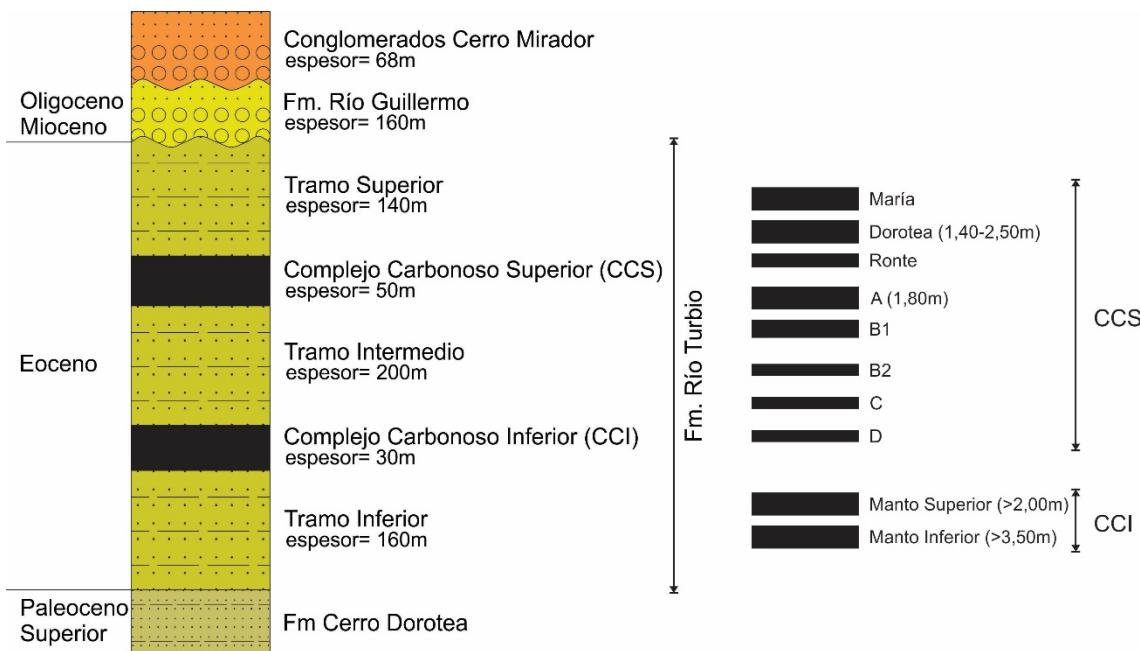


Fig. 9: Columna estratigráfica simplificada (sin escala) tomada y modificada de ENADIMSA (1987). Se representan las formaciones reconocidas en la mina y un detalle de los complejos carbonosos.

La composición petrológica en %wt del manto Dorotea según Bergmann (1993) corresponde a vitrita (15,34%), clarita (55,59%), fusita (3,76%), esquistos carbonosos (22,58%) e inertes (2,71%). Los macerales identificados han sido vitrinita, fusinita, esclerotina y micrinita. El litotipo dominante es el clareno, con menor proporción de vitreno.

4. EL CARBÓN

4.1. Características técnicas

A continuación, se desarrollan los principales conceptos relacionados al carbón, sus propiedades químicas y combustibles, como así también las normas que regulan los ensayos para su determinación; con especial énfasis en las variables utilizadas en los procesos de modelamiento de éste trabajo, y que corresponden al contenido de cenizas (Cz) expresado en %wt y Poder Calorífico Superior (PCS) expresado en Kcal/kg.

El carbón ha sido definido por varios autores, pudiéndose encontrar definiciones de índole más bien químicas y otras geológicas. A continuación, se consideran dos ejemplos de esta afirmación:

- Desde una óptica geológica es una roca sedimentaria organógena, formada por la acumulación de restos vegetales en un ambiente especializado de deposición. Estos restos posteriormente son afectados por procesos sin-sedimentarios y post-sedimentarios para producir carbones de distinto rango y grado de complejidad estructural (Thomas, 2013).
- Una visión más química plantea Speight (2013) definiéndolo como una roca organógena con un contenido variable de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre, así como también contenidos trazas de otros elementos incluyendo materia mineral.

Los constituyentes de cualquier carbón pueden ser divididos en “macerales”, el equivalente orgánico de los minerales, y “materia mineral”, la parte inorgánica formada por una variedad de minerales primarios y secundarios (Thomas, 2013).

Las principales características de un carbón son su espesor, continuidad lateral, contenido de macerales (*type*), contenido de materia mineral (*grado o grade*) y su rango (*rank*). Salvo el rango, que está determinado por procesos diagenéticos y tectónicos, el resto están asociados con factores que actuaron en el ambiente de formación de la turba (McCabe y Parrish, 1992).

El rango (*rank*), contenido de macerales (*type*) y contenido de material mineral (*grade*) son los principales factores que influyen en las propiedades físicas y químicas específicas.

Es por ello que, desde el punto de vista comercial, el valor de un depósito de carbón no está determinado únicamente por su cantidad (tonelaje), siendo la calidad un factor más importante (propiedades específicas). La relación entre éstas es la que determinará cómo se minará, beneficiará y cuál será su uso final (Miller, 2013).

Teniendo en cuenta que existen distintos ambientes de formación de turbas, tanto geológicos como ecológicos, y que su espesor al momento de depositación, es probablemente entre ocho a diez veces el espesor del carbón actual (Diessel, 1992) es que existe tanta heterogeneidad no sólo entre carbones de un mismo rango y de distintas localidades, sino que también entre el techo y piso de un mismo manto.

Por este motivo y para poder comparar la calidad de carbones de diferentes partes del mundo se han creado normas (estándares) que proveen las reglas, guías y procedimientos para la obtención de resultados y caracterización de los carbones. Ejemplos de estas Normas son los estándares ISO (*International Organization for Standardization*), ASTM (*American Society for Testing and Materials*), BS (*British Standards*) o AS (*Australian Standards*).

4.1.1. Análisis de carbón

El laboratorio de YCRT trabaja bajo normas ASTM, por este motivo las definiciones, procedimientos y formas de reportar los resultados en el presente trabajo se refieran a ellas. A su vez, en este trabajo, el lenguaje técnico en inglés es necesario, ya que estas normas son internacionales y en muchas ocasiones hay parámetros que no tienen traducción, a pesar de que se hace el esfuerzo de convertirlos a español sin alterar su significado.

El análisis de carbón (*coal analysis*) permite determinar las propiedades específicas, y es la base para la evaluación de los carbones en términos de uso, implicaciones ambientales y valor económico (Speight, 2015). Generalmente incluye tres categorías: análisis próximo (*proximate analysis*), análisis último (*ultimate analysis*) y análisis varios (*miscellaneous analysis*).

Las propiedades químicas del carbón son evaluadas por los resultados obtenidos del análisis próximo (*proximate analysis*) y último (*ultimate analysis*). Éstos son extremadamente dependientes del procedimiento utilizado, por lo que diferentes resultados son obtenidos usando distintos rangos de tiempo y temperatura en los ensayos.

El análisis próximo (*proximate*), “primero” o “inmediato”, es el ensayo por el cual se determina la humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo (los procedimientos para estas determinaciones están descriptas en las normas ASTM D3172 a D3175) y de éste surgen los resultados para la caracterización (rango o *rank*) y utilización del carbón.

El análisis último (*ultimate*) involucra la determinación del porcentaje en peso de carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno (Fig. 10).

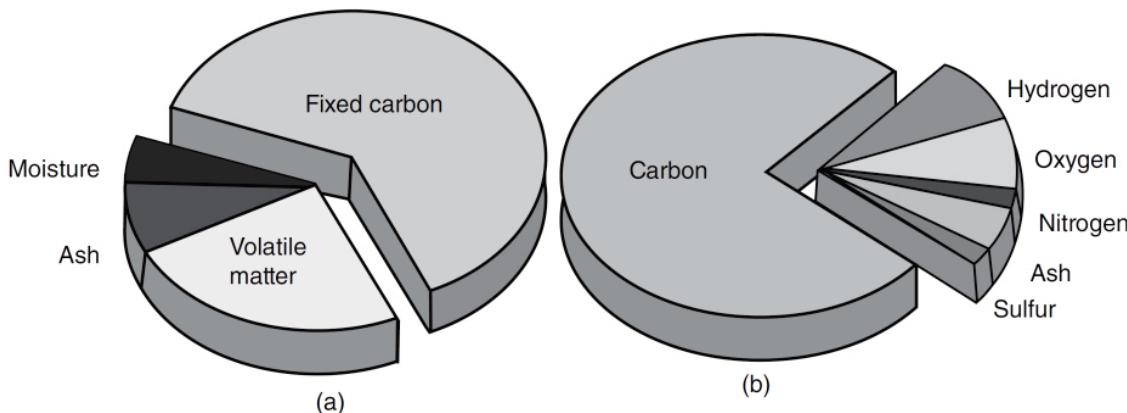


Fig. 10: Comparación entre resultados obtenidos por análisis próximo (a) y análisis último (b). Tomado de Speight (2015).

El *miscellaneous analysis* es una categoría que incluyen varios tipos de pruebas físicas y químicas como ser la determinación del Poder Calorífico (PC), Moliendabilidad, Índice de Hinchamiento Libre (FSI), fusibilidad de la ceniza, análisis de elementos trazas, entre otros.

El análisis de carbón (coal analysis) de una muestra del manto Dorotea, tomada en canaleta del FL51D (FL=Frente Largo) cuya coordenada es 51°32.388'S / 072°15.754'O, y analizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) se presenta en la Tabla 1 a modo de ejemplo.

Habiéndose definido el análisis de carbón, es importante destacar que existen varias formas de expresar los resultados obtenidos (ASTM D3180; ISO 1170), por lo que previo a la evaluación y comparación de los mismos, ésta forma de expresión debe ser conocida y se la denomina base o *basis*, la cual está asociada a la presencia de humedad y cenizas en la muestra.

4.1.2. Definición de Ceniza y Poder Calorífico Superior

En función del análisis de carbón explicado anteriormente, es necesario definir los parámetros o propiedades que serán utilizados en el modelamiento de la Pileta de Lodos, tal como fueron planteados en los objetivos de este trabajo. Los dos parámetros principales corresponden a:

- Ceniza (porcentaje en peso -%wt-): residuo inorgánico no combustible luego de la ignición del carbón. Se determina pesando el residuo remanente luego de la combustión bajo condiciones estrictamente controladas de peso de la muestra, temperatura,

tiempo, atmósfera y especificaciones de equipamiento. Se determina con el análisis próximo y los procedimientos se encuentran en ASTM D3174.

- Poder Calorífico Superior (*gross calorific value, gross heat of combustion at constant volume*): es el calor producido por la combustión de una unidad de masa de combustible sólido o líquido cuando es quemado a volumen constante en una bomba calorimétrica en presencia de oxígeno, bajo condiciones específicas, con el agua resultante condensada a líquido. Se expresa en J/g, Btu/lb, cal/g (ASTM D121). Forma parte de los análisis varios o puede incluirse en el “análisis próximo completo” y los procedimientos se encuentran en la norma ASTM D5865.

Tabla 1: Análisis de carbón tomado de Brooks y Willet (2004): ar=*as received*; d=*dry* y daf=*dry ash free*.

Análisis Próximo (%wt)	ar	d	daf	Formas de Azufre (%wt)	ar	d	daf
Humedad	7,65			Sulfato	0,01	0,01	0,01
Ceniza	12,05	13,05		Pirítico	0,77	0,83	0,95
Materia Volátil	42,37	45,87	52,76	Orgánico	0,82	0,89	1,03
Carbono Fijo	37,93	41,08	47,24				
	ar	d	daf				
Poder Calorífico (Kcal/Kg)	6442	6975	8022				
Análisis Último (%wt)	ar	d	daf				
Hidrógeno	6	5,57	6,41				
Carbono	63,25	68,48	78,76				
Nitrógeno	1,06	1,15	1,32				
Azufre	1,6	1,73	1,99				
Oxígeno	16,0	10,02	11,52				
Fusibilidad de la Ceniza (atmósfera reducida)	T(°C)						
Inicial (I)	1143						
Reblandecimiento (S)	1215						
Hemisferio (H)	1287						
Fluidez (F)	1332						
FSI (Índice de Hinchamiento Libre)	2						

Se modelarán estas dos propiedades, fundamentales para evaluar un carbón con fines térmicos debido a que la ceniza afecta la eficiencia de la combustión (diluyendo el PCS), la recuperación de emisiones particuladas y la disposición final; mientras que el PCS determinará cuanta energía será generada en una central térmica cuando el carbón sea quemado. Para el presente trabajo el contenido de Cz (%wt) y el PCS (Kcal/kg) han sido referidos a base seca (s/s) o *dry basis (d)*, es decir que estas propiedades han sido calculadas sobre una base teórica de no humedad asociada a la muestra (ASTM D3180).

4.2. Métodos de explotación del carbón en YCRT

El Yacimiento a lo largo de su historia, ha sido explotado fundamentalmente mediante labores subterráneas con el método de “cámaras y pilares” en sus inicios, para luego pasar al de “frentes largos”. No obstante, vale la pena destacar que a fines de la década del ‘90 se ha desarrollado una explotación a cielo abierto de los mantos Superior e Inferior, que duró aproximadamente dos años y que fue finalmente abandonada por la baja calidad del material extraído (Caballero, 2014). En la Fig. 11 se puede visualizar el desarrollo de las distintas labores que han existido en el yacimiento, siendo Mina 5 la que actualmente se encuentra operativa.

Inicialmente el método de extracción del carbón en YCRT fue del tipo “cámaras y pilares”, con el que se explotó el Manto Superior en las labores de Mina 1 y Mina 2 hasta 1958.

Posteriormente el tipo adoptado fue el de “frentes largos en retroceso” con el que se extrajo carbón del manto Dorotea y manto A. En Mina 3 y Mina 4 se explotaron ambos mantos, mientras que en Mina 5 hasta la fecha solo se puso en producción el manto Dorotea.

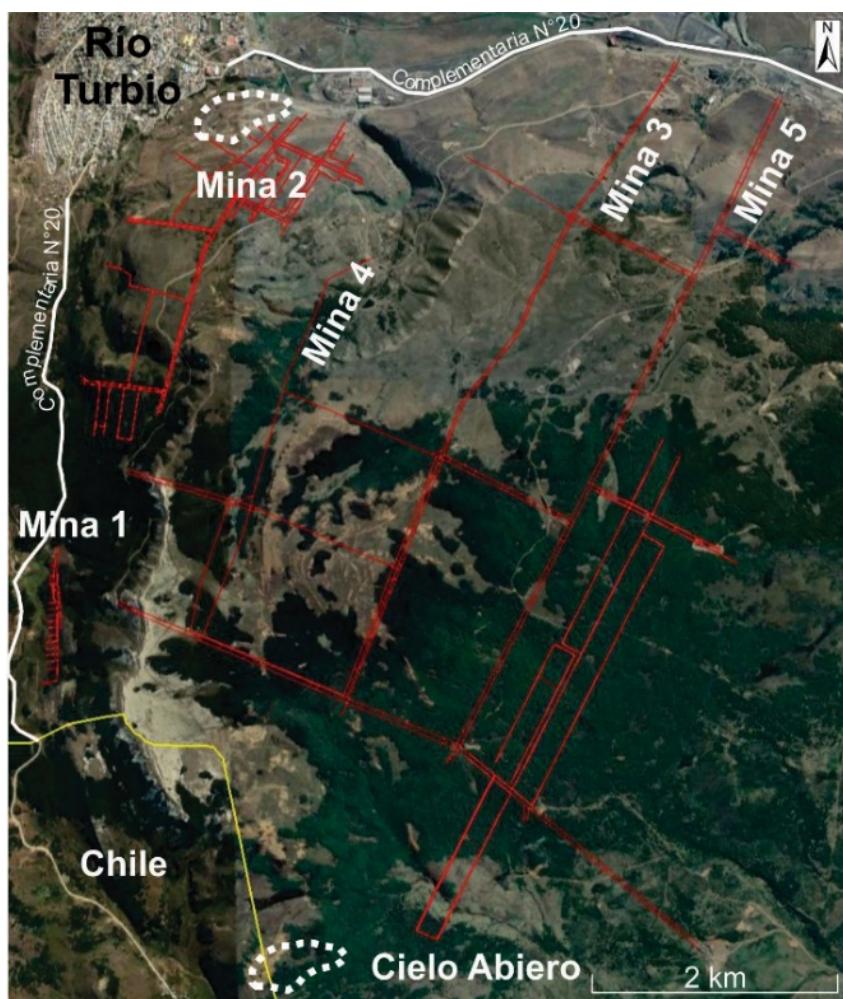


Fig. 11: Distribución en planta de las galerías principales y de ventilación de las minas subterráneas desarrolladas en el Yacimiento. Se indica además la zona donde se generó la explotación a cielo abierto.

El método de frente largos, *longwall* por su terminología en inglés, es uno de los principales sistemas de explotación subterráneo de carbón utilizado en Europa, China y Japón, mientras que en USA el más utilizado es el de cámaras y pilares, *room and pillar* (EIA, 2019).

El área planificada a ser minada es dividida en paneles elongados (rectangulares) a los que se ingresa desde las galerías de acceso. El minado consiste en la extracción del carbón de un único lado (frente o *face*) que corresponde al ancho del panel. La longitud y el ancho de los paneles dependen de condiciones geológicas y capacidades de transporte, ventilación y potencia de equipos que pueden ser instalados. En USA, el ancho del panel es generalmente de 120-293 m, mientras que UK de 200-250 m, con un largo de 600 a 4000 m (Thomas, 2013). Se recomienda para mantos horizontales, potentes y uniformes (EIA, 2019).

La extracción mediante frentes largos puede realizarse “en avance” o “en retroceso” (Fig. 12). En el primero, la explotación se inicia desde la galería de acceso y el frente se desplaza

alejándose de ésta hasta alcanzar la longitud planificada. “En retroceso” se desarrollan dos galerías en paralelo hasta la longitud planificada para finalmente ser unidas, y desde allí iniciar la explotación en dirección hacia la galería de acceso (Lien, 2013).

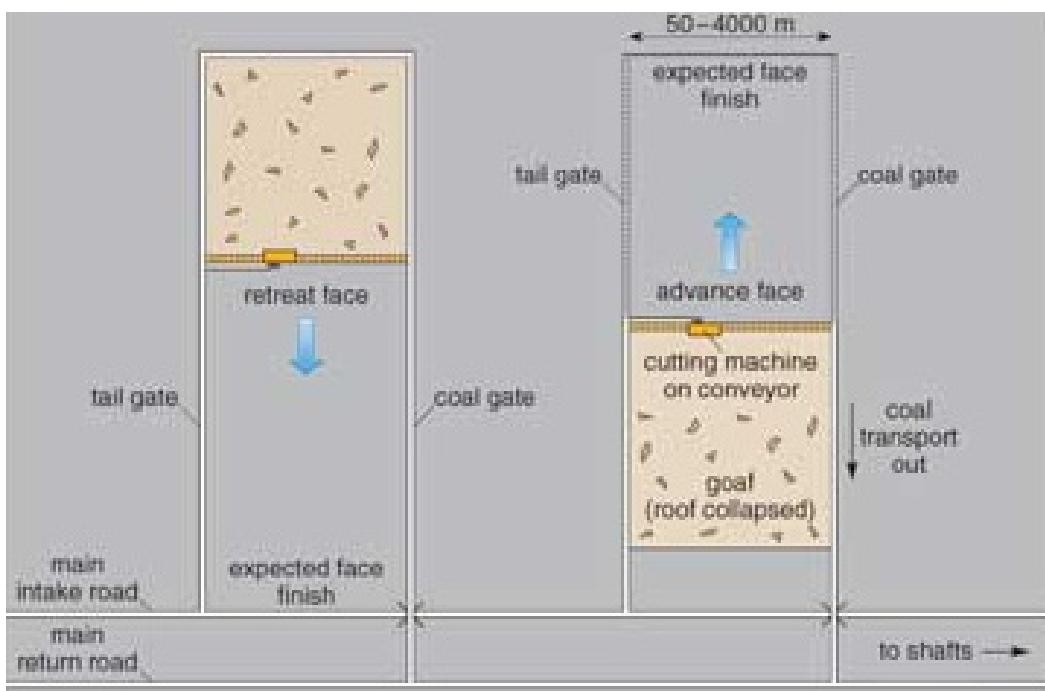


Fig. 12: Vista en planta de frentes largos en retroceso (*retreat face*) y en avance (*advance face*). Tomado de *The Open University* (2019).

La explotación “en avance” y “en retroceso” tiene sus ventajas y desventajas. El segundo según Thomas (2013), es el método más utilizado y tiene como ventajas que el derrumbe del techo va avanzando hacia la galería de acceso (brinda más seguridad); el movimiento de equipos una vez finalizada la explotación del panel es más simple; la construcción de las galerías que limitan el panel permiten explorar y prever cambios geológicos no detectados en las etapas de exploración que pueden generar problemas al momento del minado. Una de las desventajas es el tiempo de preparación del frente (cercano a un año), período en el cual no hay plena producción. Un frente de explotación consta de tres sistemas (Fig. 13):

- Corte: mediante rozadora o cepillo.
- Transporte: cadena blindada que transporta el carbón a lo largo del frente hacia la cinta de evacuación.
- Soporte: mediante sostenimiento hidráulico auto-desplazable, brinda seguridad al frente de explotación, y a medida que este avanza, el techo va colapsando por detrás. A este material se lo denomina derrumbe (en inglés *goaf*).

La implementación de frentes largos en YCRT se sustentó en las características geológicas que presentan los mantos carbonosos y en las mejoras técnicas que éste método proporciona. Las primeras se basan en la continuidad lateral del manto, ya que no se registran fallas, pliegues ni lentes de estériles, además de su baja inclinación (<10°). Las ventajas al momento del minado permiten la extracción continua y mecanizada, aumentar la recuperación (80% frente al 60% de cámaras y pilares) y aumentar la seguridad en el frente de explotación por el auto-sostenimiento

hidráulico del techo. La extracción por frentes largos en YCRT se realiza mediante paños/paneles (Fig. 14A) cuya dimensión estándar, en la actualidad, es de 1200-1400 m de largo por 180 m de ancho, con un espesor de carbón variable entre 1,60 a 2,00 m. De este modo, un paño permite liberar reservas por 450.000–600.000 t aproximadamente. Cada paño está separado del siguiente por un pilar de carbón de 30 m.



Fig. 13: Sistemas que componen el frente de explotación: Soporte (*roof support*), corte (*shearer*) y transporte (*main AFC*). Tomado de Caterpillar (2014).

Las galerías secundarias (aquellas desarrolladas en carbón) que componen el panel de explotación se construyen en paralelo y de manera simultánea siguiendo el rumbo del manto, para finalmente ser unidas a través de una labor perpendicular denominada “apertura”, dirección de máxima inclinación del manto, donde se instala el frente de explotación (Fig. 14B y Fig. 14C).

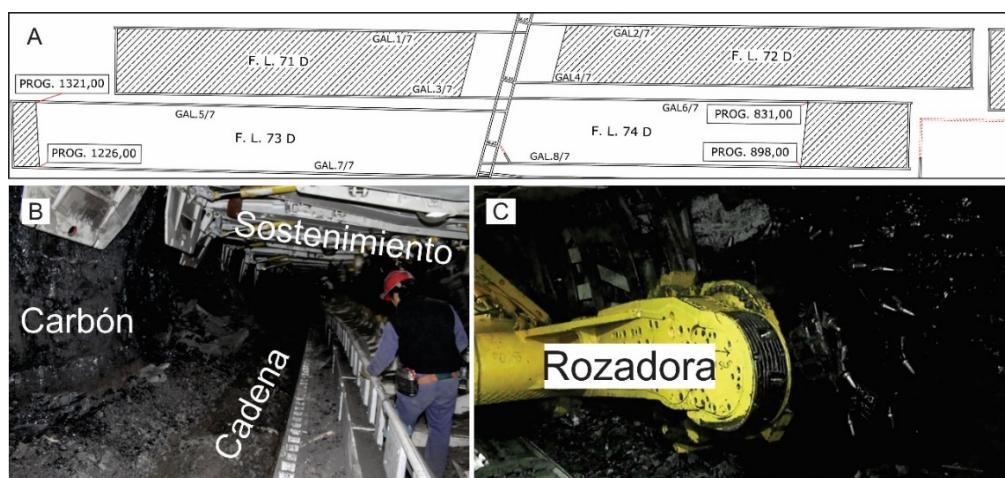


Fig. 14: A) Plano esquemático de algunos paneles de explotación (FL= frente largo) correspondientes a la zona del Chiflón 7 de Mina 5. B) Puede verse el manto de carbón, el equipo de sostenimiento y las cadenas blindadas de evacuación del material minado. En C) se ve el equipo de corte del carbón (rozadora).

4.3. El Proceso de depuración del carbón en YCRT

En este apartado se describe el proceso de beneficio del carbón en YCRT, desde el ingreso del material bruto a la planta depuradora hasta la obtención del carbón depurado, para poder comprender y conocer la naturaleza de los materiales depositados en las Piletas de Lodos.

El beneficio, limpieza, lavado o preparación del carbón, es el proceso por el cual las impurezas inorgánicas son separadas del carbón bruto de mina, produciendo así una mejora en las características combustibles (Robl *et al.* 2017). Los procesos de separación se basan principalmente en aprovechar los contrastes de densidad entre los componentes orgánicos (p ej. el carbón, $<1,5 \text{ g/cm}^3$) e inorgánicos (p ej. arcilita $2,5 \text{ g/cm}^3$). Los diseños estándares de plantas dividen al carbón bruto de mina en distintas fracciones granulométricas y utilizan diferentes procesos de separación para cada una de estas fracciones (Galvin y Iveson, 2013) tal como se observa en la Fig. 15.

El beneficio del carbón en YCRT (lavado y limpieza) se lleva a cabo en la Planta Depuradora Ingeniero J. A. Bacigalupo bajo el principio de separación por medio denso. Para ello, se prepara un medio con magnetita finamente molida y agua, con una densidad tal que el carbón flote y el estéril se hunda. El carbón del yacimiento posee una densidad $<1,5 \text{ g/cm}^3$, mientras que el estéril que corresponde a arenas y limo-arcilitas, tiene una densidad $>2,4 \text{ g/cm}^3$. Según el esquema mostrado en la Fig. 15, la planta de YCRT está preparada para separar carbón de granulometría gruesa e intermedia.

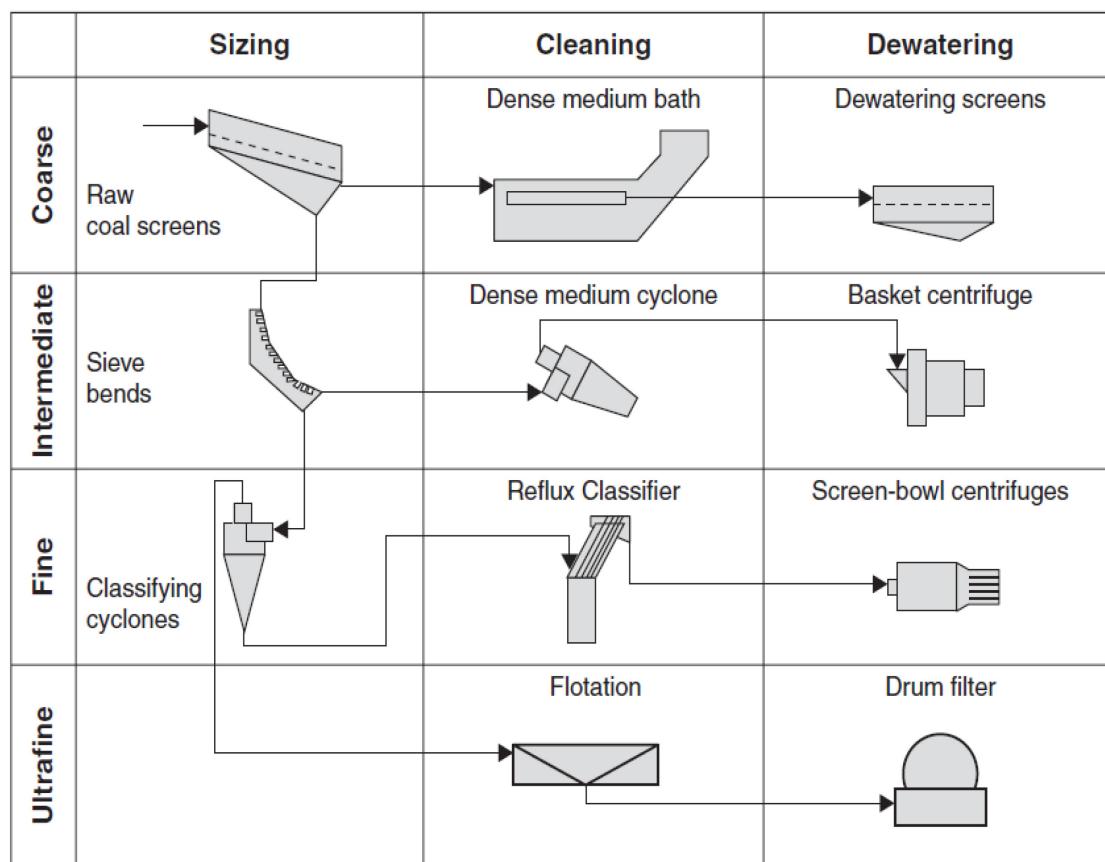


Fig. 15: Esquema de plantas de beneficio con cuatro circuitos paralelos para diferentes granulometrías de alimentación. (Fuente: Galvin e Iveson, 2013 y Rob *et al.* 2017).

La Planta Depuradora, fue inaugurada en el año 1959, con un diseño desarrollado por la empresa SKODA (Checoslovaquia), y luego modernizada a partir de fines de 1983 por la empresa KOPEX (Polonia). Esta última modificación incorporó el sistema ciclónico para depuración de finos y el equipo DISA (marca comercial del equipo *Drewboy*) para tratamiento de carbón grueso, que son los sistemas que hasta hoy mantiene la planta.

A continuación, se realiza una breve descripción de las principales características del circuito de depuración de la Planta Ing. José Bacigalupo, que puede verse en Fig. 16, acompañado con fotografías representativas del proceso.

- La planta es alimentada por carbón extraído del yacimiento por el método de explotación de “frentes largos en retroceso con derrumbe de techo controlado”. Al llegar a la tolva de alimentación de la planta, el carbón ingresa con el estéril inherente (el contenido en el manto de carbón) y el adquirido por el mecanismo de explotación, que puede incorporar techo (arenisca) y piso (arcilita-limolita) del manto. El carbón bruto es pre-clasificado por granulometría, de manera que al circuito de beneficio ingresa con un tamaño <150 mm.
- La zaranda N°17 (Fig. 17), zaranda vibratoria horizontal de malla cuadrada (*desliming screen*), marca el inicio del camino de los dos circuitos principales, el circuito de gruesos (>20 mm) y el de finos (<20 mm). El material retenido va al primero, mientras que el pasante al segundo. En esta zaranda, se produce el deslamado del carbón bruto, para que el material fino que pudiera contener no interfiera con la viscosidad del medio denso.
- El medio denso es preparado con la adición de magnetita en dos granulometrías diferentes (40 µm y 60 µm) para lograr la densidad necesaria para la separación de carbón del estéril. Estas fracciones se logran mediante el molido de la magnetita y su posterior clasificación mediante hidrociclos. De los *vortex finders*, surgen las granulometrías requeridas por el circuito de finos (60 µm) y gruesos (40 µm). Cada uno de estos consta de tres tanques con diferentes densidades, que reciben el nombre de tanque de medio diluido, de trabajo y concentrado. La magnetita clasificada es enviada al tanque de medio diluido y concentrado.
- La separación en el circuito de carbón grueso se produce mediante el uso de un baño de medio denso (*dense medium bath*), que en el caso de YCRT, es con un separador de tambor tipo *Drewboy*, llamado DISA (marca comercial), que puede verse en Fig. 18. El material que se hunde, estéril grueso, es retirado de la base del baño con una rueda giratoria, mientras que el flotado mediante una racleta de goma. El estéril, que luego es retenido en la zaranda N°203, zaranda vibratoria horizontal de malla cuadrada (*desliming-dewatering screen*), es transportado mediante cintas a las escombreras de la empresa. Mientras que el flotado, compuesto por carbón y partículas mixtas gruesas, es tamizado en la zaranda N°202, zaranda vibratoria horizontal de malla cuadrada (*drain and rinse screen*), siendo retenido el carbón depurado grueso.

Autor: Lic. Serpa, Leopoldo Daniel

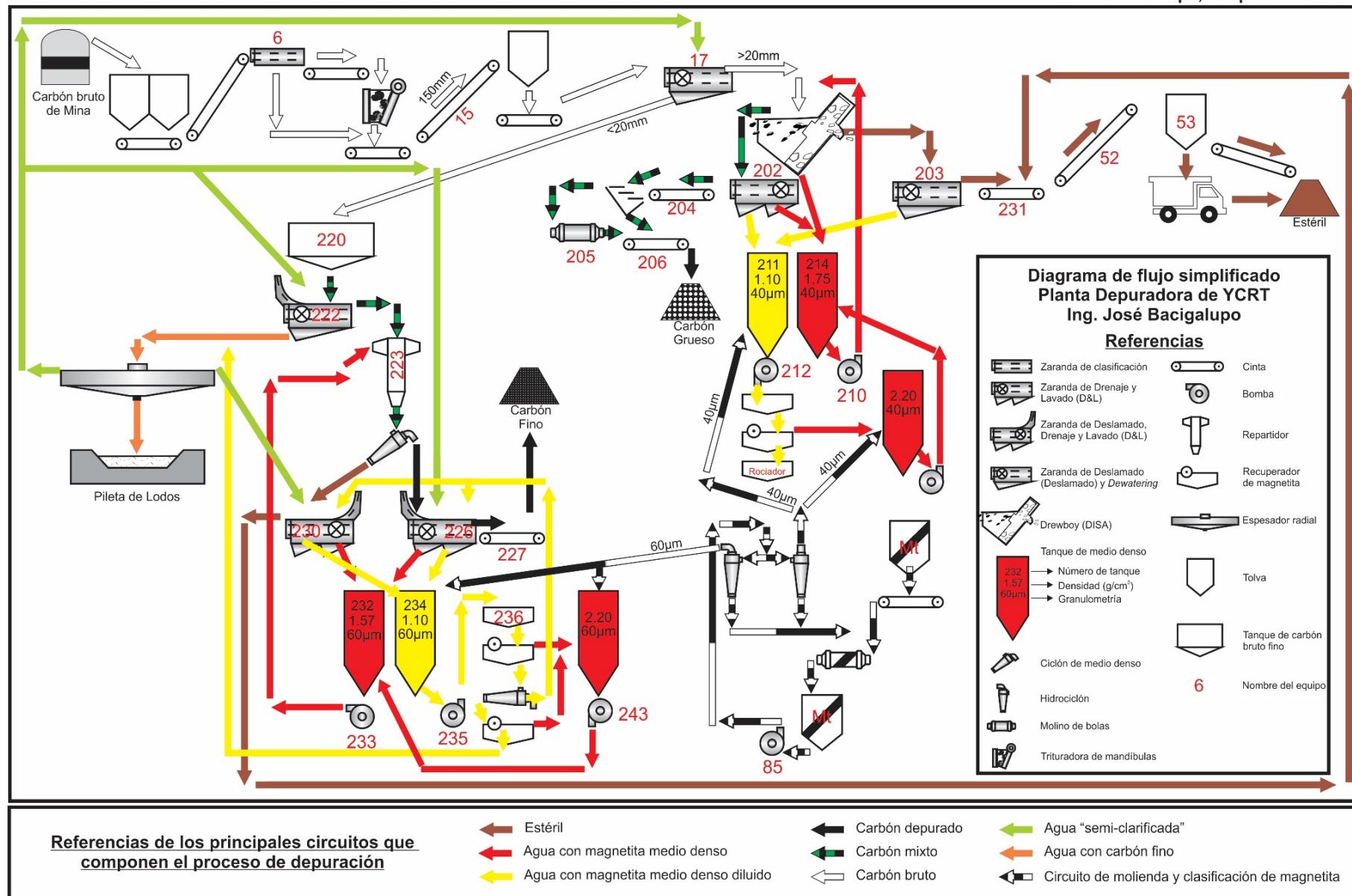


Fig. 16: Diagrama de flujo (*flow-sheet*) simplificado del actual funcionamiento de la Planta Depuradora de YCRT.

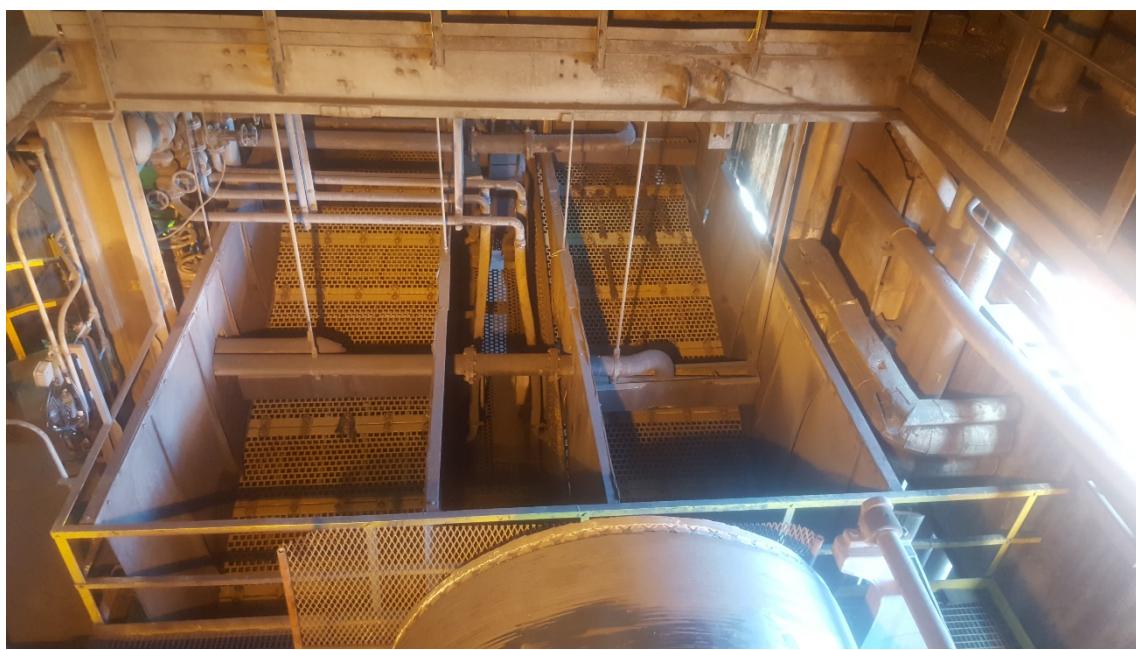


Fig. 17: Vista de las zarandas N°17, donde también pueden verse los rociadores para el lavado del carbón bruto. En la parte inferior se puede observar el separador de tambor (DISA).



Fig. 18: Separador de carbón grueso tipo *Drewboy* (DISA).

- En el circuito de finos, el pasante de la zaranda N°17, es enviada a la zaranda N°222 (Fig. 19A) donde el material retenido es acondicionado y enviado a los ciclones de medio denso (Fig. 19B). El material que es clasificado como liviano, el que sale del *vortex finder*, es tamizado en la zaranda N°226, siendo el material retenido el carbón depurado fino. El clasificado como pesado por el ciclón, lo que sale del *apex*, y que luego es retenido por la zaranda N°230, constituye estéril fino y es evacuado mediante cintas a las escombreras de la empresa. Las zarandas N°222, 226 y 230 están compuestas por una zaranda estática curva (en el primer tramo) y luego por una de tipo vibratoria horizontal

de malla rectangular. En la parte curva se produce el deslamado (*desliming*) y en la horizontal el drenaje y lavado (*drain and rinse*)



Fig. 19: A) Zarandas N°222, donde se puede observar la zaranda curva (estática), seguido por una vibratoria horizontal. B) Hidrociclos de medio denso.

- El pasante de la zaranda N°222 junto con la magnetita no recuperada del “circuito de recuperación de finos” constituyen los lodos que alimentan al espesador radial (Dorr 250). El agua “semi-clarificada” luego es recirculada por el sistema para los distintos lavados. Mientras que las partículas que sedimentan, constituirán los principales componentes sólidos de las piletas de lodos, es decir principalmente una mezcla de magnetita (<60 µm), carbón (<1 mm) y estéril (arena y arcilla coloidal).

La Planta aún no cuenta con un circuito que pueda recuperar el carbón fino y ultrafino (<1 mm), que generalmente se logra mediante concentradores en espiral o por flotación en columna (Honaker *et al.* 2013). Es éste carbón el que posee el menor contenido de cenizas, 10-11 %wt (s/s), según resultados reportados por el Laboratorio de YCRT.

Sabiendo que la recuperación de ningún proceso de beneficio es del 100%, que la planta carece de un circuito de recuperación del carbón de mejor calidad y que es posible evaluar períodos con inadecuado proceso de depuración, resulta de interés técnico-económico la evaluación de las piletas de lodos.

4.4. Descripción de las piletas de lodos

El material sedimentado en el espesador radial (Dorr 250), es descargado en forma de lodo (*coal slurry*) en una pileta donde se produce la sedimentación del material más grueso, mientras que el sobrenadante (por desborde) y el infiltrado son descargados al arroyo San José.

La base y los taludes han sido construidos con material estéril de la explotación (areniscas y arcillas) y un porcentaje de carbón muy fino (Revista Empresarial YCRT, 2010). Por su disposición en el terreno, son embalses de tipo *paddock*, es decir sus cuatro taludes están construidos sobre terreno plano (Lottermoser, 2010).

En YCRT las piletas fueron planificadas para albergar una cantidad determinada de material, por lo que su capacidad no cambia a lo largo del tiempo (

Tabla 2), a diferencia de lo que sucede normalmente con el crecimiento aguas arriba, aguas abajo o vertical de los diques de cola (Kossoff *et al.* 2014).

Tabla 2: superficie de las piletas estimadas en función del perímetro interno definido con el software ArcGIS v10.3.

Pileta	Perímetro (m)	Superficie (m ²)
N°1	356	8.134
N°2	516	15.431
N°3	1.342	37.223

En vista de esto último, es que, a lo largo de toda la historia de depuración de la Planta, los lodos han sido descargados en distintas piletas (Fig. 20), por lo que hay algunas que ya se encuentran colmatadas (Pileta N° 1, N° 1 bis y N° 2), mientras que la Pileta N° 3 es la que hoy en día recibe las colas del proceso de depuración.

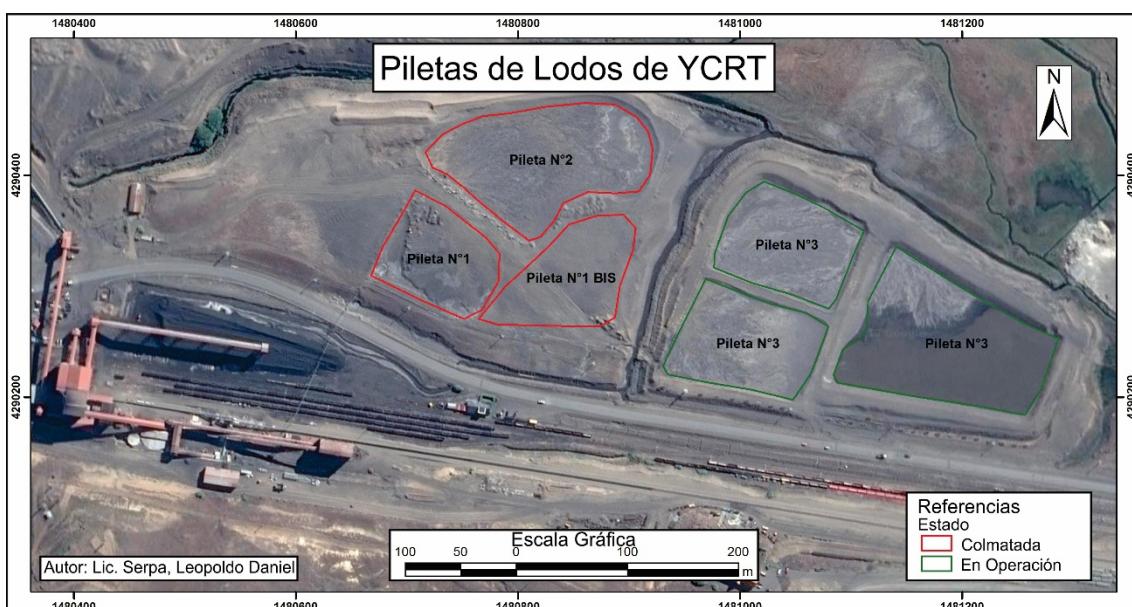


Fig. 20 Ubicación de las Piletas de Lodos de YCRT, diferenciando las colmatadas de las que se encuentran operativas.

4.4.1. Pileta de Lodos N° 2

Esta pileta estuvo operativa entre los años 2000-2010, y se caracteriza por haber sido la más profunda. Su relleno promedio se estima entre los 8 m y 9 m, dado que la cota al momento de su construcción era de 251 m.s.n.m y al momento del muestreo es de 259 m.s.n.m. Presenta actualmente una forma irregular cuyos ejes tienen 200 m (W-E) x 100 m (N-S).

La descarga era de tipo sub-aérea y puntual, ubicada hacia el W de la pileta, con la acumulación de agua sobrenadante (*supernatant pond*) en el extremo opuesto, situado al E como puede verse en Fig. 21.

El relieve de la pileta es prácticamente horizontal, observándose pequeños resaltos resultantes de zonas de canales y de la erosión eólica e hídrica (pluvial). En estas zonas pueden visualizarse las delgadas laminaciones de carbón y materiales arenosos y arcillosos. La visual general y de detalle de la pileta puede verse en las Fig. 22 y Fig. 23.



Fig. 21 Imagen histórica (2008) de Google Earth donde puede verse la zona de agua sobrenadante (*supernatant pond*) de la Pileta de Lodos Nº 2.

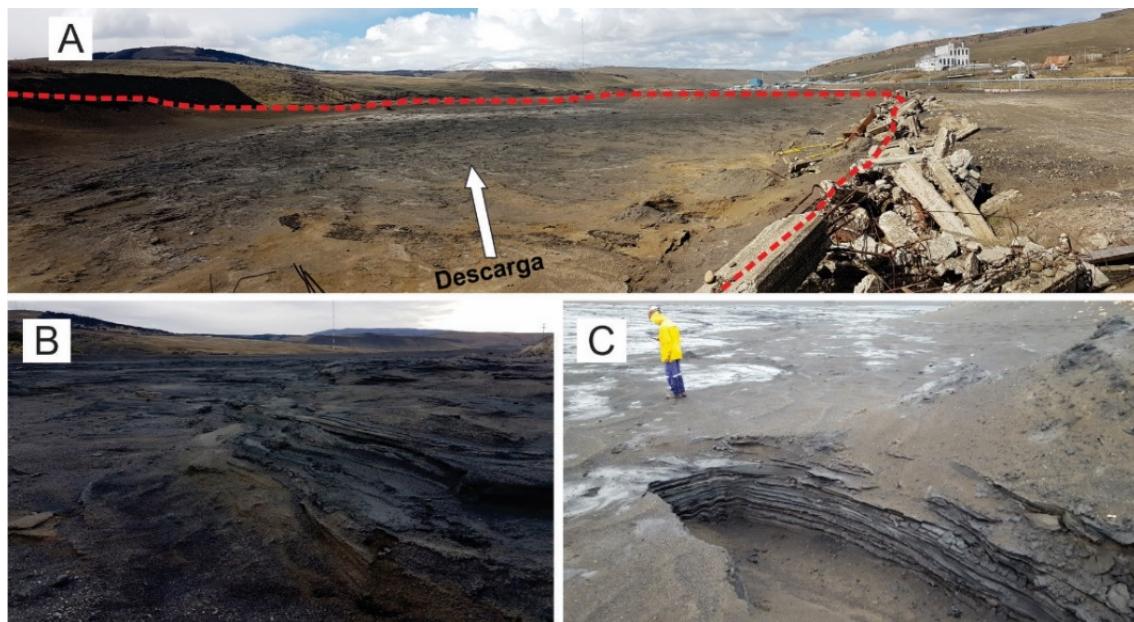


Fig. 22: En A) una visual general de la pileta Nº 2 desde la zona de descarga; B) y C) resaltos observados en la superficie de la pileta.



Fig. 23: A) Visual de las laminaciones originadas por los flujos de descarga en los laterales de la Pileta N° 2. En B) detalle de las mismas. La escala en ambas fotografías corresponde a un lápiz.

4.4.2. Distribución de los materiales dentro de la Pileta N° 2

Una vez que el lodo es depositado en el punto de descarga el material (partículas sólidas) comienza a separarse del agua o del medio líquido que lo contiene y las partículas sólidas a segregarse por granulometría (Papageorgiou, 2004). Las partículas gruesas tienden a depositarse primero (cerca del punto de descarga) y luego continúa la sedimentación de acuerdo al tamaño de grano, con las partículas más finas siendo depositadas en la zona más distal al punto de descarga (Vick, 1990).

Esto suele resultar en el desarrollo de una playa (*beach*) o delta con una pendiente descendente hacia el centro del dique, generada esencialmente por el material grueso en la cabeza de la playa y una balsa (*pool o pond*) en el centro, formado por agua y material fino o limos (Witt, 2004). Vick (1983) además plantea que en la zona de limos de la playa es frecuente la intercalación de niveles de material muy fino (10-20%) cuyo espesor es de unos pocos centímetros.

Numerosos factores influyen en la segregación y selección hidráulica de las partículas y en el perfil de la playa. Según McPhail (1995) éstas son caudal, velocidad, densidad de la pulpa y de los sólidos, granulometría y distancia con el punto de descarga.

Sin embargo, a pesar de conocer todos los factores que afectan la sedimentación, los patrones de deposición de las partículas no son uniformes y estos varían constantemente dentro del dique debido a la formación de canales y cambios en la posición (*water line*) de la balsa (Cobb *et al.* 1979).

5. RECURSOS Y RESERVAS

Según Carrizo y Valerdi (1990) los recursos del yacimiento totalizan 752 Mt, compuestos por 478 Mt medidos, 206 Mt indicados y 68 Mt inferidos. En Brooks *et al.* (2006) se hace referencia a información suministrada por el área de Energía del gobierno argentino que estimaba reservas por 426 Mt en el año 2003.

A los ritmos de producción que demandaría la usina de 240Mw (aún sin finalizar su obra en el año 2019), que serían de 1,2 Mt anuales (Castro y Alfaro 2011) y considerando las reservas disponibles al año 2003, el yacimiento tendría una vida útil de más de 350 años. La producción en los últimos años de YCRT se resume en la Tabla 3.

Tabla 3: Producción de carbón 2014-2016 reportada por la Dirección Provincial de Minería de Santa Cruz. Tomado de Castro (2018)

Producción Carbón (t) x año		
2014	2015	2016
173.848	48.764	40.597

5.1. Aspectos económicos y mercado actual

Numerosas revistas de análisis de *commodity*, plantean que el carbón sigue siendo clave en la energía mundial. Según Gómez (2018) el año 2017 se caracterizó por una clara tendencia alcista en los precios de electricidad y gas a nivel global, y en esta subida, el precio del carbón jugó un papel clave, influyendo en los precios de electricidad, en función de su participación en el mix de generación, pero también en los precios de gas, como fuente de energía substitutiva. China es el principal agente de influencia sobre el mercado internacional, al ser el principal productor de carbón (48% del total) y a su vez principal consumidor (52% del total).

En 2016 para reducir la contaminación atmosférica de sus ciudades, China inició un cambio de modelo energético reduciendo su capacidad productiva con el cierre de muchas minas e incentivando el cambio hacia el gas natural en las industrias y en la generación eléctrica. Tras la reducción drástica en su producción, se vio obligada durante estos últimos 2 años a importar carbón extranjero para poder cubrir su demanda. Se espera que el carbón continúe representando un 55% del mix energético de China para 2022. Todo ello, ha comportado un aumento significativo de los precios, por ejemplo, en Europa, la referencia API2 ha llegado a alcanzar valores de 90\$/ton a finales de diciembre de 2018, situándose en valores máximos de los últimos 5 años.

La agencia *Bloomberg* revelaba que las importaciones chinas de carbón alcanzaron 29 millones de toneladas en julio de 2018, el nivel más alto desde el 2014, mientras que la producción de electricidad del país alcanzó un record de 640.000 millones de kilovatios-hora a fines de agosto (Ahumada Rojas, 2019). En Europa a pesar de que las políticas para reducir el uso del carbón, ya están en marcha, la transición no está siendo tan rápida como se esperaba. En países como España la producción de electricidad con carbón alcanzó en 2018 los 34.908 gigavatios hora (GWh), lo que supone el 14,1% de la generación nacional y sitúa a esta tecnología como la tercera del país, solo por detrás de la nuclear y la eólica (Servimedia, 2019). Según la minería de carbón de Australia, este *commodity* se está convirtiendo en una fuente de energía muy competitiva por sus precios.

El pronóstico de los precios del carbón a nivel global, según la Agencia Internacional de Energía (AIE), para los próximos 5 años es de un estancamiento en la demanda Fig. 24, dado que el aumento de consumo por parte de India y del sureste asiático compensará la reducción por parte de Europa, Estados Unidos y China. Actualmente, el carbón es omnipresente en países como India, Indonesia, Filipinas o Vietnam, donde representa la opción más rápida y económica para abastecer a su población de electricidad dada su abundancia y existencia de infraestructuras. Consecuentemente, en India se prevé que la producción de carbón se duplique de aquí a 2020, y en Indonesia se tiene previsto un aumento de capacidad de generación eléctrica en 35 GW para 2020, siendo un 70% de ésta por quema de carbón.

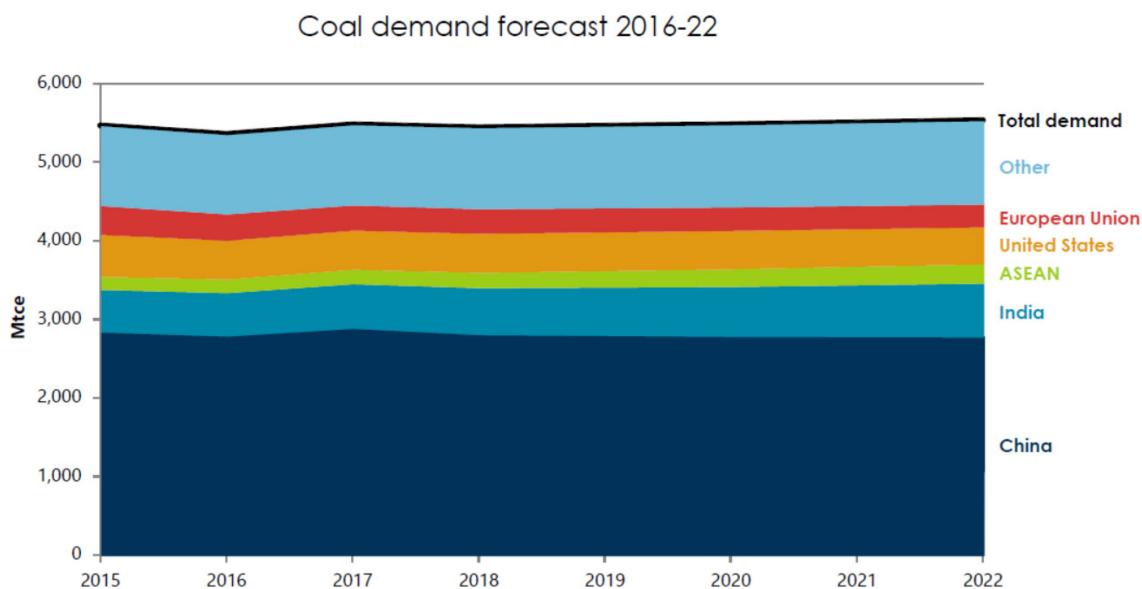


Fig. 24 Demanda de carbón proyectada para el período 2016-2022. Tomado de Gómez (2018).

En Latinoamérica, de acuerdo a un artículo de Moya (2019), el carbón representó para Colombia una mini-bonanza a finales de 2018. En Norteamérica, Estados Unidos empezó a jugar también un papel importante como *swing supplier* ya que los cambios regulatorios recientes están permitiendo una reducción de los costes para los productores de carbón en ese país. En adelante se espera un mercado de precios de carbón con una volatilidad creciente.

5.2. Legislación vigente

5.2.1. El carbón en la legislación vigente

Según el **Art. 3º inciso b** del Código de Minería, el carbón corresponde a las sustancias de primera categoría (“combustibles”). Las normas ambientales que regulan su explotación se encuentran enmarcadas en la Sección Segunda “De la protección ambiental para la actividad” del Código de Minería y en la ley nacional 24.585 “De la protección ambiental para la actividad minera”. La autoridad de aplicación ambiental corresponde a la Dirección Provincial de Minería de Santa Cruz según la ley provincial 2.749. Vale la pena destacar que según el Título Final “Disposiciones generales y Transitorias” del Código de Minería:

“Art. 349. – La zona de explotación del yacimiento Carbonífero Río Turbio, en la Provincia de Santa Cruz, queda fijada dentro de los siguientes límites: al Norte el Paralelo 51º 16' 00"; al Este el Meridiano 72º 11' 00"; al Sur y al Oeste la frontera con la REPUBLICA DE CHILE.

La cuenca carbonífera de Río Turbio será considerada como una mina constituida por una sola pertenencia y su explotación será realizada por el Estado Nacional, por intermedio de YACIMIENTOS CARBONIFEROS FISCALES.

Lo dispuesto precedentemente no afectará la percepción por la provincia de Santa Cruz del canon minero establecido por el Artículo 213, determinándose el número de pertenencias conforme a las disposiciones de este Código.”

5.2.2. Situación ambiental de las piletas de lodos

En YCRT se han llevado adelante numerosos estudios para las remediaciones ambientales y paisajísticas de los residuos resultantes del proceso de beneficio del carbón. El trabajo realizado por la empresa GT Ingeniería SA (2015) y titulado “*Proyecto de Restauración Ambiental Piletas de Lodos en zona de Planta Depuradora YCRT, Río Turbio, Santa Cruz, Argentina*” constituye el más reciente a la fecha. En éste se abordan la evaluación de medidas que incluyen un plan de restauración del espacio natural afectado por las labores de la depuración del carbón, la creación de un área recreativa e instalación de un vivero de plantas nativas para restaurar potenciales áreas afectadas por la industria. A junio de 2019, sólo se ha realizado la restauración de parte de las escombreras de estéril (frente a planta depuradora) mediante una remodelación topográfica y posterior revegetación (Revista N° 13, YCRT 2010).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

La información utilizada en este trabajo fue cedida por la empresa YCRT, para su uso académico y con fines de investigación. Los datos fueron obtenidos en la campaña realizada en el año 2017. Para llevar adelante la modelización, se utilizaron 169 muestras colectadas de la Pileta de Lodos N° 2. El modelamiento y el estudio geoestadístico se realizó con *software Leapfrog Geo v4.4* (licencia académica), *Micromine v11.0.0*, *ArcGIS v10.3*, *Statgraphics Centurion v16.1.03* y hojas de cálculos *Excel 2016*.

6.1. Protocolos de trabajo desarrollados en la pileta de lodos N°2

En este apartado se describirán las características del muestreo en campo, la preparación de la muestra para el análisis y las técnicas analíticas implementadas para la obtención de los resultados.

6.1.1. Toma de muestras.

El muestreo en la pileta N°2 comprendió la realización de 35 pozos distribuidos sobre una malla de 20 m x 20 m, con una profundidad que oscila entre los 2,00 m y los 3,10 m, para totalizar 87,90 m lineales y 169 muestras recolectadas. La ubicación de los pozos se muestra en la Fig. 25. La elección del espaciado entre muestras tuvo en cuenta la naturaleza inicial de la etapa de exploración, los equipamientos de muestreo disponibles (perforadora manual) y la necesidad empresarial por contar con resultados en el menor tiempo posible.

Los pozos fueron proyectados para cubrir el perímetro interno de la pileta y hasta una profundidad de muestreo de 2,50 m. Sin embargo, por las condiciones climáticas y de saturación de agua en algunos sectores, dicha profundidad no pudo ser alcanzada en algunos pozos.

Si bien la base de la pileta estaría aproximadamente entre 7 y 9 m por debajo de la cota actual (según un antiguo plano de la División Topografía de Mina de YCRT), la profundidad máxima a explorar fue definida en 2,50 m por la falta de un equipo de muestreo (perforadora) que permitiese alcanzar y confirmar la cota del sustrato de la pileta.



Fig. 25: Ubicación de pozos, con su profundidad final, sobre la malla de 20x20 m diseñada para el muestreo de la Pileta N° 2.

Luego de varias pruebas realizadas en campo para definir la mejor forma de tomar la muestra, minimizando la contaminación, disminuyendo el efecto compactación y maximizando la recuperación de material con los recursos disponibles en la empresa, se optó por:

- Perforación manual a percusión por cable.
- Toma de muestra cada 0,50 m (cuando fuera posible, ya que en algunos pozos debió muestrearse cada 1,00 m por la saturación de agua del material) para minimizar el efecto compactación.
- Utilización de un tubo saca-testigo simple de 8,3 cm de diámetro, dividido en dos mitades, para facilitar la toma de duplicados. Esto permitió también describir la distribución de los sedimentos en profundidad.

A continuación se describe el procedimiento de muestreo realizado en la pileta de lodos N°2 entre abril y diciembre de 2017 (Fig. 26):

- 1) Ubicación del pozo según la estaca marcada previamente por la División Topografía de YCRT.
- 2) Remoción de los primeros 5 cm de la superficie con pala.
- 3) Perforación hasta 0,50 m.
- 4) Extracción del tubo saca-testigo con cuidado, para minimizar la caída de material.
- 5) Corte del cilindro de muestra en dos mitades.
- 6) Medición de la longitud de muestra recuperada.
- 7) Registro fotográfico.
- 8) Breve descripción macroscópica del sedimento.
- 9) Preparación de dos muestras con triple rotulo (una para ser enviada al laboratorio y otra guardada como duplicado en depósito de geología).
- 10) Limpieza del tubo con cepillo de acero.
- 11) Se repite el procedimiento hasta alcanzar la profundidad final del pozo.



Fig. 26 Principales etapas del procedimiento de muestreo. En números se representan las etapas enumeradas en el texto.

Durante el muestreo, en muy pocas ocasiones pudo recuperarse el 100% del material, es por ello que se decidió corroborar si se debía realmente a la caída del sedimento del tubo (pérdida) o si era por un efecto de compactación. Para evaluarlo se tuvo en cuenta:

- La determinación de la recuperación (%) que se define según la Ecuación 1 (Annels y Dominy, 2003):

$$\text{Recuperación (\%)} = \frac{\text{longitud recuperada (m)}}{\text{longitud perforada (m)}} \times 100 \quad (1)$$

- Algunas mediciones de control (Fig. 27):
 - Medición de la longitud de la barra.
 - Medición de la longitud de la barra que queda por fuera del pozo.
 - Medición por dentro de la barra, desde la superficie hasta donde se alcanza el material.
 - Medición de la muestra recuperada en superficie.

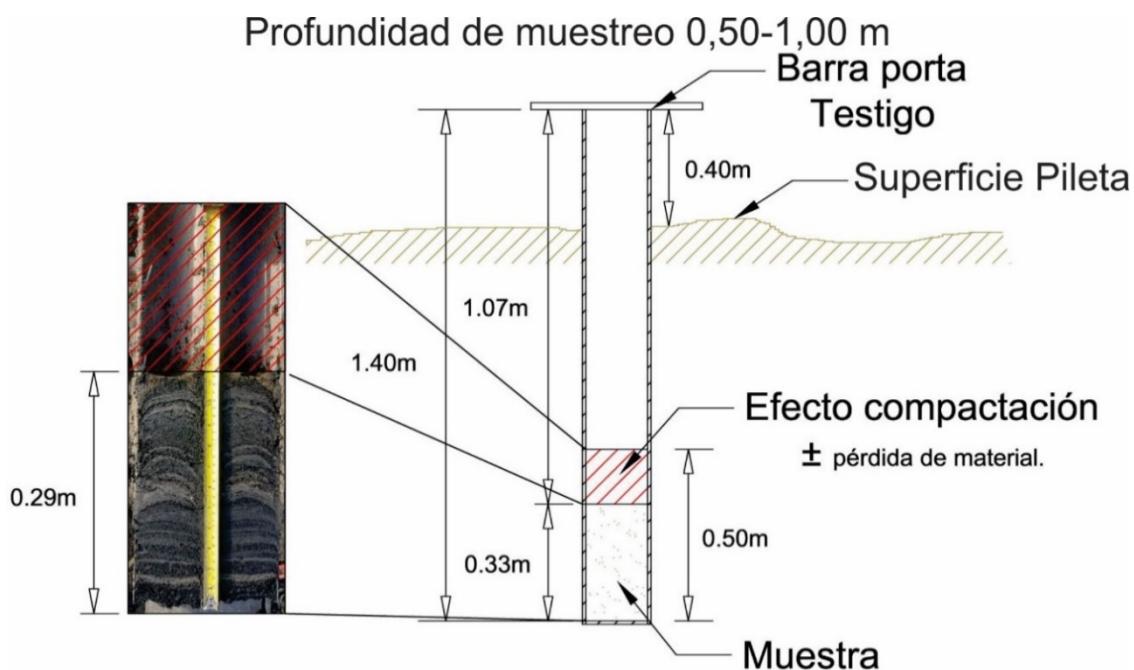


Fig. 27: Ejemplo de un tramo muestreado de 0,50 m – 1,00 m, donde se indican las distintas mediciones de control realizadas.

Este procedimiento de verificación se realizó en el 30% de los pozos perforados. En otros, sin embargo, se optó por bajar una varilla de hierro por la boca del pozo hasta tocar el fondo, verificando que la misma encontraba un tope en la profundidad alcanzada y/o se enterraba no más de 5 cm. En todos los casos en los cuales se realizaron las mediciones de control, la diferencia de longitud entre la muestra obtenida en superficie y la que tiene en el fondo del pozo es menor a 6 cm, por lo que la recuperación en promedio está en el orden del 90%.

En el ejemplo de la Fig. 27, puede verse que la compactación es de 0,17 m (0,50 m – 0,33 m), mientras que la pérdida es de 0,04 m (0,33 m - 0,29 m). Por lo tanto, la recuperación (sin tener en cuenta la compactación) es del 92%. Es por ello, que se llegó a la conclusión de que la diferencia entre la profundidad perforada y la longitud de la muestra recuperada se debe fundamentalmente al efecto de compactación producto del mecanismo de muestreo. Este efecto como es de esperarse, va aumentando en profundidad, ya que son necesarios más golpes (percusiones) para lograr continuar perforando.

6.1.2. Preparación de las muestras

La mitad de la muestra recolectada es enviada al laboratorio de la Planta Depuradora para ser preparada para el análisis del contenido de cenizas (Cz %wt) y Poder Calorífico Superior (PCS Kcal/kg).

El procedimiento de obtención de la muestra para ser analizada se ejemplifica en las Fig. 28 y Fig. 29 y puede resumirse de la siguiente manera:

1. Pesaje: el peso oscila entre los 0,55 kg y 6 kg, con un contenido de humedad muy variable. Algunas muestras se encuentran completamente saturadas y otras prácticamente secas.
2. Secado: se seca en estufa a aproximadamente 100°C.

3. Re-pesaje: se vuelve a pesar la muestra luego de haber sido secada. El peso oscila entre los 0,40 kg y 3,25 kg.
4. Cuarteo: se realiza cuarteo con regla y fraccionamiento, para obtener dos sub-muestras, una para ser reservada como rechazo y otra con la que se seguirá trabajando.
5. Tamizado (tamices ASTM): se tamiza en seco, manualmente, obteniéndose fundamentalmente dos granulometrías 3x0,5 mm (que significa entre 3 mm y 0,5 mm) y < 0,5 mm.
6. Rifleado: se divide cada fracción retenida con un partidor de Jones para obtener dos sub-muestras. Una guardada como rechazo y la otra para ser pulverizada.
7. Pulverizado: se pulveriza cada fracción granulométrica por separado (3x0,5 mm y < 0,5 mm) con pulverizador Pulverisette – 1949 hasta alcanzar al menos 95% pasante malla #60 ASTM (250 µm), según lo establece la norma ASTM D2013. Estas son las muestras para el análisis.

Se debe aclarar que las normas que estipulan el correcto análisis granulométrico del carbón, ASTM D4749, sugieren por las características del tipo de material presente en la pileta de lodos (presencia de arcilla) el tamizado en húmedo con secado previo a no más de 40°C. Es por ello, que debe tenerse en cuenta que puede haber una tendencia a la formación de grumos o aglomerados (“pseudo” granulometrías) por el tamizado en seco. Por este motivo, se ha optado por realizar el análisis del contenido de cenizas y el PCS solamente sobre las fracciones 3x0,5 mm y <0,5 mm, dado que son las que mejor representan el material observado al momento del muestreo.

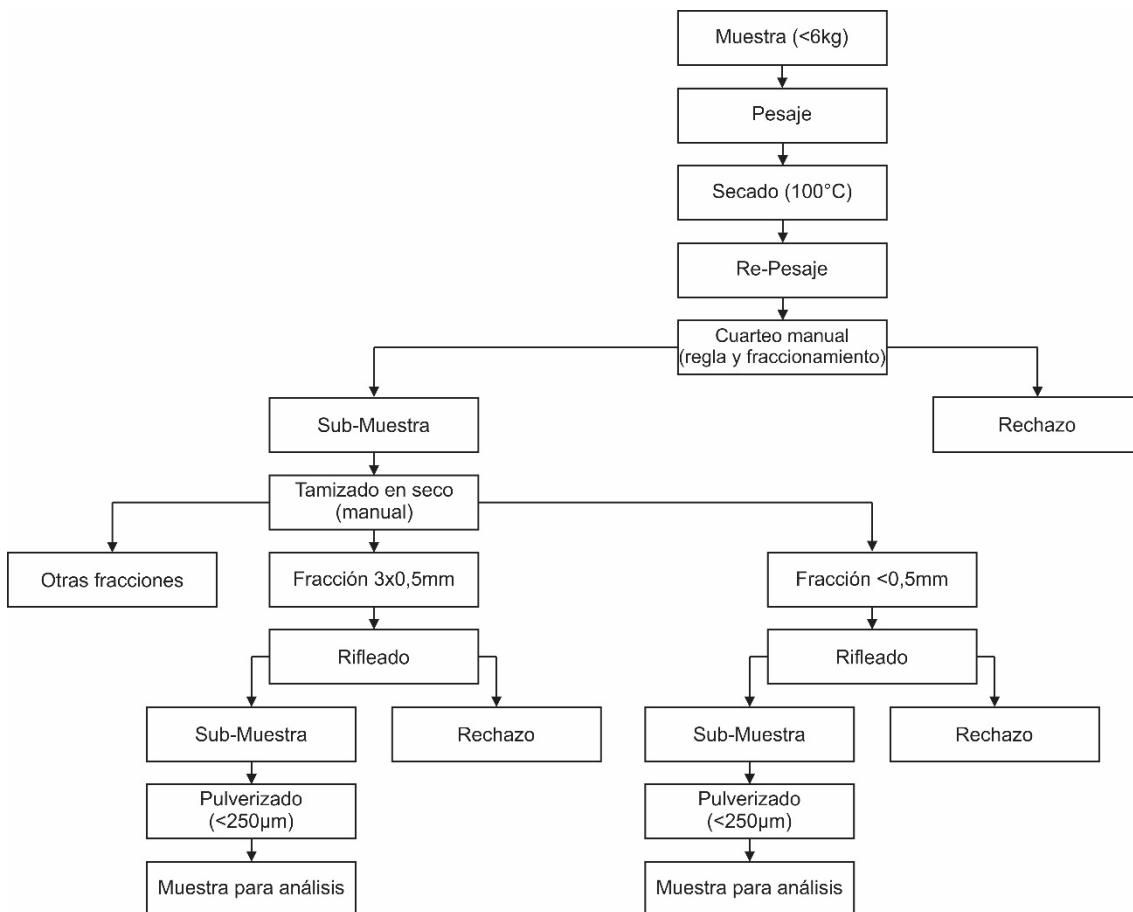


Fig. 28 Procedimiento de preparación de muestras para análisis de carbón

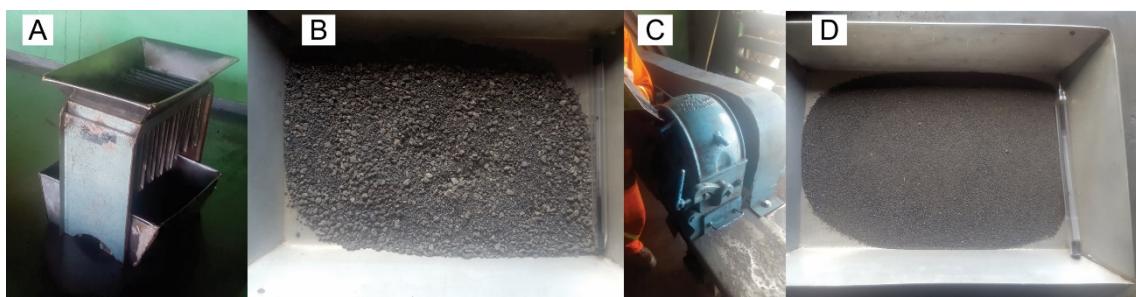


Fig. 29 Etapa final, de la preparación de la muestra: pasos 6 y 7: a) cuarteador rifle, b) sub-muestra 3x0,5 mm, c) pulverizador, d) muestra para análisis (< malla #60 ASTM).

6.1.3. Análisis de las muestras

Se analizaron las dos sub-muestras más representativas, 3x0,5 mm y <0,5 mm, y sobre ellas se determinaron los siguientes parámetros:

- **Contenido de ceniza (%wt):** se transfiere 1g de muestra a una navelilla previamente pesada, ambos pesajes con precisión de $\pm 0,1$ mg. Se coloca en calcinador programado para llegar a los 500°C al cabo de 1h y a 750°C al final de las 2h. Se deja enfriar en desecador hasta que alcance temperatura ambiente. Finalmente, se pesa la navelilla junto con el residuo, con precisión de $\pm 0,1$ mg.

Se calcula el contenido de ceniza (%wt) en *as determined basis* según la siguiente fórmula:

$$\text{ceniza (\%)} = \left(\frac{A - B}{C} \right) \times 100 \quad (2)$$

Donde:

A: peso en gramos de la cápsula, tapa y ceniza residual;

B: peso en gramos de la cápsula vacía y la tapa;

C: peso en gramos de la muestra utilizada para el análisis.

Para más detalles del procedimiento consultar norma ASTM D3174.

- **Poder Calorífico Superior (PCS):** se pesa entre 0,8 a 1,2 g de muestra, con precisión de 0,1 mg. Se coloca dentro de la bomba calorimétrica, y ésta dentro del vaso del calorímetro (isotérmico) rodeado con 2000 g de agua destilada. Se produce la ignición. A partir del aumento de la temperatura del agua y la capacidad calorífica efectiva media del sistema se calcula el PCS. El resultado obtenido se expresa en Kcal/kg y es en *as determined basis*. Para más detalles del procedimiento consultar norma ASTM D5865.
- **Humedad (%wt):** se calienta la cápsula vacía a 104-110°C, se enfriá en desecador por 30 minutos y se pesa con precisión de $\pm 0,1$ mg. Se coloca 1 g de muestra pesada con precisión de $\pm 0,1$ mg. Se llevan las capsulas con la muestra al horno (104-110°C) durante 1 hora. Se deja enfriar en desecador con desecante hasta que alcance temperatura ambiente. Finalmente se pesa con precisión de 0,1 mg y se calcula según la siguiente fórmula:

$$M (\%) = \left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

M (*moisture*, humedad);

A: gramos de muestra utilizada;

B: gramos de muestra luego del calentamiento.

Para más detalles del procedimiento consultar norma ASTM D3173.

Con este valor de humedad y utilizando las fórmulas de la tabla de conversión de la norma ASTM D3180, se pueden convertir el contenido de Cz y el PCS de *as determined basis* en *dry basis* (base seca). Para ello se usa la Ecuación 4. El equipamiento para la determinación analítica se puede ver en la Fig. 30.

$$dry basis = \left(\frac{100}{100 - M_{ad}} \right) \times \text{valor en } as \text{ determined basis} \quad (4)$$

Donde M_{ad} es la humedad calculada con la Ecuación 3.



Fig. 30 Equipos del Laboratorio de Planta Depuradora en YCRT para la determinación de humedad, PCS y cenizas.

7. RESULTADOS

7.1. Descripción macroscópica del sedimento muestreado en la pileta de lodos

El sedimento muestreado fue caracterizado macroscópicamente en base a la observación de los tramos perforados y a los materiales propensos de encontrar en las piletas producto del proceso de depuración del carbón en YCRT. En función de estos criterios visuales y como una caracterización preliminar, se han identificado tres tipos de materiales:

- Carbón:** partículas cuyo tamaño rara vez superan los 3mm y que están asociadas con magnetita (por la respuesta frente al imán).

- b) **Arcilla:** de granulometría muy fina, de comportamiento extremadamente plástico, generalmente con mucha humedad. En algunos casos la misma enmascara las partículas de carbón. Su coloración es grisácea oscura a negruzca.
- c) **Estéril:** conjunto de materiales de granulometría arenosa (a veces limosa) y de color ocre producto de oxidación.

Si bien los materiales b) y c) constituyen estériles desde el punto de vista productivo, es decir tienen un elevado contenido de cenizas, se ha optado por hacer ésta distinción ya que para el proceso de beneficio es mucho más complejo el tratamiento de arcillas (lamas) que otro tipo de material estéril.

Estos tres sedimentos se intercalan en distintas proporciones unos con otros constituyendo todos los niveles atravesados en los tramos perforados. Esto genera que se identifiquen niveles con el predominio de un solo material, y otros donde se combinan. En éstos últimos es donde pueden observarse laminaciones menores a los 2 cm que son el resultado de la ritmidad del proceso de depuración y de los fenómenos físico-químicos actuantes en la pileta. Es importante resaltar que la abundancia de un componente respecto de otro se define cualitativamente en base a la observación del geólogo.

Algunos ejemplos de los niveles definidos son “carbón”, “estéril”, “arcilla”, “carbón con estéril”, “carbón con arcilla”, “estéril con carbón”. Estos pueden verse en las Fig. 31, Fig. 32 y Fig. 33, donde además se acompañan el contenido de Cz y el PCS.

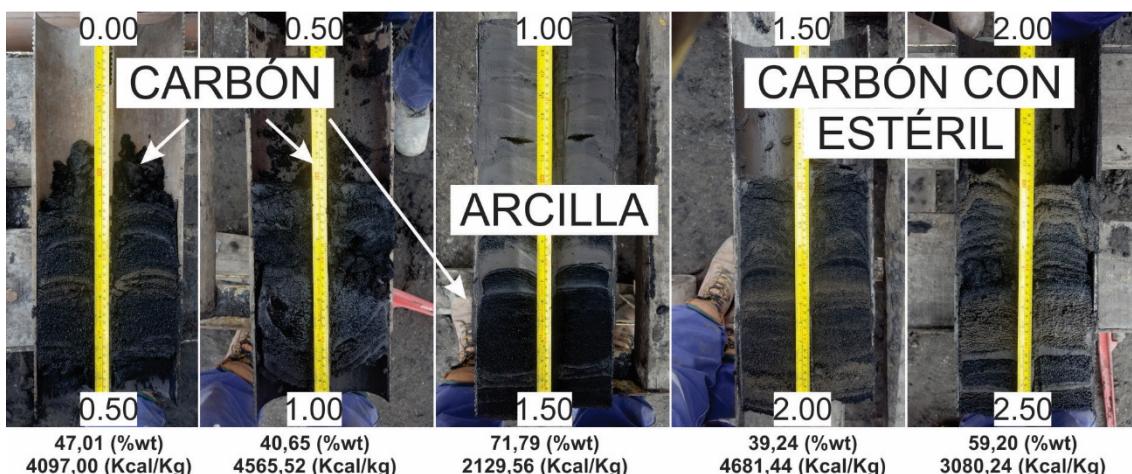


Fig. 31: Se muestran las características de los componentes descriptos como “carbón” y “arcilla” en el pozo E33, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).

Representar visualmente los tramos perforados junto con los resultados de laboratorio, permite tener una aproximación visual de la influencia de los sedimentos b) y c) sobre los parámetros a modelar numéricamente. Se hace referencia a una aproximación, dado que en los niveles de arcilla o donde ésta predomina, el carbón puede estar enmascarado. No obstante, es un buen indicador y además permite detectar resultados anómalos en los reportes del laboratorio.

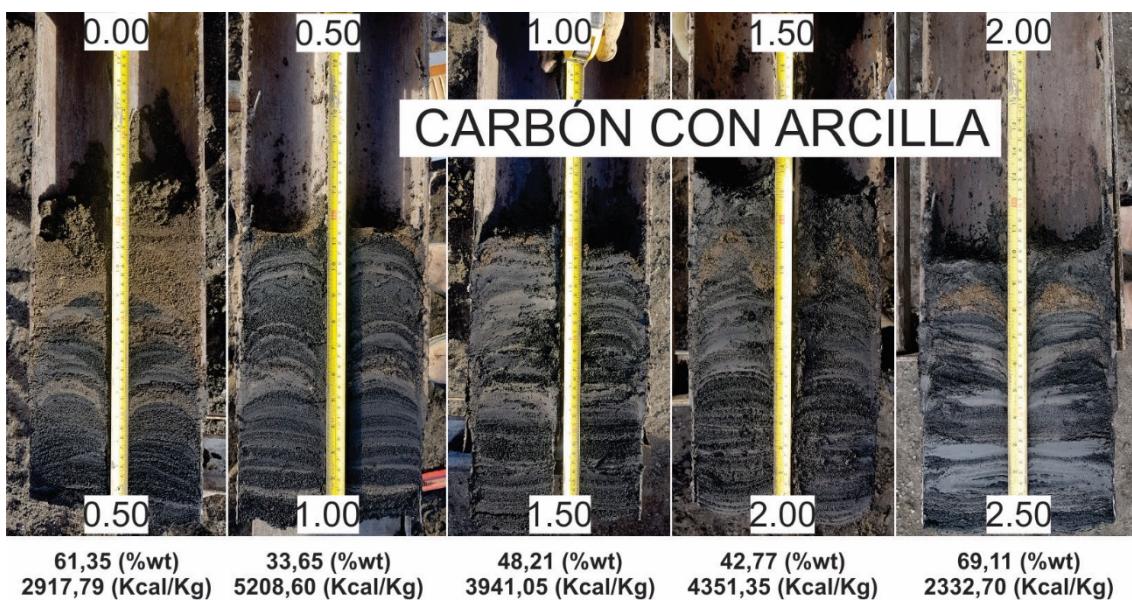


Fig. 32: Se muestran las características de los componentes descriptos como “carbón con arcilla” en el pozo E1, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).

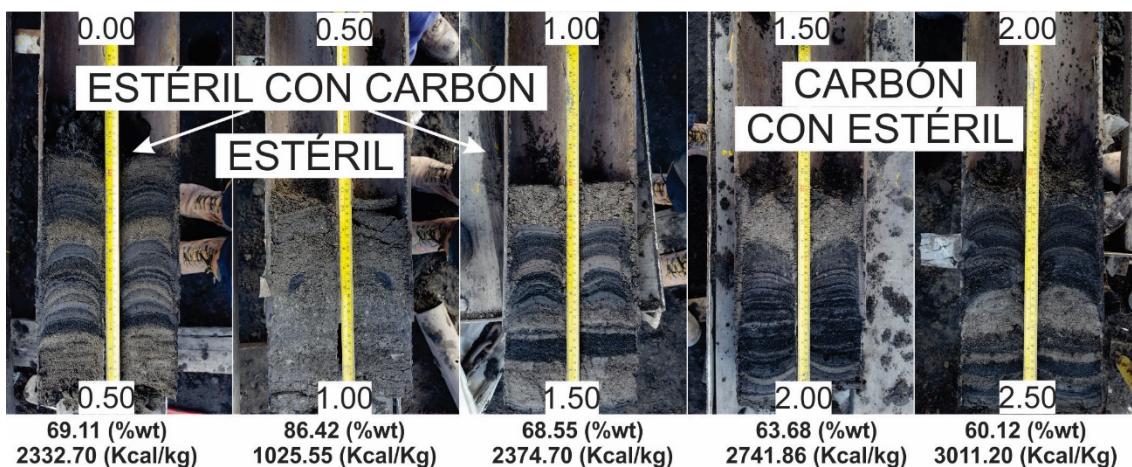


Fig. 33: Se muestran las características de los componentes descriptos como “estéril”, “estéril con carbón” y “carbon con estéril” en el pozo E13, junto con el contenido de cenizas (%wt) y el poder calorífico superior (Kcal/kg).

7.2. Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

El Análisis Exploratorio de Datos “EDA” (por su sigla en inglés *exploration data analysis*), es un conjunto de técnicas descriptivas que permite identificar patrones, datos inusuales, detectar errores y diferenciar valores accidentales de aquellos que son relevantes (Hainging, 1998). Para ello se combinan elementos visuales (gráficos, tablas, figuras) y numéricos simples (estadística). El EDA es sumamente importante y se recomienda que preceda a cualquier inferencia o hipótesis a partir de los datos (Hoaglin, 2015). Es por esto que se analizaron las variables Cz y PCS, caracterizando los parámetros estadísticos principales y la correlación entre ambas variables.

En este trabajo, se divulgarán únicamente los resultados de los análisis estadísticos y las estimaciones obtenidas sin mostrar los datos originales en su totalidad, ya que son de carácter confidencial de la empresa YCRT. A pesar de esto, en el [Anexo 1](#) y [Anexo 4](#), se expondrán a modo

de ejemplo, algunos datos de un pozo para mostrar con mayor detalle los cálculos realizados durante el proceso. Como se desarrolló previamente en el Capítulo 6.1.3, la fracción <0,5 mm y 3x0,5 mm (>0,5 mm) de cada una de las 169 muestras recolectadas fue analizada por los parámetros Cz y PCS. Para minimizar el efecto aglomerante de las arcillas sobre el tamizado en seco, se ha optado por reconstituir Cz y PCS de la muestra total. Para ello se realizó un promedio ponderado (PP) utilizando el porcentaje que representa cada una de las fracciones (Ecuación 5

Tabla 4).

Tabla 4: Ejemplo del informe de laboratorio para la muestra 00005-P, y el promedio ponderado calculado a partir de éste.

Informe de Laboratorio								Promedio Ponderado	
Pozo	Muestra	Desde	Hasta	Fracción (mm)	Fracción en %	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)
E4	00005-P	0,00	0,50	>0,5	15,00	26,81	5.745,50	44,97	4188,13
				<0,5	85,00	48,17	3.913,30		

$$PP = \frac{\sum(\text{fracción (\%)} \times \text{parámetro})}{\sum \text{fracción (\%)}} \quad (5)$$

Sobre estos valores obtenidos se llevó a cabo un primer análisis estadístico (EDA) sin discriminar variables geológicas. En Tabla 5 se pueden ver los resultados de la estadística descriptiva reportada por Excel 2016, donde podemos destacar que ambas variables presentan leves asimetrías, negativa para Cz y positiva para PCS, y que la dispersión relativa (representada por CV y RSD%) de ambos parámetros es similar, presentando mayor variabilidad PCS con 30% respecto de Cz con 22%.

Tabla 5: Estadística descriptiva para Cz y PCS obtenida con Excel 2016.

Parámetros	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)
Media	57,39	3.185,67
Error típico	0,97	74,44
Mediana	58,47	3.095,48
Moda	60,15	3.008,72
Desviación estándar (SD)	12,60	967,72
Coeficiente de variación (CV)	0,22	0,30
RSD%	22%	30%
Varianza de la muestra	158,74	93.6475,00
Curtosis	-0,55	-0,71
Coeficiente de asimetría	-0,20	0,13
Rango	58,31	4.345,62
Mínimo	28,11	1.025,55
Máximo	86,42	5.371,17
Suma	9.698,21	53.8377,86
Cuenta	169	169
Nivel de confianza(95,0%)	1,91	146,96

En los histogramas de frecuencia de las Fig. 34 y Fig. 35 se puede observar la leve asimetría de los dos parámetros y que corresponden a distribuciones bimodales. El punto medio de los intervalos de clase que contienen las modas son 57,5 %wt y 72,5 %wt para Cz y 3.166 Kcal/kg y 2.166 Kcal/kg para PCS.

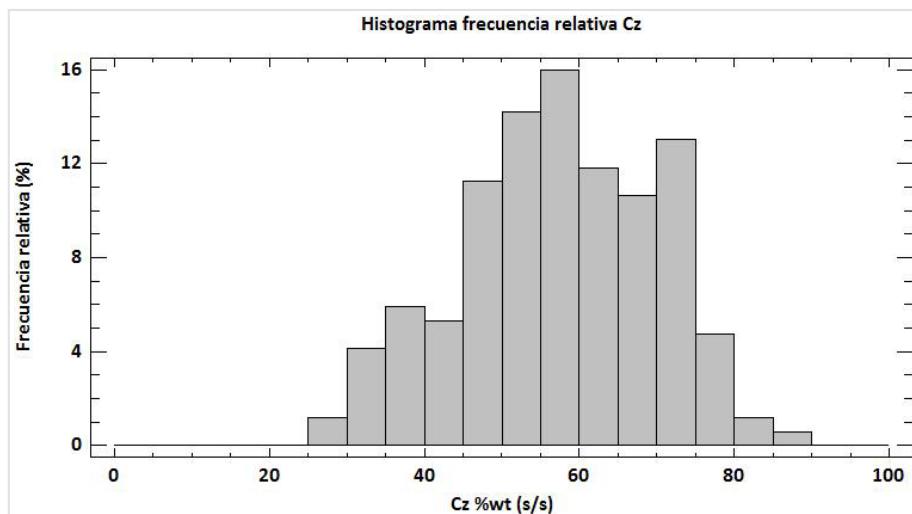


Fig. 34: Histograma de frecuencia relativa (%) para la variable Cz (%wt) calculado con el software Statgraphics Centurion v16.1.03.

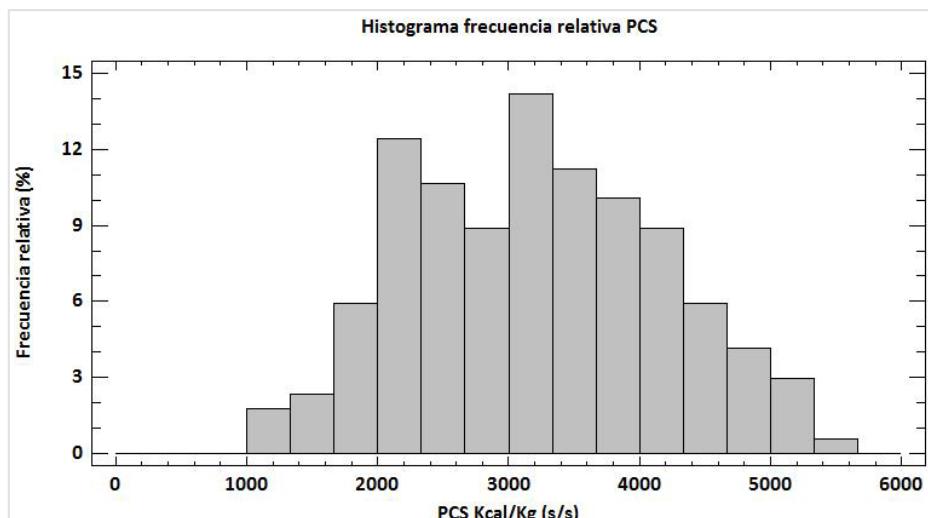


Fig. 35: Histograma de frecuencia relativa (%) para la variable PCS (Kcal/kg) calculado con el software Statgraphics Centurion v16.1.03.

La Cz y el PCS tienen una fuerte correlación negativa representada por la Fig. 36 mediante un gráfico de dispersión (*Scatter plot*) y cuya estadística se muestra en Tabla 6. El valor de $R=-0,95$ indica que a menor Cz (%wt) mayor es el PCS (Kcal/kg); mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0,91$ expresa que el 91% de la variación en el PCS está asociado a la variación de la Cz para el modelo lineal calculado.

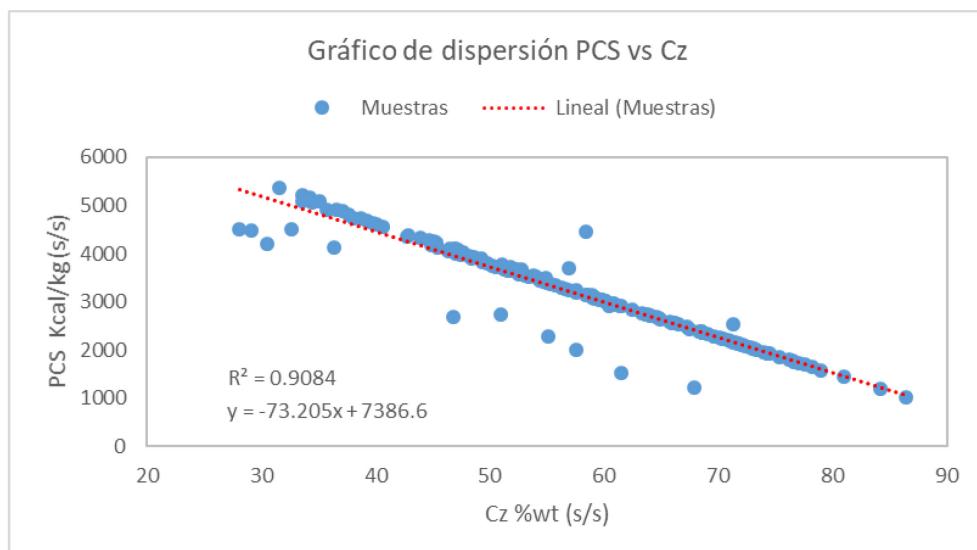


Fig. 36: Scatter plot para PCS (s/s) vs Cz (s/s) junto con la ecuación de la recta de ajuste (regresión) realizado en Excel 2016.

Tabla 6: Estadísticas de regresión realizada con Statgraphics Centurion v16.1.03.

Coeficiente de correlación múltiple	-0,9531
Coeficiente de determinación R^2	0,9084
R^2 ajustado	0,9078
Error típico	293,8142
Observaciones	169

Los dos parámetros estudiados provienen de una distribución normal, según lo que puede observarse en los gráficos Cuantil-Cuantil (*Q-Q Plot*) Normal de las Fig. 37 y Fig. 38. Además la prueba de Kolmogorov-Smirnov para Cz y PCS (Tabla 7) cuyo valor-P más pequeño es mayor o igual a 0,05, indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, es decir Cz y PCS provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Cuando se evalúa la normalidad de los datos no se exploran las propiedades espaciales y lo que se busca es que los datos se ajusten a la forma de una curva de campana. Esta forma de la curva se puede ver con detalle en las figuras presentadas en el [Anexo 2](#).

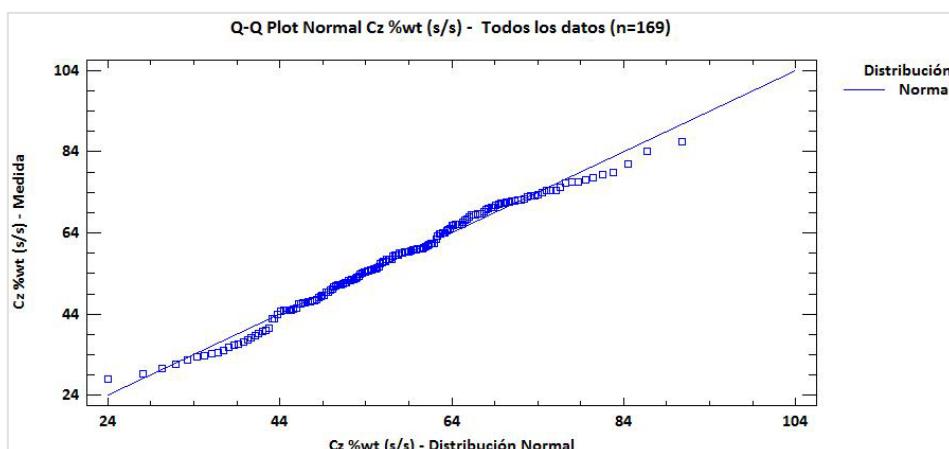


Fig. 37: Q-Q plot normal para Cz %wt (s/s) realizado con Statgraphics Centurion v16.1.03.

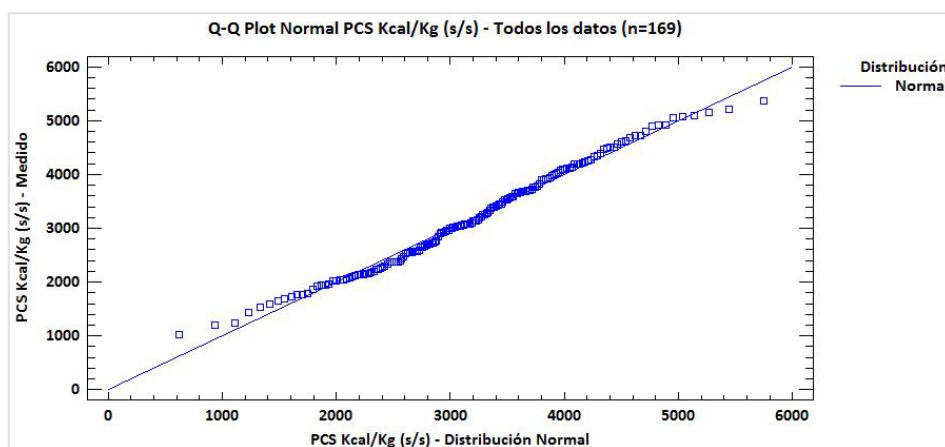


Fig. 38: *Q-Q plot* normal para PCS Kcal/kg (s/s) realizado con Statgraphics Centurion v16.1.03.

Tabla 7: Prueba de bondad de ajuste de Kolgomorov-Smirnov realizada con Statgraphics Centurion v16.1.03.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov		
	Cz %wt	PCS Kcal/kg
DMAS	0,033327	0,0543924
DMENOS	0,0500896	0,0366686
DN	0,0500896	0,0543924
Valor-P	0,790206	0,699383

Un segundo análisis exploratorio de datos (EDA) se realizó evaluando el comportamiento de las muestras (obtenidas cada 0,50 m), por tramos, definiéndose a éstos como T1 (0,00-0,50 m), T2 (0,50-1,00 m), T3 (1,00-1,50 m), T4 (1,50-2,00 m) y T5 (2,00-2,50 m). Las 7 muestras (4% del total) que poseen longitudes mayores a 0,50 m, han sido divididas en tramos de dicha longitud y es por eso que en las tablas el número total de muestras puede aparecer como 176 y/o 173. En este último caso porque 3 de ellas han alcanzado una profundidad mayor a 2,50 m.

Los gráficos y resultados del EDA, tales como histogramas y gráficos de dispersión (*scatter plots*) por tramos, se presentan en el [Anexo 2](#), para mayor detalle.

El gráfico de cajas (*Box plot*) de la Fig. 39 permite visualizar como el valor medio de Cz va aumentando en profundidad del T1 al T4 para finalmente disminuir en el T5, nivel más profundo de este muestreo. No se visualizan valores anómalos (*outliers*). El PCS por su parte presenta un comportamiento inverso (Fig. 40) como era de esperarse por la correlación inversa verificada previamente.

La aplicación del análisis exploratorio de datos se extendió también a una evaluación espacial de la información (EDAS o ESDA) con las herramientas para análisis de tendencias (*Trend Analysis*) y mapas de Voronoi (*Voronoi Map*) que forman parte de la extensión *ESDA TOOLS* del software ArcGIS v10.3. En esta línea se presentan en la Fig. 41 y Fig. 42 dos gráficos generales que se explicarán a continuación, pero pueden consultarse todos los escenarios posibles, en las figuras del [Anexo 2](#).

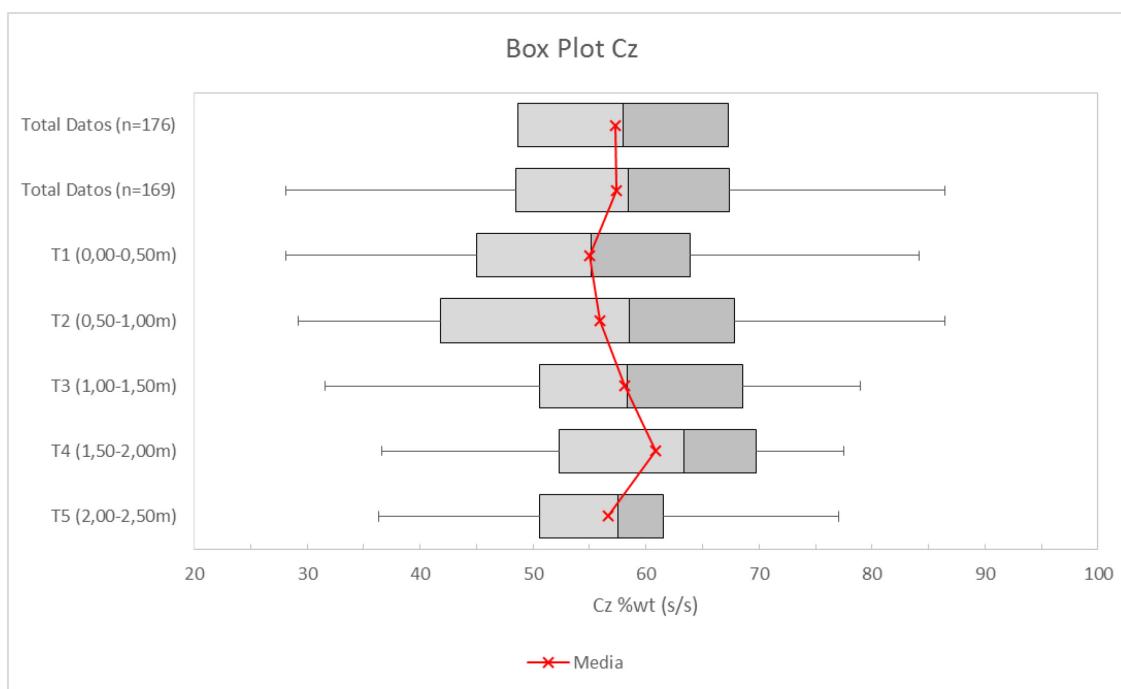


Fig. 39: Box Plot para Cz (realizado en Excel 2016) donde se puede visualizar la variación en dicho parámetro estudiando cada tramo y la totalidad de los datos.

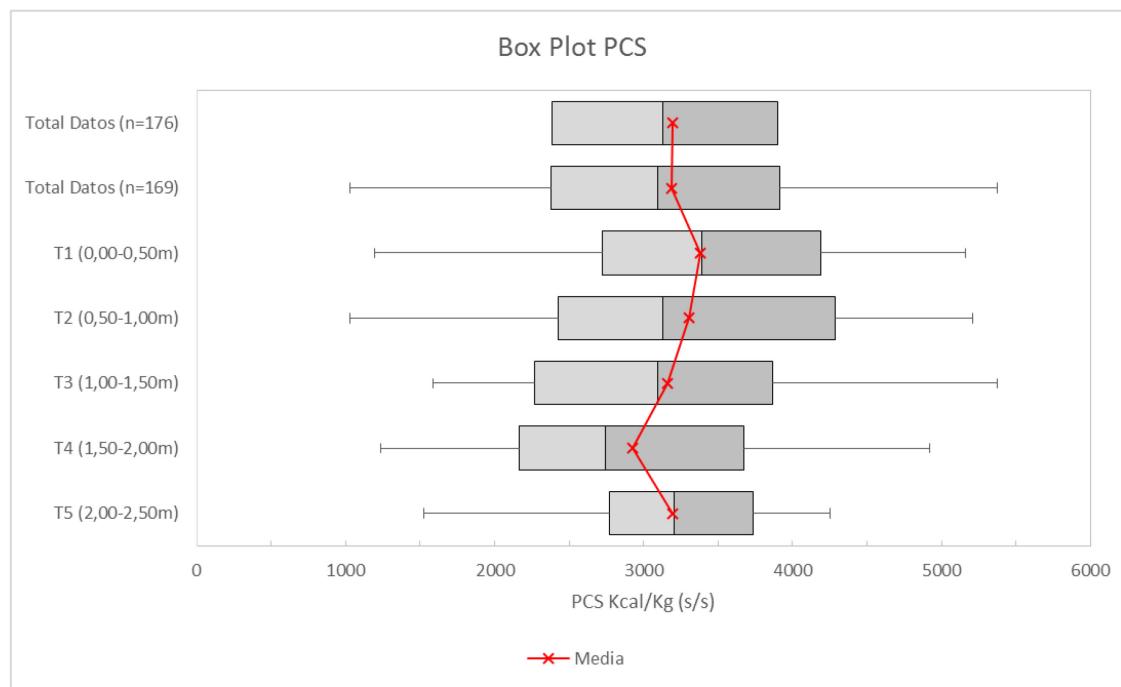


Fig. 40: Box Plot para PCS (realizado en Excel 2016) donde se puede visualizar la variación en dicho parámetro analizando cada tramo y la totalidad de los datos.

Se evaluaron otros aspectos (en este caso por tramos), independientes de la normalidad corroborada más arriba, para poder determinar si la población que vamos a modelar es estacionaria y si presenta tendencias. En esta línea es fundamental incluir la variable espacial, que luego deberá ser estudiada en el modelo de bloques.

En el caso de la isotropía en los datos, se verificó que la distribución de Cz presenta tendencia en dirección W-E y N-S. La Cz disminuye hacia el centro de la pileta al analizar la dirección de descarga (W-E) y hacia las paredes laterales en dirección N-S (Fig. 41).

La condición de estacionariedad, que significa que la media y la varianza son iguales en toda la zona y que la correlación entre dos observaciones sólo depende de su posición relativa en el espacio, tampoco se verificó (visualmente) para los datos utilizados. Esto se puede observar en el mapa de Voronoi de la Fig. 42, correspondiente al tramo T1.

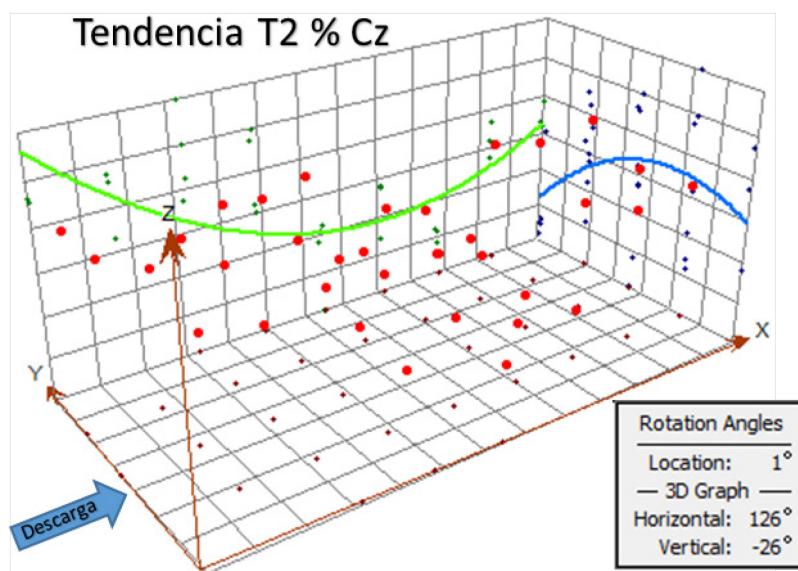


Fig. 41: *Trend Analysis* para T2 (0,50m-1,00m) en ArcGIS v10.3 donde se identifica la tendencia W-E (verde) y N-S (celeste). El menor contenido de Cz se encuentra hacia el centro y laterales N-S. El eje Z representa Cz %wt.

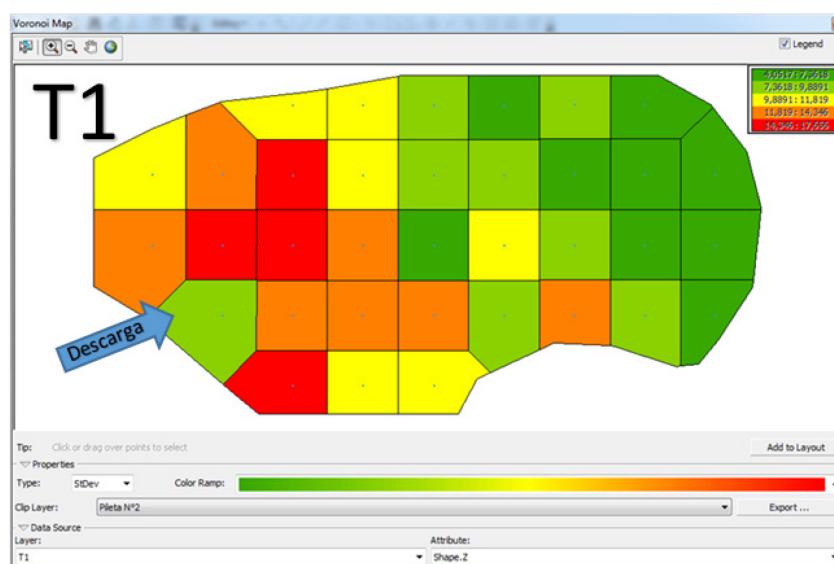


Fig. 42: *Voronoi Map* de desviación estándar para T1 (0,00m-0,50m) en ArcGIS v10.3. Se visualiza cómo en las proximidades de la descarga, la variación de la desviación estándar de Cz es mayor que en la dirección más lejana. Rojo indica mayor variación de la desviación estándar y verde menor variación.

Los materiales descriptos en el apartado [7.1](#) fueron reagrupados para poder abordar el proceso de modelamiento 3D en base a los criterios definidos en el apartado [4.4.2](#) y los observados en este apartado.

La primera complejidad encontrada durante el proceso se debió a las estrechas intercalaciones, sumado a una fuerte heterogeneidad y escasa potencia, junto con la difícil correlación lateral. Dadas estas características intrínsecas a la distribución de los materiales se decidió generar un flujo de trabajo (Fig. 43) que permitiera evaluar “la potencialidad de re-utilización” del carbón de la piletta de lodos de manera simplificada. Este flujo consistió en:

1. Disminuir el detalle en la descripción de cada nivel identificado hasta lograr definirlo con un único material (Fig. 43 A, B y C).
 2. Con el software Leapfrog Geo 4.4 se realizó un *majority composite* de 0,50 m de longitud, de manera tal que cada tramo muestreado sea descripto con un único material. Este compósito lo que hace es asignar a cada tramo el material que presenta una mayor longitud, y en el caso que los materiales representen el mismo porcentaje se le asigna el que aparece más cerca de la boca de pozo. De este modo se logra unificar la longitud de la muestra analizada con el material que la compone (Fig. 43 D).

Finalmente, con el software Micromine v11.0.0 se hace un *geology compositing* para agrupar tramos consecutivos con el mismo sedimento (Fig. 43E). El modelo geológico se realizó sobre esta base.

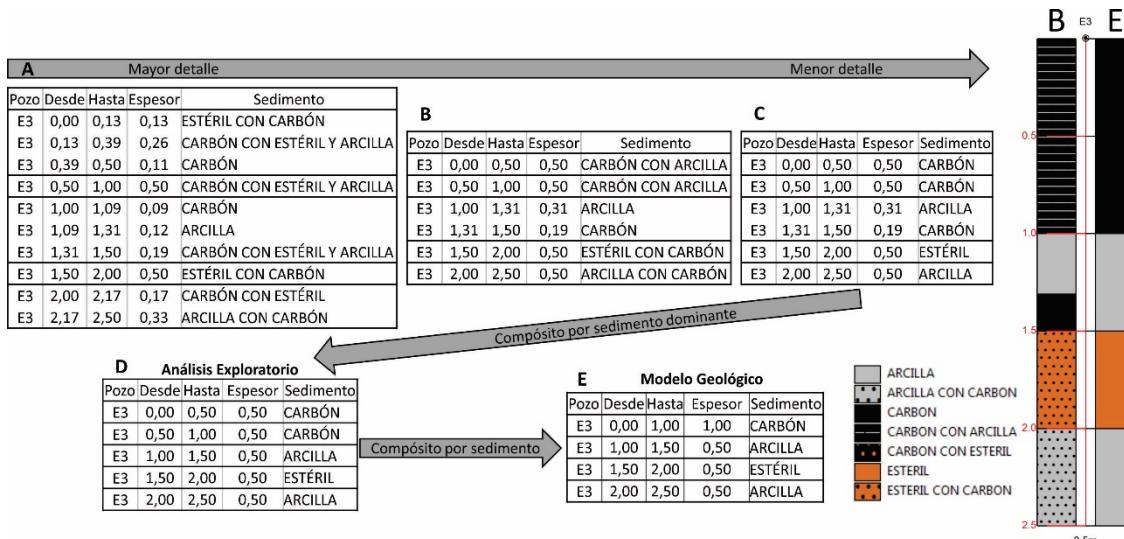


Fig. 43: Flujo de trabajo para obtener la longitud y descripción de los sedimentos utilizados en el modelo geológico. Se muestra el Pozo E3 con descripción de sedimentos del paso B y del paso E extraído del software Micromine v11.0.0 (exageración vertical 5 veces).

Un tercer análisis exploratorio de datos se realizó luego de la simplificación de los intervalos con los siguientes resultados. La distribución de Cz por sedimentos representada en el Box Plot de la Fig. 44 y su resumen estadístico que se muestra en Tabla 8 evidencian que, como era de esperar, el material con menor contenido medio de Cz es el carbón (50,1 %wt) y el material con mayor contenido de Cz es el estéril (69,8 %wt). Sin embargo, el primero que constituye el 55% del material muestreado presenta la mayor dispersión en sus valores como lo indica su RSD% del 20%. La arcilla por su parte es el material menos abundante (15%) y con un contenido medio de Cz de 58,71 %wt. Los tres sedimentos presentan distribuciones asimétricas, carbón y estéril negativa, mientras que arcilla levemente positiva.

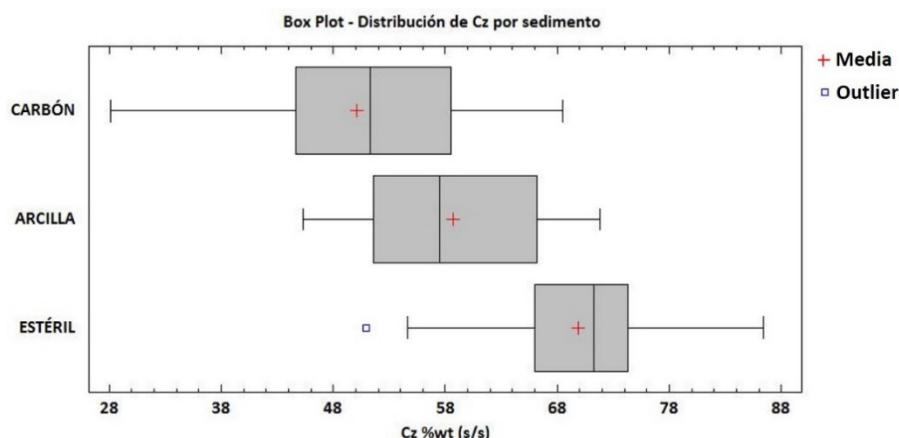


Fig. 44: Box Plot (con Statgraphics Centurion v16.1.03) donde se representa la distribución de Cz en los distintos sedimentos.

Tabla 8: Resumen estadístico del análisis por sedimentos de Cz %wt (s/s) obtenido con Excel 2016 y que se representa en Fig. 44.

Parámetro	CARBÓN		ARCILLA		ESTÉRIL	
	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)
Media	50,10	3.767,11	58,71	3.121,58	69,84	2.175,69
Error típico	1,00	73,91	1,53	116,86	1,01	69,14
Mediana	51,28	3.707,80	57,47	3.210,32	71,29	2.138,94
Moda	#N/A	#N/A	68,65	2.366,42	60,15	3.008,72
Desviación estándar	9,86	727,94	7,79	595,88	7,36	503,31
CV	0,20	0,19	0,13	0,19	0,11	0,23
RSD%	19,67	19,32	13,27	19,09	10,53	23,13
Varianza de la muestra	97,13	529.901,05	60,70	355.071,33	54,13	253.324,38
Curtosis	-0,72	-0,79	-1,11	-1,03	0,43	0,66
Coeficiente de asimetría	-0,35	0,19	0,09	-0,04	-0,47	0,27
Rango	40,38	2992,18	26,50	2.087,88	35,51	2.460,05
Mínimo	28,11	2379,00	45,30	2.129,56	50,91	1.025,55
Máximo	68,49	5371,17	71,79	4.217,44	86,42	3.485,60
Suma	4.859,81	365.409,53	1.526,52	81.160,98	3.701,71	115.311,64
Cuenta	97	97	26	26	53	53
Nivel de confianza(95,0%)	1,9863	146,7130	3,1468	240,6806	2,0278	138,7304

Como se ha mostrado a lo largo de todo el capítulo, el estudio estadístico demuestra que ambas variables presentan una fuerte correlación y que provienen de distribuciones normales. Esto nos permite inferir que estamos en condiciones de emplear métodos geoestadísticos para

determinar la distribución de Cz y PCS. También se corroboró que el poder calorífico superior (PCS) es extremadamente dependiente del contenido de ceniza (Cz), por lo que se decide continuar analizando y modelando solamente ésta última variable. Esta decisión se fundamenta en que la Cz constituye uno de los parámetros de diseño de las centrales térmicas (junto con la humedad) y es por ello que su determinación y control constante es determinante (Sloss, 2014).

7.3. Modelamiento 3D

7.3.1. Modelamiento geológico de los sedimentos

El primer ejercicio de modelamiento en 3D se hizo para obtener la distribución de los distintos materiales presentes en la pileta, con el fin de identificar, caracterizar y cuantificarlos los tres materiales (carbón, arcilla, estéril) en el espacio. Esto permitirá constreñir la extensión del modelo de bloques numérico para que las estimaciones sean consistentes.

El flujo de trabajo utilizado con el software Leapfrog Geo v.4.4 consistió en:

1. Definir la topografía con los datos de los *collars* (36) y una serie de puntos (101) distribuidos al azar sobre la superficie de la pileta (Fig. 45). Esta información fue relevada por la División Topografía de Mina de YCRT.

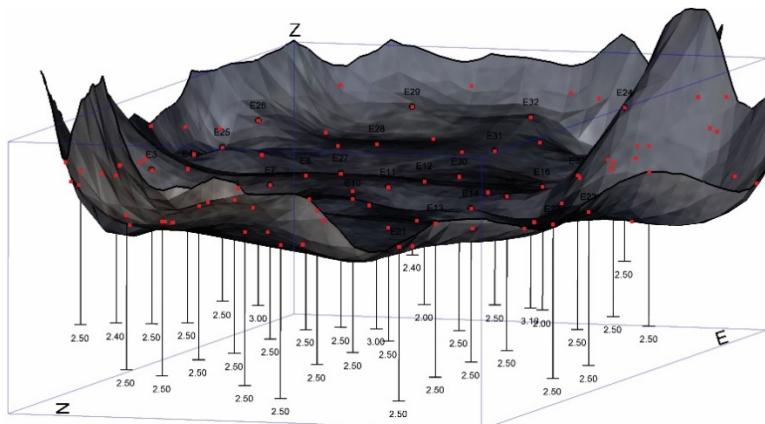


Fig. 45: Visual 3D de la topografía generada a partir de la cota de los pozos y puntos topográficos. Exageración vertical 10 veces.

2. Validar la información topográfica, los análisis, las descripciones de los sedimentos Y simplificar y componer la información geológica hasta obtener los datos que se muestran en la Fig. 43E. Visualizar en 3D los sedimentos (Fig. 46).

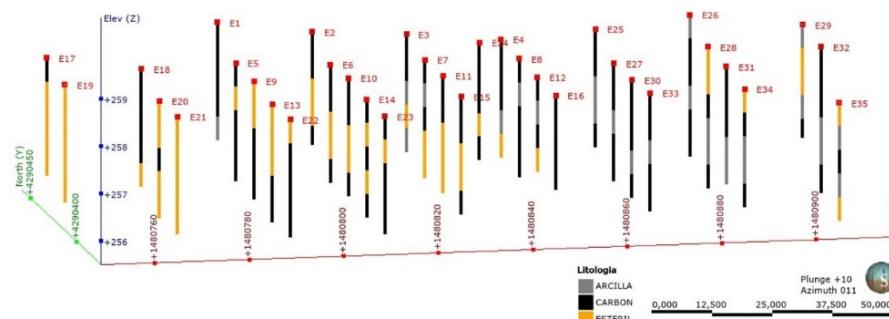


Fig. 46: Visual 3D hacia el NNW de los materiales identificados en la Pileta de Lodos. Exageración vertical 10 veces.

3. Construir las superficies que delimitan cada tipo de sedimento. Como estos se intercalan verticalmente en los pozos, para poder modelarlos se los correlacionó y agrupó considerando la naturaleza del proceso de depositación con la función *Group Lithologies*. De los 3 descriptos inicialmente (“Litología”) se pasó a 9 (“Ubicacion_en_3D”) como se puede ver en Fig. 47. Este agrupamiento que se realizó para facilitar el modelado, al momento de construir las superficies trajo algunas complicaciones. Por esta razón, sólo se trabajó con Carbón Superior, Carbón Inferior, Arcilla Intermedia (denominada arcilla en las visuales de los sólidos 3D), Estéril Superior y Estéril Inferior por ser los menos complejos de modelar.

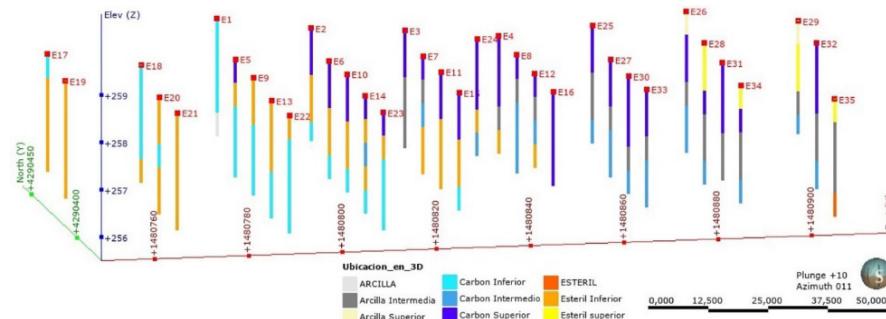


Fig. 47: Visual 3D hacia el NNW de los materiales identificados en la Pileta de Lodos. “Ubicacion_en_3D” son los sedimentos resultantes del agrupamiento realizado con la función *Group Lithologies*. Exageración vertical 10 veces.

4. Finalmente se construyeron los sólidos para así cuantificar el volumen que ocupa cada material (Fig. 48). Los volúmenes se reportan en Tabla 9 donde, del total estimado, el 63% corresponde a carbón, 26% a estéril y 11% a arcilla.

Tabla 9: Reporte de volúmenes en Pileta de Lodos Nº 2, por tipo de material, calculado con Leapfrog Geo v.4.4.

Material	Volumen (m ³)
Estéril Superior	650,2
Estéril Inferior	9.080,0
Carbón Inferior	14.181,0
Carbón Superior	9.962,9
Arcilla Intermedia (Arcilla)	4.361,3
Total	38.235,42

La herramienta *New Evaluation* permite valorar con qué precisión los sedimentos descriptos en los pozos son modelados. En la Fig. 49, en la ventana de la izquierda valores altos de *Matching Percent* indican que el modelo ajusta con buena precisión el material descripto en el pozo; mientras que la ventana de la derecha muestra qué valores modelados (sólidos) describen el material (*Drilling Lithology*) seleccionado. Los sólidos modelados que corresponden a Carbón Inferior, Carbón Superior, Estéril Inferior, Estéril Superior y Arcilla Intermedia (Arcilla) como puede observarse en la Fig. 49 ajustan con más del 87% de precisión los materiales muestreados. Para el caso de los demás sedimentos cuyo *Matching Percent* es 0 %, solo merece ser analizado

el Carbón Intermedio ya que los restantes materiales constituyen un porcentaje despreciable del total de metros perforados.

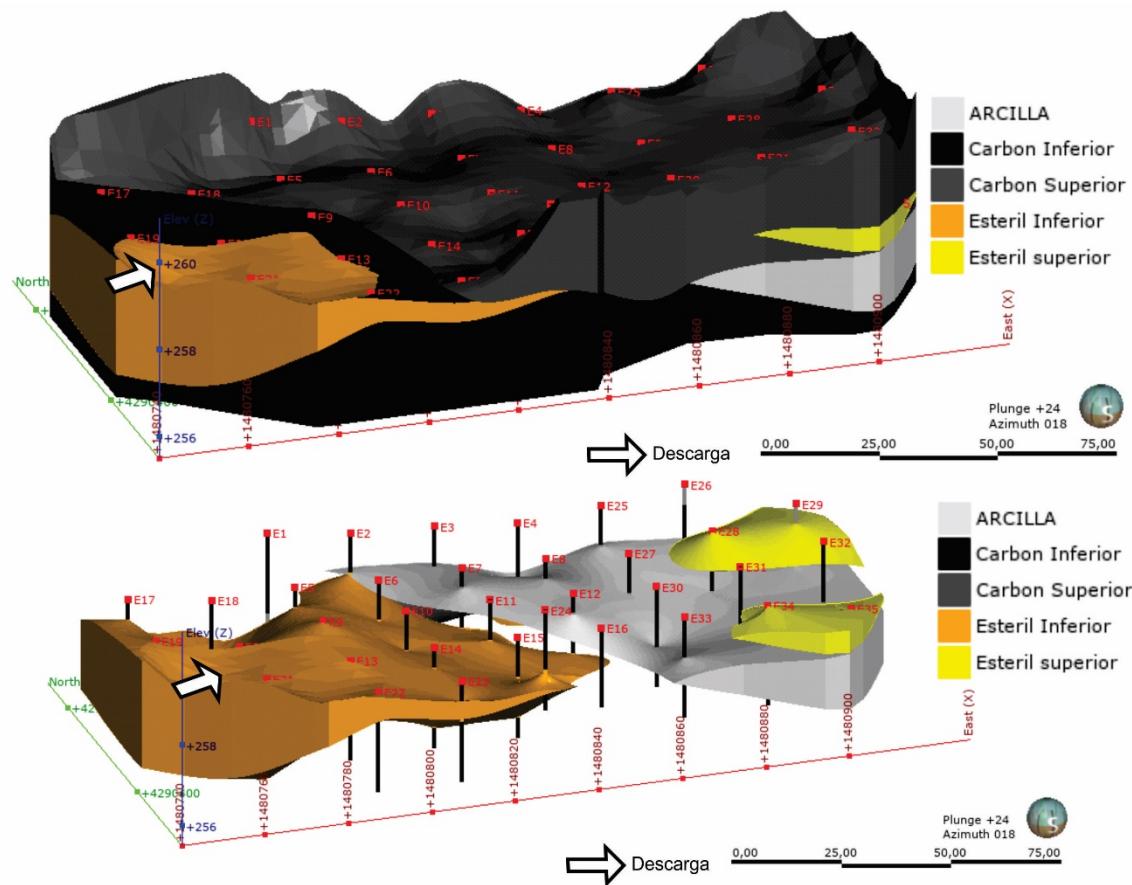


Fig. 48: Visual 3D donde se pueden ver los sólidos modelados con Leapfrog Geo v4.4. Debido a que se modeló una única arcilla (esta equivale a arcilla intermedia). Exageración vertical 10 veces.

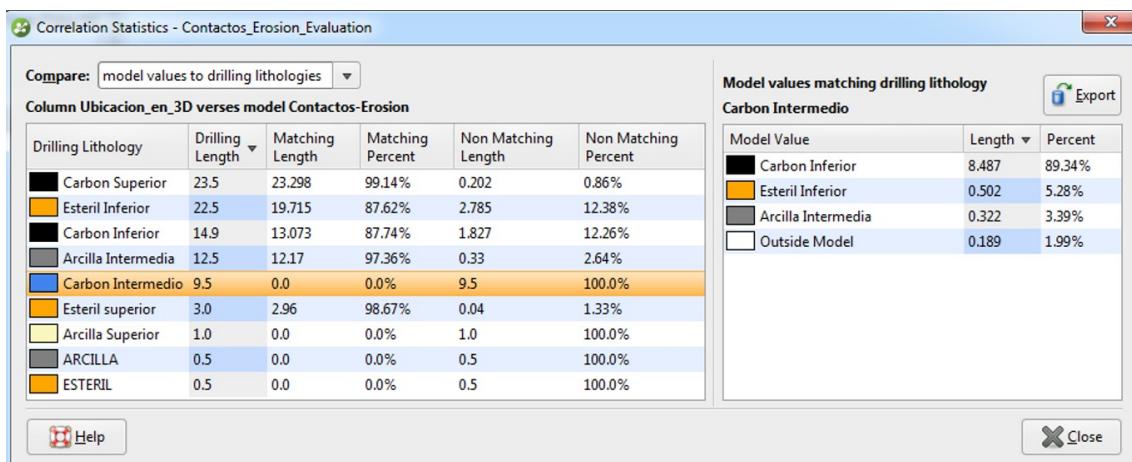


Fig. 49: Reporte de la estadística de la herramienta *New Evaluation* de Leapfrog Geo v.4.4. A la izquierda se ve el ajuste del sedimento con el correspondiente modelo; a la derecha se muestra los sólidos que describen el sedimento seleccionado, en este caso es Carbón Intermedio.

Al observar en detalle el Carbón Intermedio (notar que en Fig. 49 está seleccionado), podemos ver que está modelado como carbón en un 89,34% y el restante 10,66% no es carbón (8,67% de

estériles y 1,99% está fuera de los límite del modelado). De este modo, si bien el Carbón Intermedio no se modeló como tal, está compuesto por carbón y corresponde a Carbón Inferior (en un 89,34%). En las Fig. 50, Fig. 51 y Fig. 52, se puede observar la distribución de los materiales en la Pileta de Lodos N°2 en diferentes direcciones.

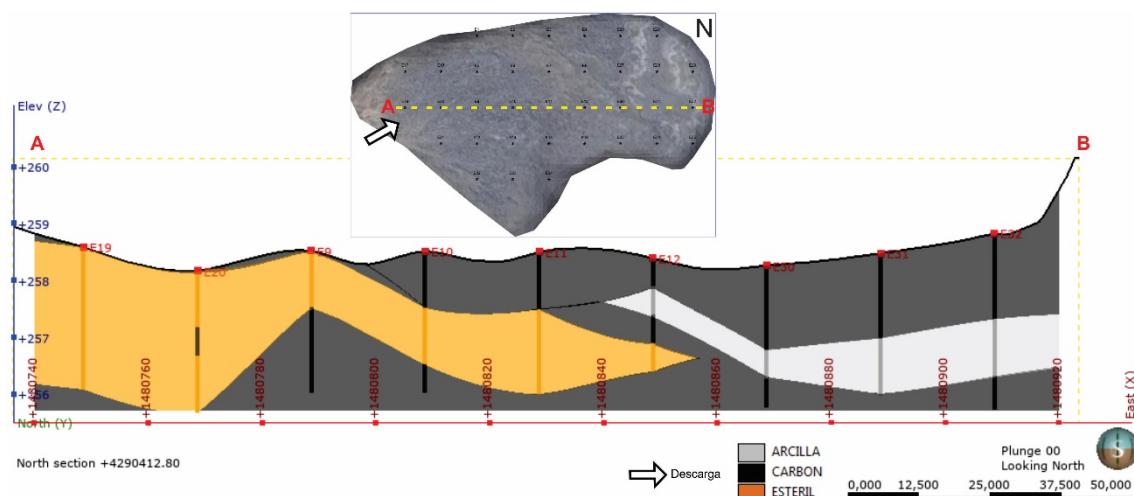


Fig. 50: Sección W-E, con vista al N, donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón. Exageración vertical 10 veces.

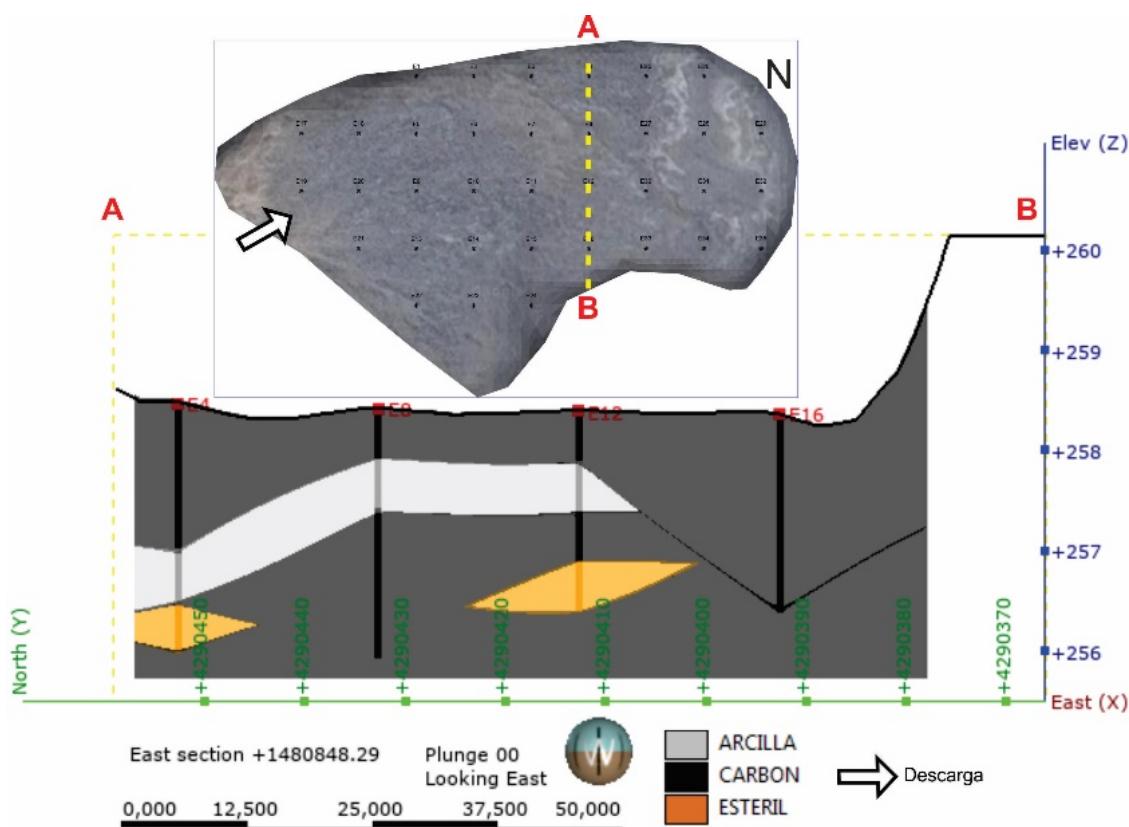


Fig. 51: Sección N-S, con vista al E, donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón. Exageración vertical 10 veces.

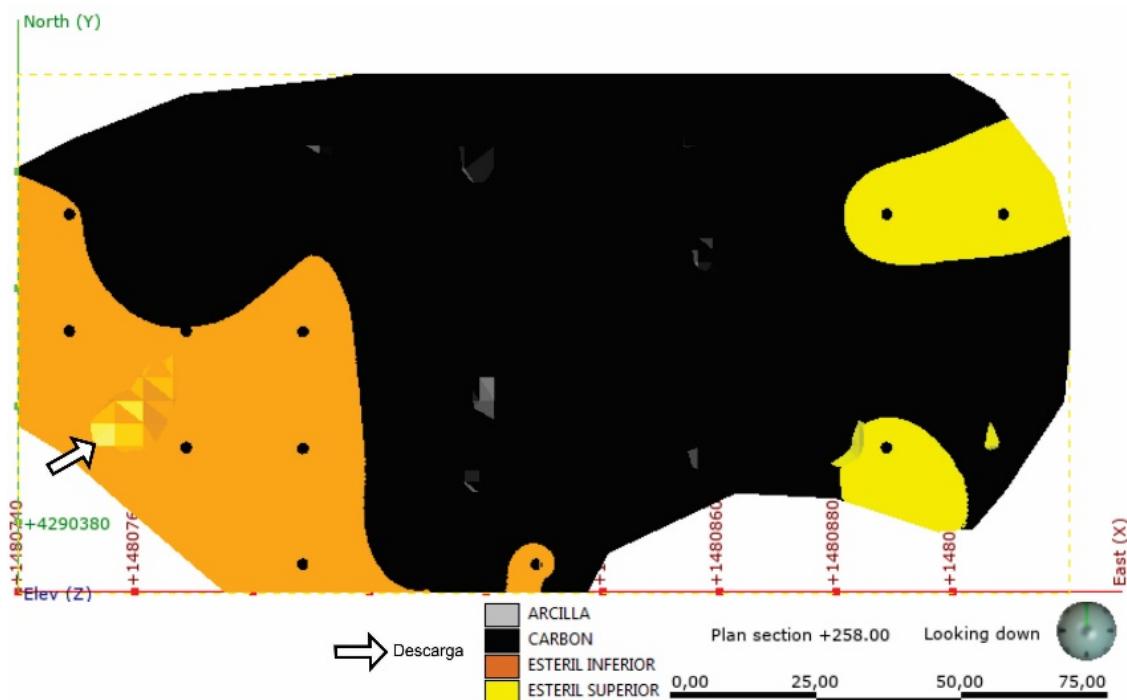


Fig. 52: Vista en planta, cota 258 m.s.n.m., donde se puede visualizar la distribución de los materiales modelados. Para los fines prácticos, se agrupó carbón superior e inferior como carbón.

Por lo expuesto previamente en los capítulos [4.4.2](#) y [7.3](#) referidos a los fundamentos teóricos de la distribución de materiales dentro de una pileta de lodos, y en función de los modelos obtenidos, se puede corroborar que los materiales depositados son extremadamente heterogéneos debido a los numerosos factores que actúan durante y posteriormente a la deposición.

En la Pileta de Lodos N° 2 se pudo identificar una zonación en función de parámetros físicos, entre los tres materiales definidos macroscópicamente, observando la siguiente distribución Fig. 53 y Fig. 54:

- El estéril que representa la granulometría más gruesa (arenas y limos) y elevada densidad de partículas ($2,6-2,7 \text{ g/cm}^3$), presenta su mayor potencia en las cercanías del punto de descarga y luego se va acuñando hacia el centro y la pared N de la pileta. Se observan también dos lentes (bolsones) en el extremo opuesto a la descarga (pared E) interpretados como resultado de la erosión generada por oleaje del agua sobrenadante sobre las paredes de la pileta.
- La arcilla cuya granulometría es la más fina de los materiales, y densidad mayor a la del carbón ($2,5-2,6 \text{ g/cm}^3$), se deposita en la zona más alejada de la descarga, a partir de la mitad de la pileta (aproximadamente 120 m del punto de descarga). Su mayor espesor se encuentra hacia el sector S de la pared E.
- El carbón, con partículas de granulometría variable (menor a 3 mm) y cuya densidad es la menor de los tres materiales presentes ($1,2-1,4 \text{ g/cm}^3$), se extiende por encima y por debajo del estéril a partir de unos 30 m del punto de descargada y continúa envolviendo a la arcilla en el extremo opuesto. Es el material dominante en la pileta y su mayor

espesor se alcanza hacia las paredes N y S del dique, sectores donde también se encuentran los menores tenores de Cz. Este último fenómeno puede estar asociado a que el carbón tiene menor densidad que el estéril y la arcilla, por lo cual corrientes transversales a la descarga (N-S) pueden dispersar las partículas de carbón hacia los laterales, mientras arcilla y estéril tienen a depositarse hacia el centro.

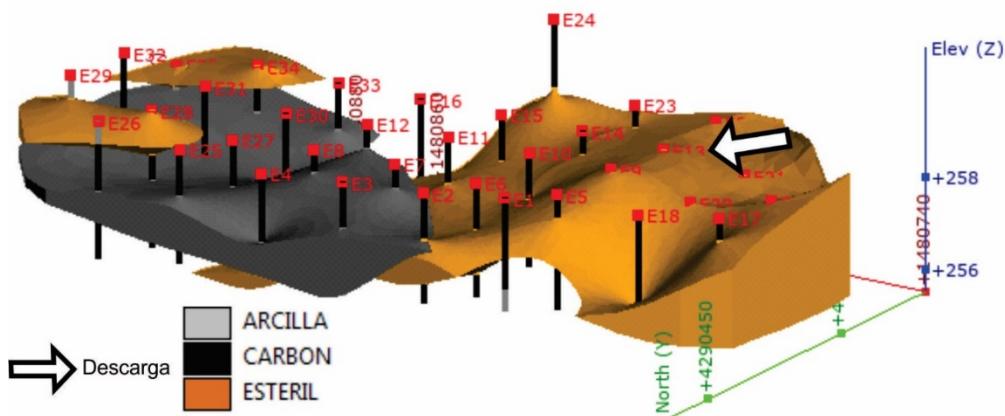


Fig. 53 Visual hacia el SE de la distribución de los estériles en la pileta de lodos. Exageración vertical 10 veces. Leapfrog Geo v.4.4

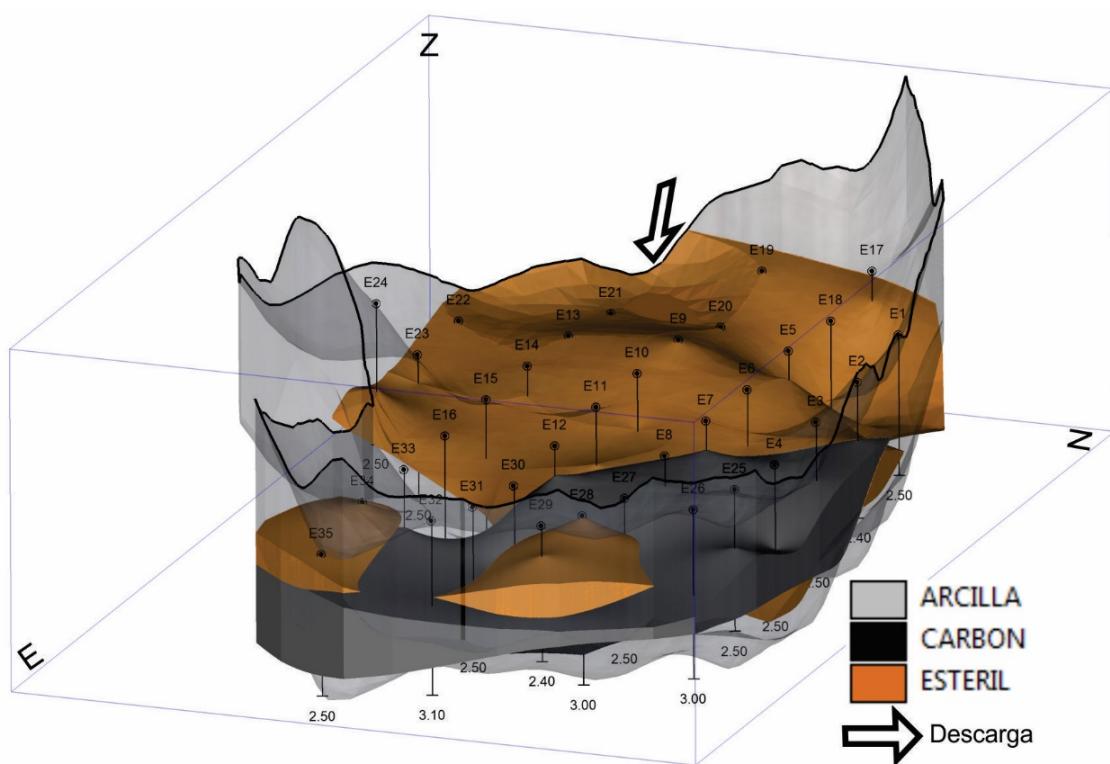


Fig. 54: Visual hacia el SW de la distribución de los estériles en la pileta de lodos. Exageración vertical 10 veces. Micromine v11.0.0.

7.3.2. Modelo de bloques de la variable Cz

Los modelos de bloque describen volúmenes con pequeños paralelepípedos, siendo herramientas muy usadas para evaluaciones de mina, estimación de recursos, entre otros. El

tamaño de los bloques debe decidirse en función del espaciamiento de los pozos y de otras consideraciones ingenieriles (Rossi, 2014), operativas y de diseño del método de explotación. Journel y Huijbregts (1978) proponen tamaños desde 1/3 a 1/2 de la separación entre datos de pozos como guías.

Según Sironvalle (2007) en términos mineros se define la geoestadística como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de los recursos mineros en la que expresa que una variable regionalizada es una función que representa la variación en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural.

La elección del método geoestadístico a utilizar depende de la naturaleza de la variable (heterogeneidad), el espaciamiento y regularidad de los datos disponibles, el proceso que la originó y/o depositó, la etapa de estudio en la que se encuentre la evaluación, entre otros.

Trabajos técnico-económicos como las normas internacionales que definen los reportes NI-43101 y Código JORC (McKinney *et al.* 2011 y Puritch *et al.* 2015) como así también trabajos académicos (Buttner *et. al.* 2017) referidos a estimaciones de recursos en diques de colas, se inclinan por la utilización de métodos estadísticos como es el caso del Vecino Más Cercano e Inverso de la Distancia por sobre el Kriging. Según Buttner *et. al.* 2017, los pre-requisitos de isotropía y estacionariedad que utiliza el Kriging no son válidos

Al ser la Pileta de Lodos un depósito antrópico con tendencias similares a las que se producen en la naturaleza, como la sedimentación y deposición de materiales por gravedad, granulometría, entre otros, pero no corresponder a un yacimiento mineral natural, se decidió utilizar algunos de los criterios de Journel y Huijbregts (1978) para estimar la Cz %wt en la Pileta N° 2, definiendo dos tamaños de bloques a modo de ejercicio comparativo. Uno de 10x10x0,5 m (1/2 de la separación entre pozos) y otro de 5x5x0,5 m (1/4 de la separación). Se mantuvo la altura del bloque en 0,5 m por corresponder a la longitud de las muestras.

Dado que no se cumplen los requisitos para la aplicación de Kriging Ordinario, como se ha demostrado en el apartado 6.3 y con el objetivo de entregar un modelo preliminar que pueda evolucionar en un futuro a través del uso de otros métodos de interpolación, se decidió utilizar en este trabajo el método de Inverso de la Distancia (*IDW*). Este asume que el valor de un atributo en una posición desconocida es una media ponderada de los valores conocidos dentro de una vecindad que rodea la localización no muestreada (Robinson y Metternicht, G. 2006). La fórmula del estimador, tomada de Burrough y McDonnell (1998) es:

$$\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}} \quad (6)$$

Donde x_0 es el punto a estimar y x_i son los datos dentro del radio de búsqueda. Los ponderadores (r) están relacionados con la distancia por d_{ij} , que es la distancia entre el punto a estimar y los datos. La fórmula tiene el efecto de darle a los datos cercanos al punto a estimar pesos relativamente grandes mientras que a los más lejanos menor influencia. A mayor peso (r) mayor influencia es dada a los valores cercanos a x_0 .

Al modificar el exponente (r), se varía la influencia que ejerce la distancia sobre el dato a estimar. Los exponentes más comunes son 2 y 3. El primero para atributos cuya variación es más suave; mientras que el segundo caso se utiliza cuando las variables a estimar son más erráticas.

El caso extremo es incrementar el exponente de modo tal que el único dato que tenga influencia sea el más cercano, siendo equivalente a la estimación del vecino más cercano (Rossi, 2014).

En función de la naturaleza errática de las variables en la Pileta de Lodos, se ha optado por utilizar $r = 3$ para las estimaciones. En cuanto al umbral (radio) de búsqueda se ha seleccionado 30 m, siendo 20 m la separación entre pozos esto permite considerar 6 datos en cada interpolación.

La estimación se realizó con el software Micromine v11.0.0 con las siguientes consideraciones:

1. El volumen a estimar (sólido o *wireframe*) quedó definido lateralmente por el perímetro interno de la pileta, mientras que el límite superior por la topografía y el inferior por la topografía desplazada 2,5 m en profundidad (Fig. 55).

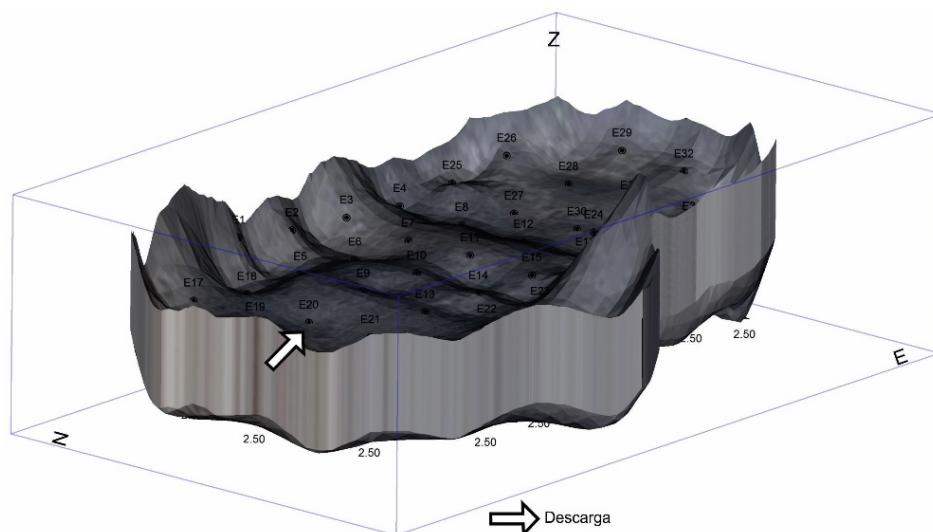


Fig. 55: Sólido (*wireframe*) que define el volumen dentro del cual se realizarán las estimaciones. Exageración vertical 10 veces.

2. Se construyeron dos modelos de bloques blancos (*blank block model*) de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m cortados con el sólido definido en el punto 1 (Fig. 56). A estos modelos se les asignarán los atributos estimados con los parámetros de los puntos 2, 3 y 4.

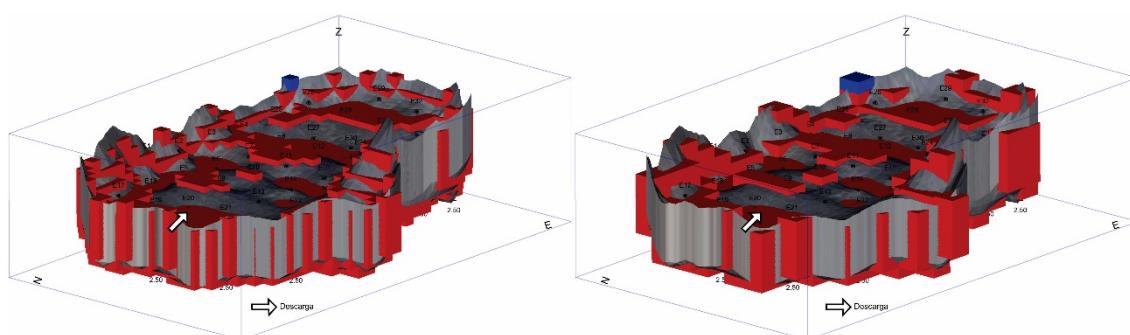


Fig. 56: Modelo de bloques blancos, se resalta el mismo bloque para apreciar la diferencia en tamaño de cada uno. Izquierda: bloques de 5x5x0,5 m; Derecha: bloques de 10x10x0,5 m. Los bloques están vacíos, solo poseen coordenadas x, y, z, por lo que el color no representa ningún atributo. Exageración vertical 10 veces.

3. Método de estimación Inverso de la Distancia (*IDW*).
4. Radio de búsqueda 30 m.
5. Potencia 3.

En Fig. 57 se muestra una captura de pantalla de Micromine v11.0.0 indicando los atributos seleccionados para la estimación de Cz mediante modelo de bloques.

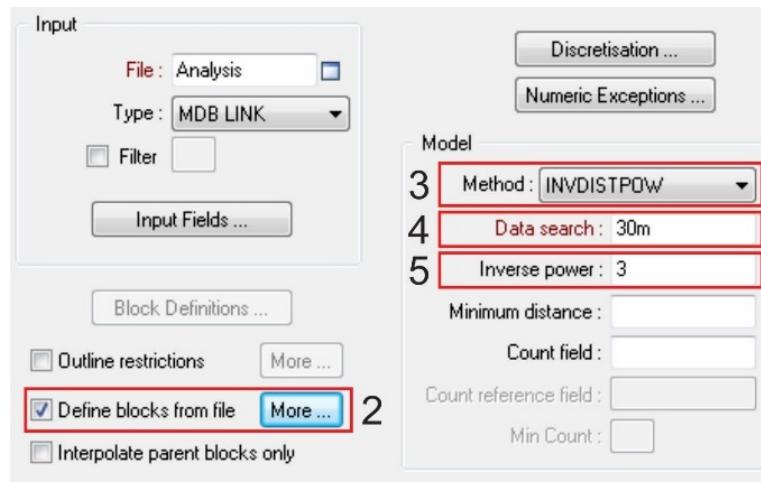


Fig. 57: Menú de selección de parámetros para la construcción de modelos de bloques en Micromine v11.0.0. Se destacan los parámetros utilizados y descriptos en los puntos 2 a 5.

6. Finalmente se setean (Fig. 58) los parámetros para el reporte del modelo de bloques utilizando un *cut off* para la variable Cz=43,97 %wt (s/s). Este valor está definido según reportes internos de YCRT (no publicado), como Cz=39%wt (*ar*) con Mar=11,3% para obtener los resultados en el modelo se utilizó la siguiente ecuación:

$$Cz \text{ (s/s)} = \left(\frac{100}{100 - M_{ar}} \right) \times Cz \text{ (ar)} \quad (7)$$

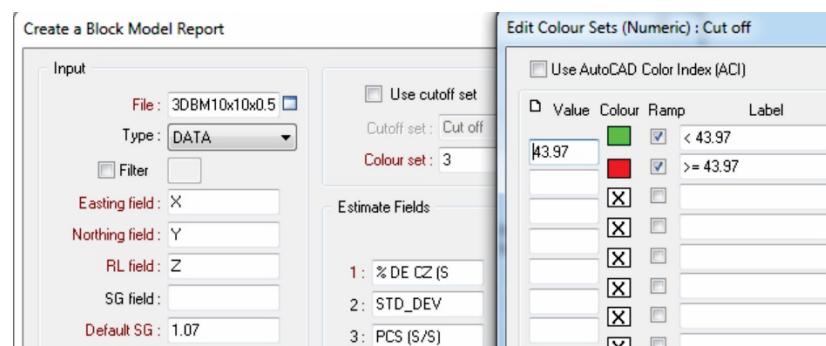


Fig. 58: Selección de parámetros para el reporte de modelos de bloques en Micromine v11.0.0. Nótese la selección del valor de *cut off*.

7.4. Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (EDAS) para el Modelo de Bloques

Habiéndose estimado el contenido de Cz para ambos modelos de bloques, es necesario evaluar los resultados mediante un nuevo análisis exploratorio. En este punto del proceso la información resultante tiene una componente espacial asociada; posición en el espacio del bloque (x, y, z)

en función del atributo estimado, por lo tanto, se realiza un nuevo EDAS a esta etapa de evaluación exploratoria (Haining, 1998).

Según lo reportado en Tabla 10, ambos modelos (10x10 m y 5x5 m) no presentan desviaciones significativas respecto de las muestras utilizadas para su construcción. Los dos sobreestiman el valor medio de Cz en un 2 % aproximadamente. Al comparar el gráfico de frecuencia acumulada (Fig. 59), se puede ver que ambos modelos subestiman tenores de Cz menores a la media de los datos, y sobreestiman por encima de ésta.

En ambos escenarios (subestimar o sobreestimar) el modelo de bloques más pequeño genera más diferencia que el modelo de bloques de 10x10 m. En cuanto al volumen, el modelo 10x10x0,5 m ocupa 212,5 m³ (0,53%) más que el de 5x5x0,5 m como se informa en Tabla 11, pero sin presentar ninguno de los dos, diferencias significativas con el sólido definido como límite de la estimación.

Siguiendo el criterio de Journel y Huijbregts (1978), de utilizar bloques con 1/2 de la separación entre pozos, la Pileta de Lodos N° 2 en el tramo de estudio comprendido entre la superficie topográfica y 2,50 m de profundidad ocupa un volumen de 39.950 m³ con un contenido medio de Cz del 58,34 %wt (s/s). El PCS medio estimado fue de 3.129,11 Kcal/kg, tal como se mencionó previamente no se realizó ningún EDA sobre este parámetro, pero resulta oportuno reportar su valor como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 10: Resumen estadístico de las estimaciones obtenidas con el modelo de bloques de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m para Cz %wt (s/s). Se incluye también la estadística correspondiente a las muestras recolectadas para su comparación

	Cz %wt (s/s)		
	Muestras	Modelo 10x10x0,5	Modelo 5x5x0,5
Nº Datos	169	799	3176
Media	57,39	58,34	58,42
Modelo-Muestra	-	1,66%	1,80%
Mínimo	28,11	28,22	28,22
Máximo	86,42	84,67	84,67
Rango	58,31	56,45	56,45
Error típico	0,97	0,32	0,15
Desviación estándar	12,60	8,99	8,37
Coeficiente de variación	0,22	0,15	0,14
Varianza	158,74	80,86	69,98
Curtosis	-0,55	0,24	0,00
Coeficiente de asimetría	-0,20	0,29	0,57

Para conocer la distribución de Cz %wt por tipo de material, se importó el modelo de bloques de 10x10x0,5 m creado en Micromine v11.0.0 a Leapfrog Geo v.4.4 y se lo restringió a los sólidos modelados previamente. Es necesario aclarar que no se pudo estimar Cz %wt por tipo de material, solamente se “recortó” el modelo de bloques con los sólidos, ya que la licencia

académica de Leapfrog utilizada, no habilita el set de herramientas que permiten seleccionar los mismos parámetros utilizados en Micromine v11.0.0.

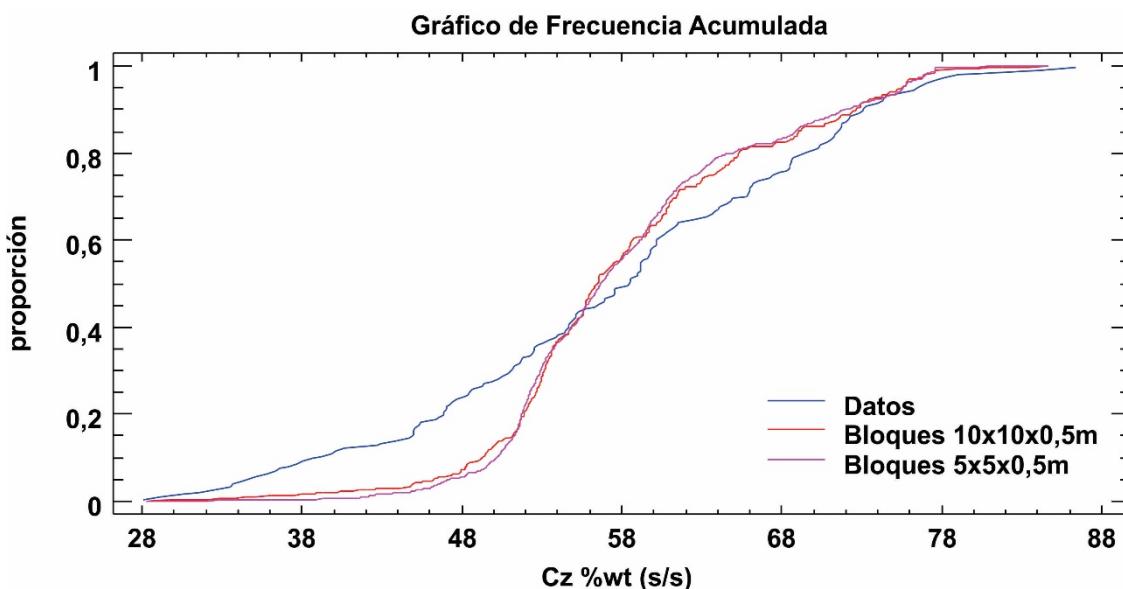


Fig. 59: Gráfico de frecuencia acumulada donde se comparan Cz de los datos, y las estimaciones.

Tabla 11: Reporte de volúmenes estimados con cada modelo de bloques y el correspondiente al sólido (*wireframe*) que los limita.

	Volumen (m ³)
<i>Wireframe</i>	39.813,4
Modelo 10x10x0,5	39.950,0
Modelo 5x5x0,5	39.737,5

El volumen de estimación en Micromine v11.0.0 es 15 % mayor (39.950 m³) en relación al que comprenden los volúmenes de los materiales individuales sumados (34.650 m³) estimados con Leapfrog GEO v.4.4 (Tabla 13). Esto es una consecuencia de lo explicado en el párrafo anterior, y se debe a que los límites de ambos modelos no se han podido compatibilizar en un 100%. Es posible también que los algoritmos de cálculo para volúmenes sean diferentes entre software, aspecto muy frecuente entre los diversos programas comerciales utilizados en minería.

En la Tabla 13 se puede observar que la arcilla y el carbón representan 25.200 m³ con un contenido medio de Cz %wt en torno al 55 %; mientras que el estéril comprende 9.450 m³ con un contenido medio que oscila entre 66 y 63 %wt. La escasa diferencia en los contenidos medios de Cz entre Arcilla y Carbón pueden estar asociados a que la primera enmascara (“atrapa”) partículas de carbón y/o a que frecuentemente aparecen intercaladas, por lo que en el proceso de compositado niveles con elevada presencia de carbón hayan sido definidos como arcilla.

En la Fig. 60 se puede observar gráficamente esto último, además de verse como el rango intercuartil es también muy similar (entre 7 y 8,5%).

Para poder visualizar en el espacio los bloques por tipo de material (Fig. 61), se utilizan los bloques calculados en Leapfrog GEO v4.4 con el interpolador RBF (*Radial Basis Function*), este interpolador es ligeramente diferente al IDW³ empleado para las estimaciones.

Tabla 12: Resumen estadístico de las estimaciones obtenidas con el modelo de bloques de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m para PCS Kcal/kg (s/s). Se incluye también la estadística correspondiente a las muestras recolectadas para su comparación.

	PCS Kcal/kg (s/s)		
	Muestras	Modelo 10x10x0,5	Modelo 5x5x0,5
Nº Datos	169	799	3.176
Media	3.185,67	3.129,11	3.121,17
Mínimo	1.025,55	1.157,66	1.157,66
Máximo	5.371,17	5.321,68	5.321,68
Rango	4.345,62	4.164,02	4.164,02
Modelo-Muestra		-1,78%	-2,02%
Error típico	74,44	23,64	10,78
Desviación estándar	967,72	668,12	607,70
Coeficiente de variación	0,30	0,21	0,19
Varianza	936.475,00	446.385,58	369.302,16
Curtosis	-0,71	0,30	0,14
Coeficiente de asimetría	0,13	-0,31	-0,64

Tabla 13: Resumen estadístico reportado por Leapfrog Geo v.4.4, donde se informan los resultados de restringir el Modelo de 10x10x0,5 m obtenido en Micromine v11.0.0 con los sólidos modelados en Leapfrog.

Cz %wt (s/s)	Modelo sin restringir	Arcilla Intermedia	Carbón Inferior	Carbón Superior	Estéril Inferior	Estéril Superior
Datos	799	79	208	217	175	14
Volumen (m³)	39.950	3.950	10.400	10.850	8.750	700
Media	58,34	55,35	56,40	54,11	66,12	63,24
Desviación estándar	8,99	5,97	6,72	7,07	8,78	4,48
Coeficiente de Variación	0,15	0,11	0,12	0,13	0,13	0,07
Varianza	80,86	35,64	45,10	49,92	77,16	20,03
Mínimo	28,22	35,07	36,71	28,22	44,70	57,94
Q1	52,65	51,88	52,33	51,65	57,43	60,83
Mediana	56,47	54,66	55,71	54,82	68,72	62,66
Q3	63,80	60,54	60,38	58,70	73,41	63,82
Máximo	84,67	68,77	75,93	67,50	84,67	75,24

No obstante, para el objetivo de poder correlacionar visualmente los contenidos de Cz con el tipo de material resulta válido. En la Fig. 61 se correlacionan visualmente los estériles (superior e inferior) con los mayores tenores de Cz (mayor detalle en [Anexo 3](#)). La arcilla, presenta bloques con menos Cz en comparación con los estériles. Mientras que para el caso del carbón, es el tipo de material con los menores contenidos de Cz, siendo el carbón superior el que presenta bloques con menor Cz.

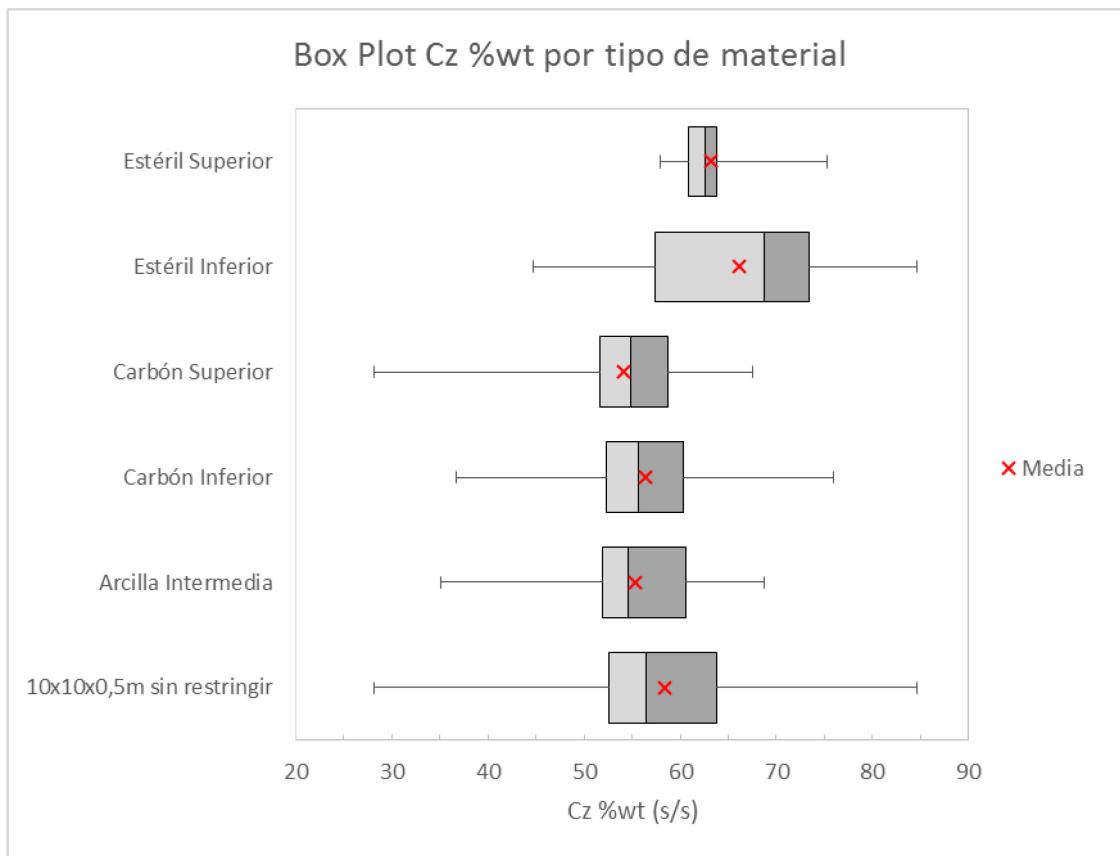


Fig. 60: Blox Plot (realizado en Excel 2016), donde se representan gráficamente los datos de la Tabla 13. Modelos de Bloques 10x10x0,5 m.

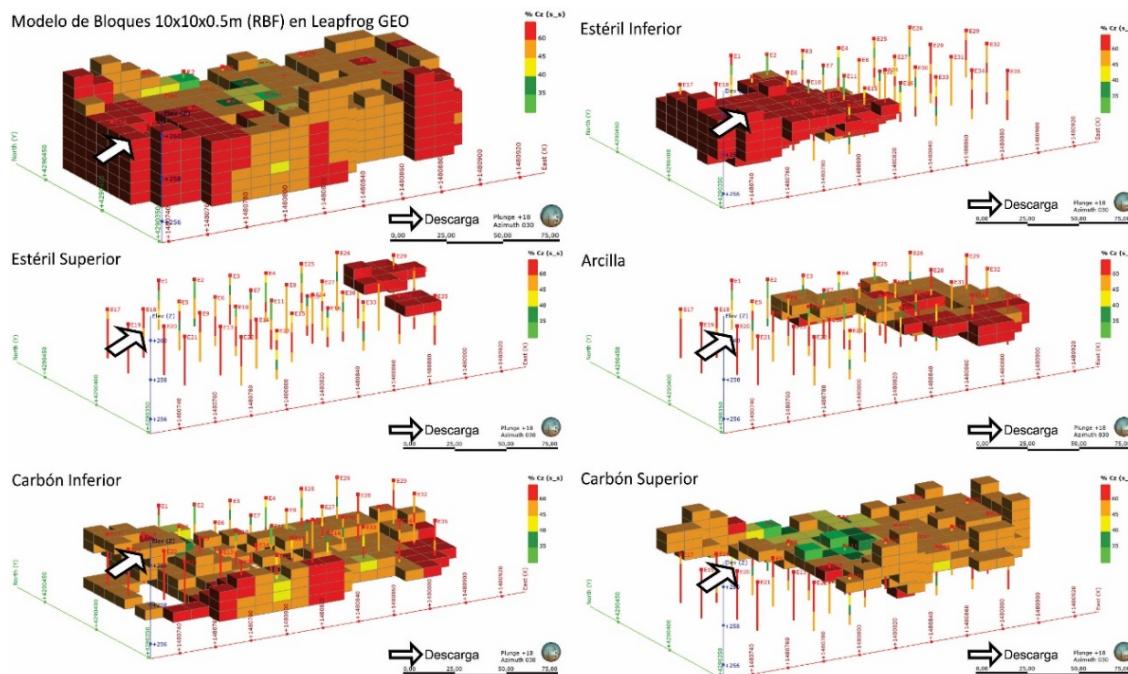


Fig. 61: Vista en 3D del modelo de bloques 10x10x0,5 m estimado en Leapfrog Geo v4.4 (RBF) sin restringir y restringiendo por tipo de material. Rojo indica mayor Cz y verde menor. Exageración vertical 10 veces.

7.5. Estimación de Tonelaje

Los sólidos modelados y las estimaciones de los contenidos de Cz fueron reportados en volumen, ya que para poder expresarlo en peso (toneladas) se debe conocer la densidad y/o peso específico de los materiales muestreados. La Pileta de Lodos N° 2, al momento de este estudio no cuenta analíticamente con esta propiedad, por lo que la determinación de las toneladas de carbón recuperables no es simple de calcular; esto se debe a la heterogeneidad de las densidades individuales de los sedimentos (arenisca y arcilla=2,5-2,7 g/cm³; carbón= 1,2-1,4 g/cm³; magnetita=4,6-5,0 g/cm³) y al nivel de saturación de algunas zonas de la pileta.

Los relaves o *tailings* son materiales granulares artificiales, por lo que son diferentes a la mayoría de los suelos naturales. No obstante, los principios de mecánica de suelos son aplicables en la caracterización y el comportamiento de los relaves (Jewell, 1998).

Para estimar un tonelaje en la pileta, se consideró a la misma como un suelo semi-saturado y se recurrió a elementos de la mecánica de suelos para su cálculo. Para ello se utilizaron los datos correspondientes a las 169 muestras.

En mecánica de suelos se relaciona el peso de las distintas fases que lo componen (sólido, líquido y gas) con sus volúmenes correspondientes (Fig. 62), por medio del concepto de peso específico o peso unitario (Badillo y Rodriguez, 2005).

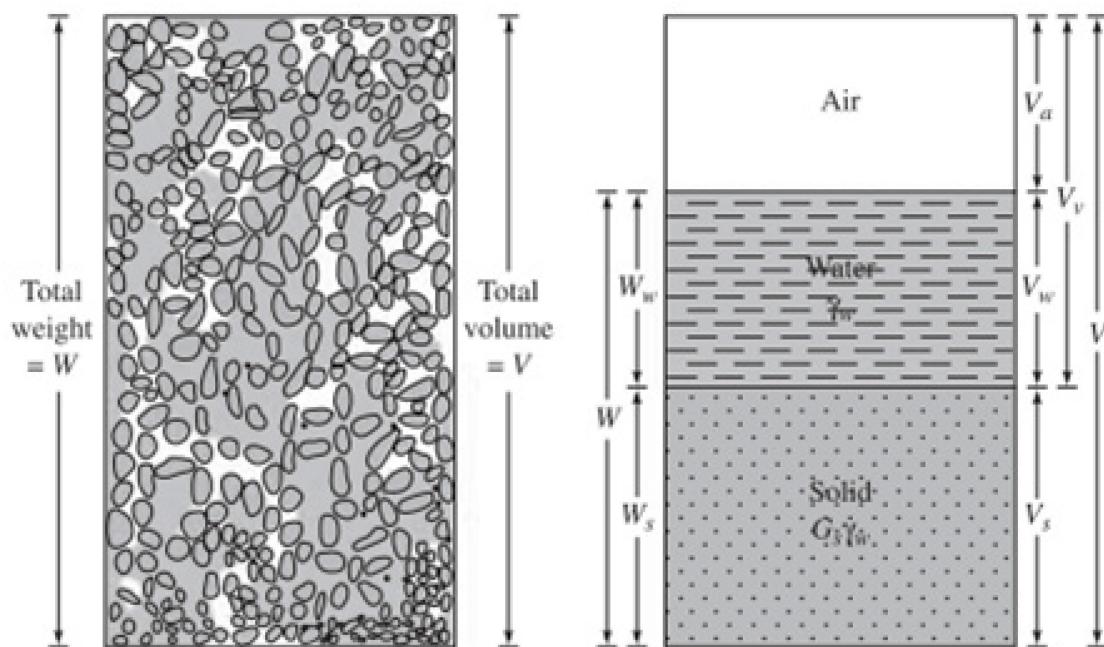


Fig. 62: ejemplo esquemático de un suelo donde se indican las tres fases que lo componen, junto con los pesos y volúmenes correspondientes a cada fase. A la izquierda un suelo “real” y a la derecha separado en fases para identificar la relación entre ellas. W= peso; V= volumen, w=agua, s=sólidos, a=aire, v=vacíos. Tomado de:

<http://www.civil.uwaterloo.ca/maknight/courses/CIVE353/Lectures/Week%202/phase%20relationships.pdf>

Al considerar a la pileta como un suelo húmedo (no saturado) se pueden diferenciar los siguientes pesos específicos:

- Peso específico húmedo (γ) que se define como:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} \quad (8)$$

- Peso específico seco (γ_d) que se define como:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (9)$$

El peso total (W) y el peso de los sólidos (W_s) fueron determinados por el laboratorio de YCRT, mientras que el volumen fue estimado al momento del muestreo por medición geométrica utilizando la ecuación de cálculo de volumen de un cilindro donde:

$$volumen = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (10)$$

r corresponde a la mitad del diámetro del tubo sacamuestra, 8,3 cm/2 y h a la longitud de muestra recuperada.

Otra propiedad gravimétrica interesante de calcular en la pileta es el contenido de humedad (w), que se determina por la siguiente fórmula:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100 \quad (11)$$

En el [Anexo 4](#) se puede ver con más detalle del cálculo y utilización de las ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

El contenido medio de humedad de la pileta es de 35,63%, con valores que oscilan entre el 6,67% y el 114,29%. Se debe aclarar que durante el muestreo hubo días con copiosas precipitaciones, por lo que la humedad es la existente durante el período de muestreo.

La pileta en consecuencia, considerada como un suelo no saturado presenta:

- Peso específico húmedo (γ) medio de 1,43 g/cm³; mientras que si se lo pondera por la longitud recuperada, es de 1,40 g/cm³.
- Humedad media de 35,63%.
- Peso específico seco (γ_d) medio de 1,07 g/cm³ y de 1,03 g/cm³ al ponderarlo por longitud recuperada.

Como se estimó en el Capítulo [7.4](#), la pileta ocupa un volumen de 39.950 m³ con un contenido medio de Cz de 58,34 %wt (s/s) de acuerdo al modelo de bloques de 10x10x0,5 m utilizado.

Empleando el peso específico seco calculado, la pileta hasta la profundidad investigada tiene un tonelaje total entre 42.746,5 t y 41.148,5 t dependiendo del valor de γ_d utilizado, como se muestra en la *Tabla 14* a modo de resumen.

Tabla 14: Tonelajes estimados con el peso específico seco promedio, y el ponderado. El ponderador utilizado fue la longitud de cada tramo muestreado.

Volumen (m ³)	γ_d (t/m ³) medio	Toneladas (t)	γ_d (t/m ³) ponderado	Toneladas (t)
39.950	1,07	42.746,5	1,03	41.148,5

A su vez, el cálculo de toneladas estuvo en función de la ley de corte (*cut off*) como se explicó en apartado [7.3.2](#) y los resultados se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15: Estimación de Tonelaje realizado con Micromine v11.0 con ley de corte (*cut off*) igual al parámetro de diseño de la Central Térmica de Río Turbio según informe interno de YCRT (no publicado).

Cut off Cz %wt (s/s)	V (m³)	γ_d (t/m³)	Toneladas (t)	Cz %wt (s/s)	V.Acum. (m³)	Ton.Acum. (t)	Cz %wt Ponderado (s/s)
<43,97	1.200	1,07	1.284,0	37,18	1.200	1.284,0	37,18
≥43,97	38.750	1,07	41.462,5	59,00	39.950	42.746,5	58,34

Referencias: V=volumen; t=tonelaje; Acum.=acumulado

Es necesario resaltar que tanto el peso (en seco y en húmedo) de las muestras como el volumen, no siguen los estándares que recomiendan las normas para el análisis en muestras de suelos. Por ello se destaca que los pesos específicos y en consecuencia los tonelajes estimados carecen de rigurosidad técnica.

Sin embargo, Hegazy *et al.* (2004) han preparado una base de datos donde se informan los resultados de numerosos ensayos geotécnicos realizados en piletas de lodo de carbón (*coal refuse disposal sites*) del oeste de Pensilvania (USA) e Inglaterra durante varios años y también los resultados recolectados por Chen (1976). Algunas de las propiedades evaluadas son el peso unitario total (γ) y el peso unitario seco (γ_d) de los lodos (FCR=fine coal refuse slurry) como se puede ver en *Tabla 16*.

Los resultados de la *Tabla 16* permiten demostrar que los pesos específicos (seco y húmedo) calculados en este trabajo son similares o están dentro del rango de valores calculados por Hegazy *et al.* (2004). De modo tal que, utilizando el valor medio estimado del peso específico seco con las muestras (n=169) respecto al valor medio del peso específico seco de Hegazy *et al.* (2004) hay una sobre-estimación de 5.992,5 toneladas totales (+16,3%).

Tabla 16: Resumen de pesos unitarios de FCR tomado y modificado de Hegazy *et al.* (2004)

Propiedad Índice	Media (t/m³)	Desviación Estándar (t/m³)	Coeficiente de Variación
γ	1,32	0,126	0,096
γ_d	0,92	0,149	0,162

8. DISCUSIONES

Las opciones de utilización del carbón fino (relaves) están condicionadas por la humedad y la gran variación en el contenido de Cz. Históricamente, *blending*, briqueteadoo y secado han sido adoptados para facilitar el uso del carbón fino (Lewitt, 2011). Para el re-procesamiento con vistas a la recuperación de carbón fino de relaves, es muy importante conocer la granulometría de las fracciones ricas en carbón, el grado de liberación y la composición maceral. Estos factores tienen

un fuerte impacto en la recuperación por flotación, método muy empleado en la actualidad para granulometrías en el rango 10-100 μm (Laskowski *et al.* 2007, Asghari *et al.* 2018). En este trabajo no se cuenta con datos de granulometría y esto representa una de las debilidades del modelo desarrollado. Es necesario contar con un análisis granulométrico completo preferentemente por el método de Difracción Laser lo que permitiría obtener una distribución granulométrica rápida, confiable y reproducible en un rango que normalmente va de 0,5 a 2000 μm (<https://www.atascientific.com.au/basic-principles-of-particle-size-analysis/>).

Otro estudio adecuado resultaría en el análisis de Cz y PCS por fracción granulométrica. Para ello se sugiere la combinación de tamizado en húmedo (*rotap*) para las fracciones mayores a 75 μm y con hidrómetro (método de sedimentación) para las fracciones menores a 75 μm . El tamizado en húmedo se sugiere por el alto contenido de arcillas plásticas de las muestras (ASTM D4749).

El mecanismo de muestreo utilizado en la Pileta de Lodos N° 2 presentó diversos beneficios tales como mantener la humedad “real” de los materiales ya que no se adicionó ningún fluido de perforación, escasa disturbación de las estructuras de deposición de los materiales, elevada recuperación ya que el material al ingresar por compactación actuaba como tapón impidiendo que se pierda el sedimento (las pérdidas se registraron en los niveles extremadamente saturados), el diámetro del tubo de muestreo (8,3 cm de diámetro) permitió obtener un volumen/peso de muestra representativo del intervalo muestreado, resultó en un método rápido y económico de fabricar. Pese a estos beneficios, a partir de la profundidad de 2,50 m el sistema comenzó a tornarse muy lento, y las roscas de las barras (no diseñadas para este método, sino para aire reverso) comenzaron a dañarse; es por esto que para alcanzar la base de la pileta se deberá adaptar el sistema o directamente utilizar un sistema automático.

El método más utilizado en la actualidad para este tipo de estudios es la perforación sónica (*Sonic drilling*). Es un mecanismo de perforación en el cual la energía resonante generada (alta frecuencia) es transferida a la corona a través de las barras de perforación a diferentes frecuencias sónicas (<https://www.boartlongyear.com>). Es decir, durante la perforación la energía resonante se combina con el movimiento de rotación. Las ventajas que presenta según (<https://www.sonicsampdrill.com/>) se deben a la alta eficiencia de penetración y máxima recuperación en una variedad de condiciones sub-superficiales, alta calidad en la toma de muestras en suelos secos y saturados, se puede utilizar sin fluidos (sin agua, sin aire o sin lodo); esta última ventaja lo convierte en un método de perforación altamente demandado para aplicaciones geotécnicas, obras civiles y en estudios medioambientales. En el caso de continuar investigando en profundidad la Pileta N° 2 y llegar hasta su base (8-9 m debajo de la superficie actual), se recomienda utilizar perforación sónica.

Desde el punto de vista geoquímico y mineralógico es necesario caracterizar los materiales mediante fluorescencia y difracción de rayos X (FRX-DRX) para determinar en detalle la composición de arcillas y estériles presentes. A su vez resultará clave en aspectos ambientales la determinación mediante ICP-OES/MS de la composición química de los elementos trazas en vistas de un posible impacto durante la re-utilización de los lodos cuando el carbón sea extraído. Las anomalías geoquímicas que los residuos puedan presentar determinarán su viabilidad como materiales que también pueden ser reciclados o que necesitan un proceso diferente de deposición final.

Otra oportunidad de mejora se presenta en el estudio de la densidad, abordando esta determinación en laboratorios acreditados. Esto resultará especialmente útiles para incorporar

la variable Peso Específico Seco al modelamiento de bloques para estimar un tonelaje más ajustado. Esta variable también puede ser modelada mediante IDW³ y ser correlacionada con el modelo geológico.

Considerando que el contenido medio de Cz hasta la profundidad estudiada (2,5 m) dentro de la Pileta de Lodos N° 2 es de 58,34 %wt (s/s) y el valor del carbón de diseño de la central Termoeléctrica Río Turbio, según informes internos de la compañía, es de 43,97 %wt (s/s), existe la posibilidad de realizar *blending* con el carbón depurado grueso y/o fino obtenido en Planta. Con la mezcla se podría obtener un tenor de Cz y de granulometría dentro de los rangos de operación de esta central. Es necesario resaltar que cada central se diseña para un tipo específico de carbón (Sloss, 2014) por lo que la ley de corte del contenido de ceniza puede variar fuertemente según el porcentaje de humedad afectando proporcionalmente al poder calorífico superior. Esta opción de *blending* (razón por la cual YCRT planteó en un primer momento la realización de este estudio) no debe ser rechazada con los resultados obtenidos en esta etapa inicial de evaluación. Pruebas de distintas proporciones de mezclas (*blending*) deben ser estudiadas para evaluar el comportamiento combustible que determinarán la viabilidad de estos supuestos.

Finalmente, la clave de todas las mejoras en la determinación de parámetros físicos, químicos y mineralógicos debe ir enfocada en la combinación de los modelos para que cada bloque estimado contenga la información de todas las variables estudiadas. El método estadístico empleado en éste trabajo puede en un futuro ser refinado, con una mayor cantidad de datos ya sea en profundidad y/o densificando (*infill*) la actual malla de muestreo. La elección de los métodos geoestadísticos también se verá afectada si se amplía la información.

Con los resultados de este trabajo se entiende que otros tipos de Kriging diferentes del Kriging Ordinario deben ser evaluados. El Kriging consiste en estimar la ley en un sitio o bloque a partir de una combinación lineal ponderada de los datos ubicados en una vecindad de este sitio o bloque (Ortiz, 2012). El estimador es una combinación lineal ponderada de los datos y, por lo tanto, el problema del Kriging se reduce a calcular los valores de los ponderadores que permitan obtener una estimación insesgada y con la mejor precisión posible, es decir, con un error de media nula y varianza mínima (Muñoz Tolosa, 2015). Sin embargo, uno de las principales limitaciones es el suavizamiento, es decir la subestimación de los valores altos y una sobreestimación de los valores bajos.

Para superar estas desventajas se puede recurrir a técnicas más sofisticadas como las simulaciones (Deutsch y Journel, 1998). Estas se basan en la interpretación de la variable regionalizada como una realización de una función aleatoria y construye múltiples realizaciones de esta función aleatoria (Rossi, 2014). Cada una constituye un escenario posible y por lo tanto permite tener una idea realista de la distribución de valores en el espacio. Así se pueden tener múltiples escenarios, con los cuales se pueden hacer análisis de riesgos, estimaciones, medición de la incertidumbre para determinar qué tan distintos son los escenarios.

Por lo expuesto, se sugiere realizar un estudio de simulación para evaluar la re-utilización de finos de carbón con fines térmicos en diversos escenarios variando Cz y granulometría, dos parámetros de diseño de la central Térmica de Río Turbio.

9. CONCLUSIONES

- Se corroboró la existencia de una fuerte correlación inversa entre Cz y PCS, como así también una distribución normal de ambos parámetros.
- La identificación de tendencias y la no estacionariedad en el parámetro Cz son criterios que indican que no es recomendable el uso de Kriging Ordinario (OK). Si bien se pueden utilizar otras variantes de Kriging, éstas son más complejas, y se considera que en esta etapa inicial de exploración no son necesarias.
- Dado que no es recomendable la aplicación de OK el mejor método estadístico para la naturaleza de los datos con los que se cuenta, es el Inverso de la Distancia (IDW). Éste es ampliamente utilizado en evaluaciones de recursos y reservas en diques de cola.
- El modelamiento 3D de los materiales presentes en la pileta, permitió determinar zonas con predominio de carbón, de estéril y de arcilla. Las distribuciones de estas zonas responden a los modelos conceptuales de diques de cola. El carbón, tiende a ubicarse en la zona central de la pileta, si bien se distribuye ampliamente dentro de la misma intercalándose con la arcilla y el estéril. Mientras que el estéril se concentra en las cercanías del punto de descarga, y la arcilla hacia la zona más alejada.
- Los sectores con menores tenores de Cz se localizan hacia las paredes N y S de la pileta, aproximadamente en dirección perpendicular a la descarga. En profundidad, se identificó una tendencia de aumento en el contenido de Cz.
- El volumen explorado hasta 2,5 m de profundidad (que no representa la profundidad real) es de 39.550m³, aproximadamente 1/3 del volumen total de la pileta.
- El contenido medio de Cz (s/s) fue estimado utilizando IDW, con potencia 3, y radio de búsqueda de 30 m, para bloques de 10x10x0,5 m y 5x5x0,5 m. Se verificó que no existen diferencias significativas (<2%) entre ambas dimensiones de bloques y respecto a la media calculada con las muestras.
- Se decidió utilizar el modelo 10x10x0,5 m (mayor tamaño) para cumplir con la recomendación de Journel y Huijbregts (1978), sobre la base de este modelo la pileta presenta un contenido medio de Cz 58,34 %wt (s/s) y PCS medio de 3.129,11 Kcal/kg.
- Se estimó el peso unitario (específico) medio, tanto húmedo (1,43 g/cm³) como seco (1,07 g/cm³). Con éste último, se calculó un tonelaje total de 42.746,5 t.
- Los valores estimados de peso específico se contrastaron con los calculados por Hegazy *et al.* (2004), corroborando que se encuentran dentro de los rangos aceptados internacionalmente.
- La ley de corte utilizada en este trabajo es de 43,97 %wt (s/s), valor recomendado en el diseño de la Central Térmica de Río Turbio. Los tonelajes calculados corresponden a 1.284,0 toneladas con contenido medio de Cz=37,18 %wt (s/s) para los valores debajo del *cut off* y 41.462,5 toneladas con contenido medio de Cz=59,00 %wt (s/s) para los valores por encima de esta ley de corte.
- Este trabajo propone la posibilidad de re-utilización del material de la pileta de lodos N° 2 como combustible en la central Térmica de Río Turbio, siempre que se realicen los estudios adecuados de *blending* con carbón depurado tanto para mejorar la Cz como para lograr una granulometría óptima, ya que el valor medio de Cz se encuentra por encima del parámetro de diseño.

- El estudio complementario a los fines térmicos del material de las piletas de YCRT, debe enfocarse también en la caracterización de todos estos pasivos con el fin de definir otras alternativas de reutilización, cumplir las reglamentaciones legales y ambientales vigentes y adelantarse de manera proactiva a los escenarios futuros para un correcto reciclado de los materiales.

10. AGRADECIMIENTOS

A la empresa YCRT por autorizar la utilización y publicación de los valores estimados a lo largo de todo este trabajo.

A Cristian Alvarado y Mauro Aranda por los momentos vividos como equipo de trabajo durante los años compartidos en la empresa y especialmente durante la etapa de muestreo.

A todas las personas que han aportado información bibliográfica y/o comunicaciones personales sobre YCRT, ya que es escaso el material de consulta pública.

A la Dra. Carolina Méndez por solicitar y conseguir la licencia académica del software Leapfrog Geo marca registrada de la empresa Seequent Limited.

A la MSc. Ariana Carrazana, directora del trabajo, por darle orden, sentido y fluidez a la información y datos finalmente presentados. Por las correcciones, aportes, observaciones, enseñanzas y el tiempo dedicado en sus momentos libres para llegar a buen puerto.

A Santiago Castillo por abrir las puertas del Laboratorio de YCRT, y principalmente por las charlas, discusiones y peleas referentes a carboquímica, al proceso de beneficio del carbón, a la CIENCIA y a la VIDA. Faltan las palabras para describir el sostén que fue a lo largo de este Trabajo Final Integrador.

Y finalmente, a Ceci por haberme acompañado en una aventura de casi 3 años, cuya etapa se cierra con estas líneas. Por ser la que me inspira, motiva, acompaña, la que pone su hombro para consolarme y darme fuerzas...pero más importante aún por ser la que me sigue bancando y eligiendo para estar a su lado. GRACIAS y TE AMO.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Agramonte, J., y Díaz, A., 1983, Inventario preliminar del carbón mineral en el Perú: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima, Perú, 77 p.
- Ahumada Rojas, O. G., 17 de octubre 2018. Auge de precios del carbón, otra mano para las cuentas del Gobierno. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/auge-del-carbon-ayuda-a-las-finanzas-de-colombia-282332>
- Archangelski, S., 1969. Estudio del paleomicroplancton de la Formación Río Turbio (Eoceno). Provincia de Santa Cruz. Ameghiniana, 6 (3): 181-218.
- Angelelli V., 1941. Los yacimientos de minerales y rocas de aplicación de la República Argentina. Dirección de Minas y Geología. Boletín 50. Buenos Aires.
- Annels A. E. and Dominy S. C., 2003. Core recovery and quality: important factors in mineral resource estimation. Applied Earth Science: IMM Transactions Section B. 112. 305-312. DOI: 10.1179/037174503225011306
- Asghari, M., Noaparast, M., Shafaie, S. Z., Ghassa, S., y Chelgani, S. C., 2018. Recovery of coal particles from a tailing dam for environmental protection and economical beneficiations. International Journal of Coal Science & Technology, 1-11.
- ASTM D121-01, Standard Terminology of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001. DOI: 10.1520/D0121-01
- ASTM D388-18a, Standard Classification of Coals by Rank, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. DOI: 10.1520/D0388-18A
- ASTM D2013-04, Standard Practice of Preparing Coal Samples for Analysis, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004. DOI: 10.1520/D2013-04
- ASTM D3172-89(2002), Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. <https://www.astm.org/>. DOI: 10.1520/D3172-89R02
- ASTM D3173-03, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003. <https://www.astm.org/>. DOI: 10.1520/D3173-03
- ASTM D3174-02, Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. <https://www.astm.org/>. DOI: 10.1520/D3174-02
- ASTM D3175-02, Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002. DOI: 10.1520/D3175-02
- ASTM D3180-89(2002), Standard Practice for Calculating Coal and Coke Analyses from As-Determined to Different Bases, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1989. <https://www.astm.org/> DOI: 10.1520/D3180-89R02
- ASTM D4749-87(2002), Standard Test Method for Performing the Sieve Analysis of Coal and Designating Coal Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1987. DOI: 10.1520/D4749-87R02

ASTM D5865-03, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003. DOI: 10.1520/D5865-03

Azcuy, C. y Amigo, A., 1991. Geología y Paleoambiente de la Formación Río Turbio (Eoceno), en la Sierra Dorotea, Provincia de Santa Cruz. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 46(3-4): 201-210.

Badillo J. E., y Rodríguez, R., 2005. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Editorial Limusa SA México.

Bergmann, F. I., 1950. Observaciones geológicas efectuadas en estacas del sector Pampa del Muerto-Cerro Mirador, en Río Turbio. Yacimientos Carboníferos Fiscales, Informe 668, 5 p., (inédito).

Bergmann, F. I., 1959. Interpretación provisoria del plano de isopacas del Manto Dorotea, Yacimiento Río Turbio. Yacimientos Carboníferos Fiscales. Informe 855, 1 plano, (inédito).

Bergmann, F.J., 1993. Efectos metamórficos del carbón del manto Dorotea del Yacimiento Río Turbio (Provincia de Santa Cruz). Actas 12º Congreso Geológico Argentina y 2º Congreso Exploración de Hidrocarburos, 5:306-310.

Berry, E.W., 1937. Eogene plants from Rio Turbio, in the Territory of Santa CNZ, Patagonia. Johns Hopkins University, Studies in Geology 12.91-97.

Bian, Z., Dong, J., Lei, S., Leng, H., Mu, S., y Wang, H., 2009. The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland. Environmental Geology, 58(3), 625-634.

Borrello, A.V., 1956. Recursos minerales de la República Argentina. III Combustibles Sólidos Minerales. Revista Instituto Nacional Investigaciones Ciencias Naturales y Museo Bernardino Rivadavia, Ciencias Geológicas, 5, 665 p. En Brooks, W.E., Finkelman, R.R, Willett, J.C and Torres, I.E., 2006. Chapter 2. World Coal Quality Inventory: South America, Argentina. US Geological Survey, Open-file report 2006-1241. 23 pp. <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1241/Chapter%202-Argentina.pdf>

Brooks, W.E., and Willet, J.C., 2004. Update: World Coal Quality Inventory—Argentina. US Geological Survey, Open-file report 2004-1022. 11 pp. <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1022/1022.html>

Brooks, W.E., Finkelman, R.R, Willett, J.C and Torres, I.E., 2006. Chapter 2. World Coal Quality Inventory: South America, Argentina. US Geological Survey, Open-file report 2006-1241. 23 pp. <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1241/Chapter%202-Argentina.pdf>

Burrough, P.A. and McDonnell, R.A., 1998. Creating continuous surfaces from point data. In: Burrough, P.A., Goodchild, M.F., McDonnell, R.A., Switzer, P., Worboys, M. (Eds.), Principles of Geographic Information Systems. Oxford University Press, Oxford, UK

Caballero, A. L., 2014. Evaluación preliminar de depósitos de estériles y sedimentos provenientes de la actividad carbonífera en Río Turbio. Informes Científicos-Técnicos UNPA, 1(1), 60-84.

Carrizo, R., 1977. Informe geológico preliminar de las labores realizadas entre la Vega San José y Cancha Carreras. Yacimientos Carboníferos Fiscales. Informe 1192. 33 p., (inédito).

- Carrizo, R. y Valerdi, C., 1990. Actualización de las reservas del yacimiento Río Turbio, Provincia de Santa Cruz. Actas del 11° Congreso Geológico Argentino, 1: 187-190.
- Castro, L. N. y Alfaro, G., 2011. Los depósitos de carbón de Argentina y Chile: importancia en la matriz energética y alternativas de uso. Geotemas 9-28. Recuperado de <https://www.researchgate.net>
- Castro, L. N., 2018. Economía y Mercado [Material del Aula]. Minerales Industriales. Buenos Aires, Argentina.
- Caterpillar, 2014. Caterpillar to supply two complete longwall top coal caving systems to mine in Turkey. Recuperado de <http://www.mining.com/web/caterpillar-to-supply-two-complete-longwall-top-coal-caving-systems-to-mine-in-turkey/>
- Chen C. Y., 1976. Investigation and Statistical Analysis of the Geotechnical Properties of Coal Mine Refuse, Ph.D. Thesis, University of Pittsburgh, 196p.
- Cobb, J. C., Masters, J. M., Treworgy, C. G., and Helfinstine, R. J., 1979. Abundance and recovery of sphalerite and fine coal from mine waste in Illinois. Illinois minerals no. 071.
- Cuerda, A.J., 1950. Descripción de perfiles en Ja zona del Yacimiento Río Turbio, Santa Cruz. Yacimientos Carboníferos Fiscales. Informe 669, 17 p., (inédito).
- Danderfer, J.C., 1982. Geología al este y noreste de la estancia La Primavera. Yacimiento Carbonífero Río Turbio. Provincia de Santa Cruz. Yacimientos Carboníferos Fiscales. Informe 1168, 21 p., (inédito).
- Deutsch, C. V., & Journel, A. G., 1998. Geostatistical software library and user's guide: Oxford University Press. New York.
- Diessel, C. F. K., 1992. Coal-bearing depositional systems. Springer, 721p. Berlin, Germany.
- EIA (US Energy Information Administration), 2005. Recoverable coal. Recuperado de <http://www.eia.doe.gov/pub/international/iea2003/table82.xls>
- EIA (US Energy Information Administration), 2019. More than half of the U.S. coal mines operating in 2008 have since closed. Recuperado de <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=38172>
- ENADIMSA, 1987. Proyecto de Exploración de los Yacimientos de Carbón de la Cuenca Austral Argentina. Yacimientos Carboníferos Fiscales (inédito).
- Estebenet, M. S. G., Espinosa, M. A., Guerstein, G. R., y Raising, M. R., 2012. Diatomeas de la Formación Río Turbio (Eoceno Medio), Sudoeste de Santa Cruz, Argentina. Ameghiniana, 49(3), 389-395.
- Fosdick, J. C., Bostelmann, J. E., Leonard, J., Ugalde, R., Oyarzún, J. L., and Griffin, M., 2015. Timing and rates of foreland sedimentation: New detrital zircon U/Pb geochronology of the Cerro Dorotea, Río Turbio, and Río Guillermo formations, Magallanes basin. In XIV Congreso Geológico Chileno (pp. 152-166).
- Furque, G. y Caballé, C., 1993. Estudio Geológico y Geomorfológico de la Cuenca Superior del Río Turbio, Provincia de Santa Cruz. Consejo Federal de Inversiones. Serie Investigaciones Aplicadas, Colección Hidrología subterránea, 6:8-39.

- Galvin, K. P. and Iveson S. M., 2011. Cleaning of coarse and small coal. En Osborne, D.: The coal Handbook. Towards cleaner production. Volume 1: Coal production, Woodhead Publishing Ltd, 263-300p, Sawston, Cambridge, UK.
- Gómez, S., 16 de enero de 2018. El carbón sigue siendo clave en la energía mundial. Recuperado de <https://www.magnuscmd.com/es/el-carbon-sigue-siendo-clave-en-la-energia-mundial/>
- Haining, R., Wise, S., and Ma, J., 1998. Exploratory spatial data analysis. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician), 47(3), 457-469.
- Hegazy, Y. A., Cushing, A. G., y Lewis, C. J., 2004. Physical, mechanical, and hydraulic properties of coal refuse for slurry impoundment design. D'Appolonia Engineering.
- Hoaglin, D. C., 2015. Exploratory data analysis: Univariate methods: 600-604.
- Honaker, R. Q., Kohmuench J., and Luttrell G. H., 2013. Cleaning of fine and ultrafine coal. En Osborne, D.: The coal Handbook. Towards cleaner production. Volume 1: Coal production, Woodhead Publishing Ltd, 301-346p, Sawston, Cambridge, UK.
- Hünicken, M., 1955. Depósitos Neocretácicos y Terciarios del extremo SSW de Santa Cruz. Cuenca Carbonífera de Río Turbio. Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia e Instituto Nacional de Investigaciones Ciencias Naturales, Ciencias Geológicas, 4 (1):1-164.
- Hünicken, M., 1966. Flora terciaria de los Estratos de Río Turbio, Santa Cruz. (Niveles plantíferos del Arroyo Santa Flavia). Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Córdoba, 28(3-4):139-227.
- ISO 1170, 2013. Coal and coke — Calculation of analyses to different bases. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jewell, R. 1998. An introduction to tailings. En Case studies on tailings management. International Council on Metals & the Environment & the United Nations Environment Program. Otawwa, Canadá, 7-8.
- Journel, A. G and Huijbregts C. J., 1978. Mining geostatistics. Academic Press, New York.
- Kossoff, D., Dubbin, W.E., Alfredsson, M., Edwards, S.J., Macklin, M.G., Hudson-Edwards K.A. 2014. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation en Applied Geochemistry (2014) 229-245
- Laskowski J. S., Luttrell G. H., Arnold B. J., 2007. Coal Flotation. En: Froth flotation, Littleton, Colorado, USA, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), pp 611-634 (2007)
- Lewitt, M., 2011. Opportunities for fine coal utilisation. IEA Clean Coal Centre, pp94.
- Lien, L., 2013. Advances in coal mining technology. En The Coal Handbook. Towards cleaner production. Volume 1: Coal production. Woodhead Publishing Ltd, p. 193-225, Sawston, Cambridge, UK.
- Lottermoser, B. G. 2010. Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer, 410 p., Berlin, Germany.

Malumián, N. and Caramés A., 1997. Upper Campanian-Paleogene from the Rio Turbio coal measures in southern Argentina: micropaleontology and the Paleocene/Eocene boundary. *Journal of South American Earth Sciences* 10(2):189-201.

Malumián, N. y Panza, J. L., Parisi, C., Nañez, C., Caramés, A., y Torre, E., 2000. Hoja Geológica 5172-III Yacimiento Río Turbio, provincia Santa Cruz, escala 1:250.000. Servicio Geológico Minero Argentino. Recuperado de <http://repositorio.segeman.gov.ar/308849217/1801>

McCabe, P. J. and Parrish J. T., 1992, Tectonic and climatic controls on the distribution and quality of cretaceous coals, in Controls on the Distribution and Quality of Cretaceous Coals. *Geological Society of America Special Paper*, 267, 1–15.

McKinney, R., Botha B., Fleming, J. and Body, K., 2011. Resource Estimation of Tsumeb Tailings Dump, Namibia. Prepared by Coffey Mining (SA) (Pty) Ltd on behalf of: Weatherly International Plc. Report JTSU01.

Miller, K., 2013. Coal analysis. En *The Coal Handbook. Towards cleaner production. Volume 1: Coal production*. Woodhead Publishing Ltd, p. 151-192, Sawston, Cambridge, UK.

Moya, V., 21 de enero de 2019. [¿Qué les espera a los 'commodities' en América Latina en el 2019?](https://latinamericanpost.com/es/25898-que-les-espera-a-los-commodities-en-america-latina-en-el-2019) Recuperado de <https://latinamericanpost.com/es/25898-que-les-espera-a-los-commodities-en-america-latina-en-el-2019>

Muñoz Tolosa, L. A., 2015. Uso de Kriging universal en la simulación condicional de leyes. Tesis de Magíster. Universidad de Chile, 123p., Santiago de Chile.

Ortiz J., 2012. Evaluación de Yacimientos. Departamento de Ingeniería de Minas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Puritch, E., Sutcliffe R., Brown F., Burga D. and Barry J., 2015. NI-43-101 & 43-101F1 Technical Report and Resource Estimate on the Esmeralda tailings silver project, Chihuahua State, Mexico for Gogold Resources Inc. P&E Mining Consultants Inc. Report 299.

Robinson, T. P., and Metternicht, G., 2006. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2), 97-108.

Robl, T., Oberlink A., and Jones R., 2017. Coal Combustion Products (CCP's). Characteristics Utilization and Beneficiation. *Woodhead Series in Energy*, 566p. Duxford, UK.

Romero, E.J., 1977. Polen de gimnospermas y fagáceas de la Formación Río Turbio (Eoceno), Santa Cruz, Argentina: 1-207. Fundación Educación Ciencia y Cultura. Buenos Aires.

Santos García, J. A., 1988. Caracterización sedimentológica del área de Río Turbio, Cuenca Austral (provincia de Santa Cruz. República Argentina). *Estudios Geológicos*, 44(3-4), 199-210. Recuperado de <https://doi.org/10.3989/egeol.88443-4538>

SEGEMAR, 30 de abril de 2019. Sistema de Información Geológica Ambiental Minera (SIGAM). Recuperado de <https://sigam.segeman.gov.ar/visor/>.

[Servimedia](#), 6 de enero de 2019. El carbón produjo el 14% de la electricidad en 2018 en España. Recuperado de <https://www.eleconomista.es/economia/noticias/9618164/01/19/El-carbon-produjo-el-14-de-la-electricidad-en-2018-en-espana-ano-en-que-lo-superaron-solo-la-nuclear-y-la-eolica.html>

- Sironvalle, M. A. A., 2007. Estimación de Recursos Mineros. *USACH*. 124p.
- Sloss, L. L., 2014. Blending of coals to meet power station requirements. *IEA Clean Coal Centre*, 300, 238.
- Speight, J. G., 2013. The Chemistry and Technology of Coal 3rd Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 845p. Boca Raton, Florida.
- Speight, J. G., 2015. Handbook of coal analysis (2nd Ed.). Wiley & Sons, 367p. Hoboken, New Jersey, USA
- The Open University, 2019. Energy Resources: Coal. Recuperado de <https://www.open.edu/openlearn/nature-environment/environmental-studies/energy-resources-coal/content-section-2.6>
- Thomas, L., 2013. Coal Geology (2nd Edition). Wiley & Sons Ltd, 454p. UK.
- Witt, K. J., 2004. Sustainable improvement in safety of tailings facilities, report on tailings management facilities—Risks and reliability. TAILSAFE: A European Research and Technological Development Project.
- YCRT, 2010, Febrero/Marzo. Protección del Medio Ambiente: Construcción de nueva pileta de lodos. Revista Empresarial YCRT, 14, 20-21.

ANEXO 1: EJEMPLO DE CÁLCULOS DEL PROMEDIO PONDERADO DE CONTENIDO DE CENIZAS Y PODER CALORÍFICO SUPERIOR

En *Tabla A.1.1* se presentan a modo de ejemplo los resultados de laboratorio de los parámetros medidos durante la caracterización de la pileta de lodos N° 2, en el pozo E4. No se divultan los datos correspondientes a las 169 muestras ya que son de carácter confidencial de la empresa YCRT.

Tabla A.1.1: Variables reportados por el laboratorio y valores calculados a partir de estos datos para determinar Cz y PCS ponderados.

Informe de Laboratorio										Promedio Ponderado (PP)	
Pozo	Muestra	Desde	Hasta	Espesor	R (m)	Fracción (mm)	Fracción (%)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)
E4	00005-P	0,00	0,50	0,50	0,38	>0,5	15,00	26,81	5746	44,97	4188,13
						<0,5	85,00	48,17	3913		
E4	00006-P	0,50	1,00	0,50	0,30	>0,5	21,40	6,31	7355	33,58	5074,87
						<0,5	78,60	41,00	4454		
E4	00007-P	1,00	1,50	0,50	0,25	>0,5	14,30	11,68	6933	31,58	5371,17
						<0,5	85,70	34,90	5111		
E4	00008-P	1,50	2,00	0,50	0,50	>0,5	33,30	69,01	2340	61,46	2909,72
						<0,5	66,70	57,69	3194		
E4	00009-P	2,00	2,50	0,50	0,40	>0,5	12,50	30,25	5475	54,65	3450,09
						<0,5	87,50	58,13	3161		

Referencias: R=recuperación; Fracción (%)=porcentaje de muestra representado por cada fracción granulométrica. Cz= contenido de ceniza; PCS: Poder Calorífico Superior.

Ejemplo de cálculo para la muestra 00005-P:

$$PP = \frac{\sum(fración (\%) . parámetro)}{\sum fracción (\%)}$$

$$PP (Cz) = \frac{(15\% . 26,81\% wt) + (85\% . 48,17\% wt)}{15\% + 85\%} = 44,97 \% wt$$

$$PP (PCS) = \frac{\left(15\% . 5745,50 \frac{Kcal}{Kg}\right) + \left(85\% . 3913,30 \frac{Kcal}{Kg}\right)}{15\% + 85\%} = 4188,13 \frac{Kcal}{Kg}$$

ANEXO 2: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE CENIZAS Y PODER CALORÍFICO SUPERIOR A DIFERENTES PROFUNDIDADES DENOMINADAS TRAMOS

Tabla A.2.1: Estadística descriptiva para Cz y PCS por tramos en Excel 2016.

	Total Datos ¹		Total Datos ²		T1 (0,00-0,50m)		T2 (0,50-1,00m)		T3 (1,00-1,50m)		T4 (1,50-2,00m)		T5 (2,00-2,50m)	
	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s))	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s)	PCS Kcal/kg (s/s)	Cz %wt (s/s))	PCS Kcal/kg (s/s)
Media	57,39	3.185,67	57,32	3.192,51	55,00	3.382,14	55,88	3.304,50	58,10	3.158,47	60,84	2.923,83	56,68	3.194,99
Error típico	0,97	74,44	0,94	72,05	2,33	169,88	2,63	193,07	1,98	164,75	1,87	152,61	1,60	123,89
Mediana	58,47	3.095,48	57,98	3.130,99	55,13	3.388,36	58,53	3.131,38	58,37	3.095,48	63,33	2.741,86	57,47	3.202,00
Moda	60,15	3.008,72	51,28	3.678,57	-	-	-	-	-	-	-	-	60,15	3.008,72
Desviación estandar	12,60	967,72	12,44	955,81	13,78	1.005,05	15,58	1.142,21	11,72	974,65	11,06	902,87	9,17	711,71
CV	0,22	0,30	0,22	0,30	0,25	0,30	0,28	0,35	0,20	0,31	0,18	0,31	0,16	0,22
RSD (%)	21,96	30,38	21,70	29,94	25,05	29,72	27,88	34,57	20,17	30,86	18,18	30,88	16,17	22,28
Varianza de la muestra	158,74	93.6475,00	154,71	91.3569,22	189,82	1.010.119,14	242,66	1.304.648,04	137,36	949.934,06	122,34	815.175,14	84,02	506.531,35
Curtosis	-0,55	-0,71	-0,52	-0,68	-0,40	-0,51	-0,99	-0,96	-0,67	-0,88	-0,75	-0,57	-0,05	-0,19
Coeficiente de asimetría	-0,20	0,13	-0,18	0,11	0,10	-0,27	-0,13	0,08	-0,23	0,34	-0,44	0,38	0,25	-0,55
Rango	58,31	4.345,62	58,31	4.345,62	56,10	3.965,16	57,24	4.183,05	47,42	3.785,99	40,91	3.685,00	40,69	2.723,45
Mínimo	28,11	1.025,55	28,11	1.025,55	28,11	1.192,61	29,19	1.025,55	31,58	1.585,19	36,63	1.233,20	36,35	1.525,05
Máximo	86,42	5.371,17	86,42	5.371,17	84,20	5.157,77	86,42	5.208,60	79,00	5.371,17	77,55	4.918,20	77,04	4.248,50
Suma	9.698,21	538.377,86	10.088,04	561.882,15	1.924,97	118.375,00	1.955,88	115.657,49	2.033,49	110.546,36	2.129,47	102.334,05	1.870,53	105.434,59
Cuenta	169	169	176	176	35	35	35	35	35	35	35	35	33	33
Nivel de confianza(95,0%)	1,91	146,96	1,85	142,19	4,73	345,25	5,35	392,36	4,03	334,80	3,80	310,15	3,25	252,36

Referencias: Cz= contenido de cenizas, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades. ¹ correspondiente a las 169 muestras colectadas; ² algunos tramos perforados fueron mayores a 0,50m, razón por la cual las muestras fueron divididas para que tengan dicha longitud, pasando de 169 a un total de 176. Los T1 a T5 totalizan 173 muestras y no 176, ya que 3 pozos alcanzaron profundidades mayores a 2,50m.

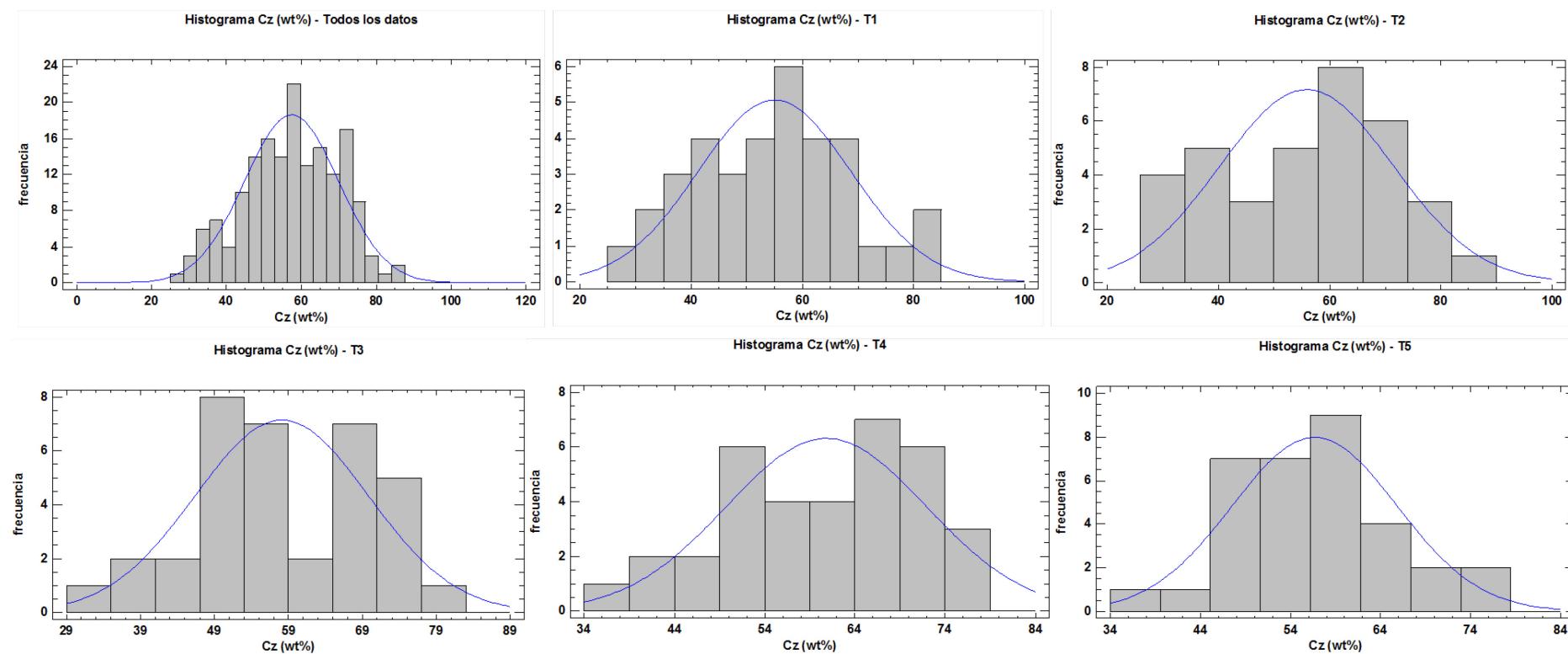


Fig. A.2.1: Histogramas de frecuencia para la variable Cz %wt (s/s) por tramos. En azul, curva de distribución normal. Realizado en Statgraphics Centurion v16.1.03. Referencias: Cz= contenido de cenizas, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades.

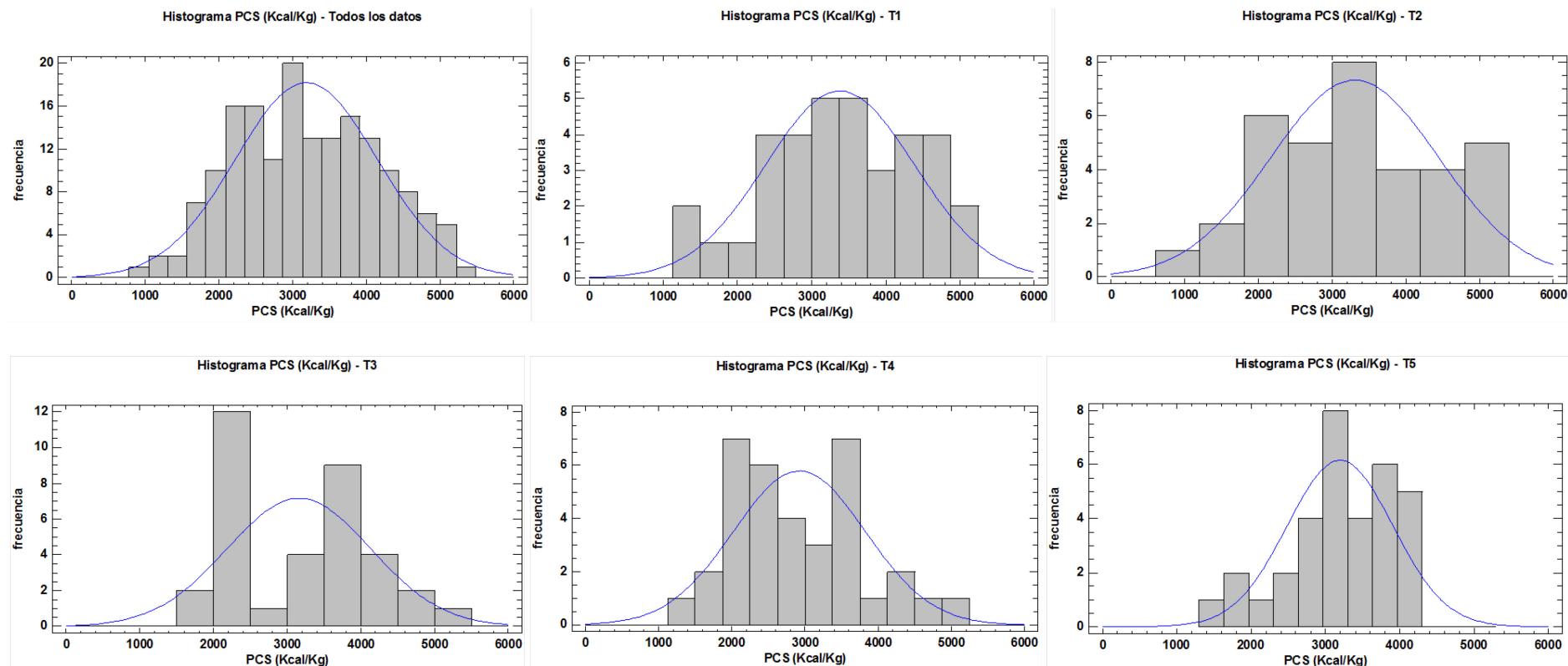


Fig. A.2.2: Histogramas de frecuencia para la variable PCS Kcal/kg (s/s) por tramos. En azul, curva de distribución normal. Realizado en Statgraphics Centurion v16.1.03. Referencias: PCS= Poder Calorífico Superior, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades.

Tabla A.2.2: Estadísticas de la correlación PCS vs Cz por tramos obtenida con Excel 2016.

Estadísticas de la regresión	Todos los datos	T1	T2	T3	T4	T5
Coeficiente de correlación múltiple	0,9531	0,9827	0,9788	0,9280	0,9524	0,8694
Coeficiente de determinación R²	0,9084	0,9656	0,9580	0,8611	0,9071	0,7559
R² ajustado	0,9078	0,9646	0,9568	0,8569	0,9043	0,7480
Error típico	293,8142	189,2013	237,5374	368,6824	279,3599	357,2617
Observaciones		169	35	35	35	33

Referencias: T1 a T5= tramos a diferentes profundidades

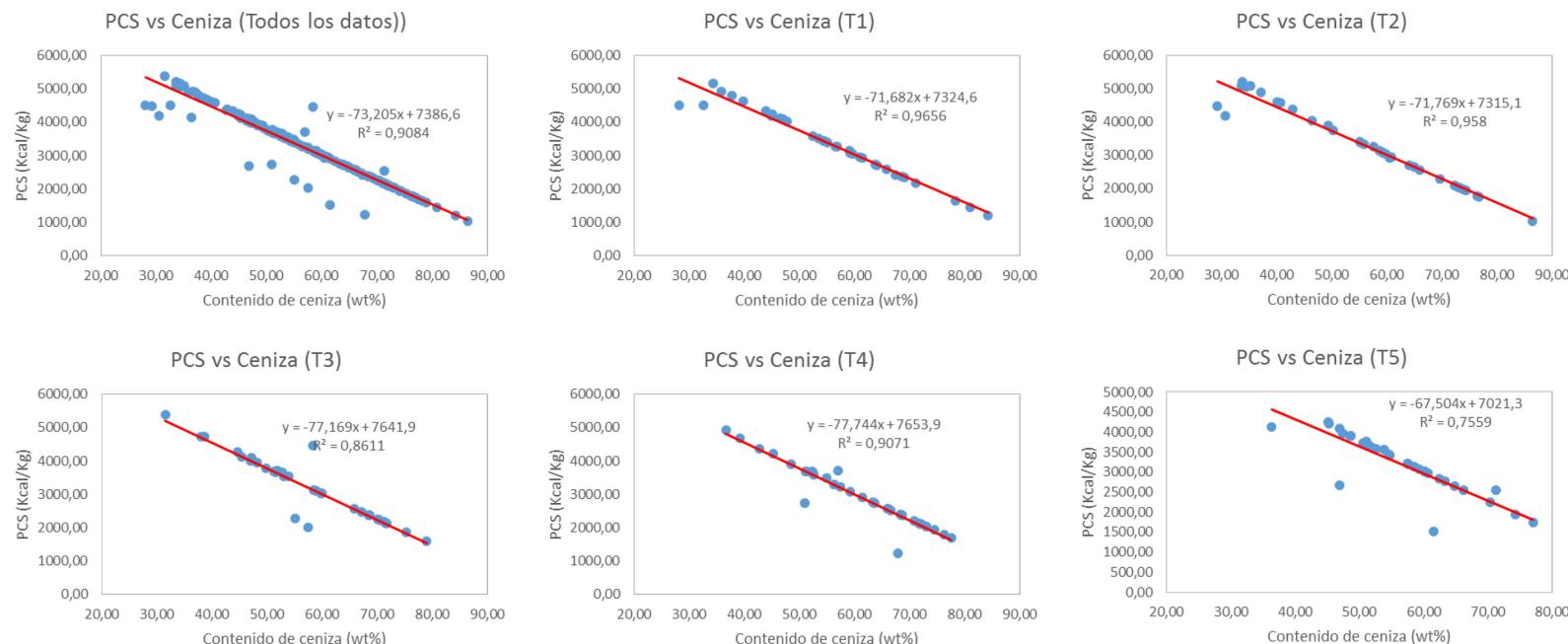


Fig. A.2.3: Gráficos de correlación PCS vs Cz para todos los datos y por tramos, realizado en Excel 2016. Referencias: PCS= Poder Calorífico Superior, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades

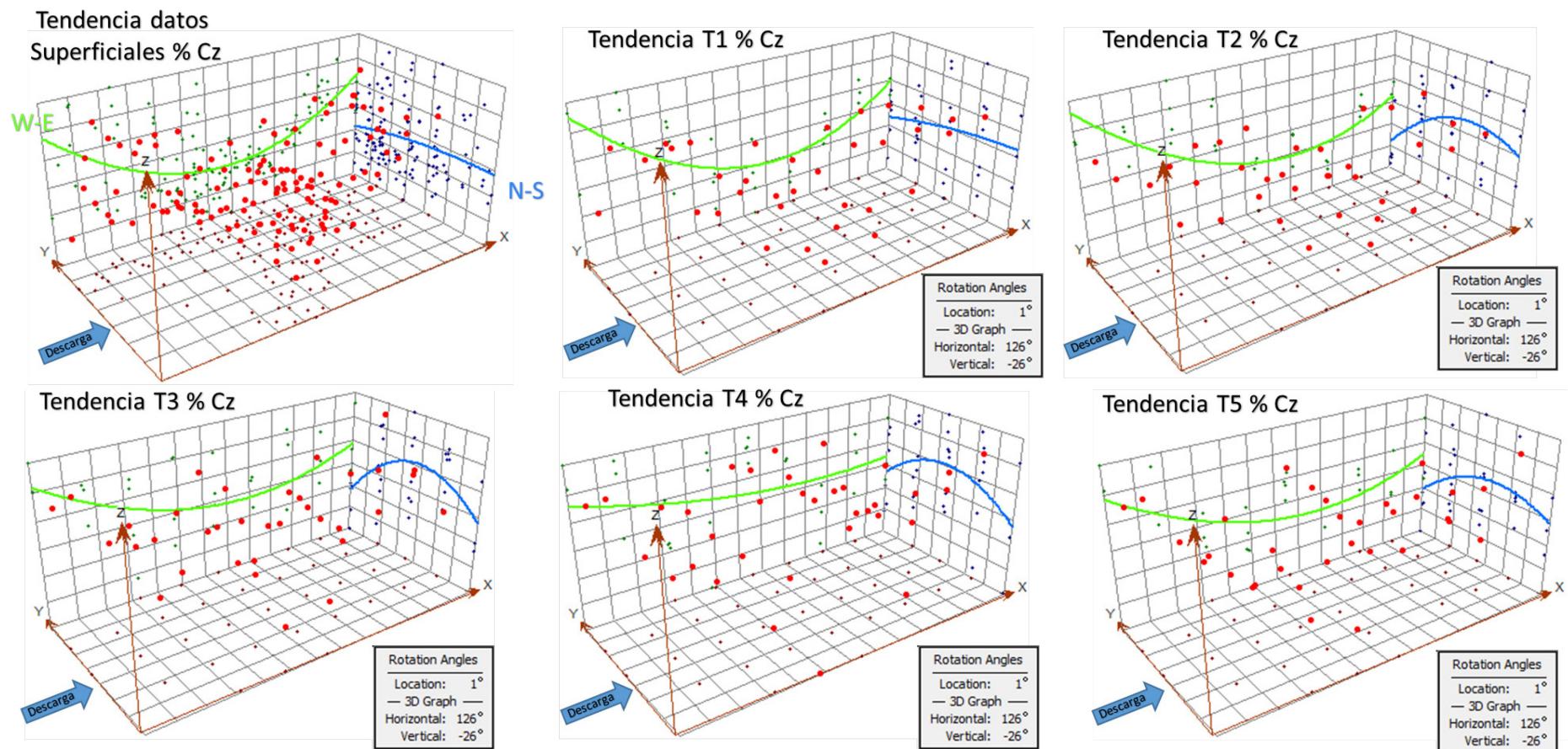


Fig. A.2.4: Gráficos obtenidos con la herramienta *Trend Analysis* del software ArcGIS v10.3 para evaluar tendencia en la distribución de Cz. En verde tendencia W-E y en azul N-S. La flecha azul indica el sentido de la descarga en la pileta de lodos N° 2. Referencias: Cz= contenido de ceniza, T1 a T5= tramos a diferentes profundidades. Datos superficiales incluye las 35 muestras del T1 y 85 correspondientes a un muestreo del Laboratorio de YCRT llevado a cabo con pala hasta una profundidad de aproximadamente 0,50m.

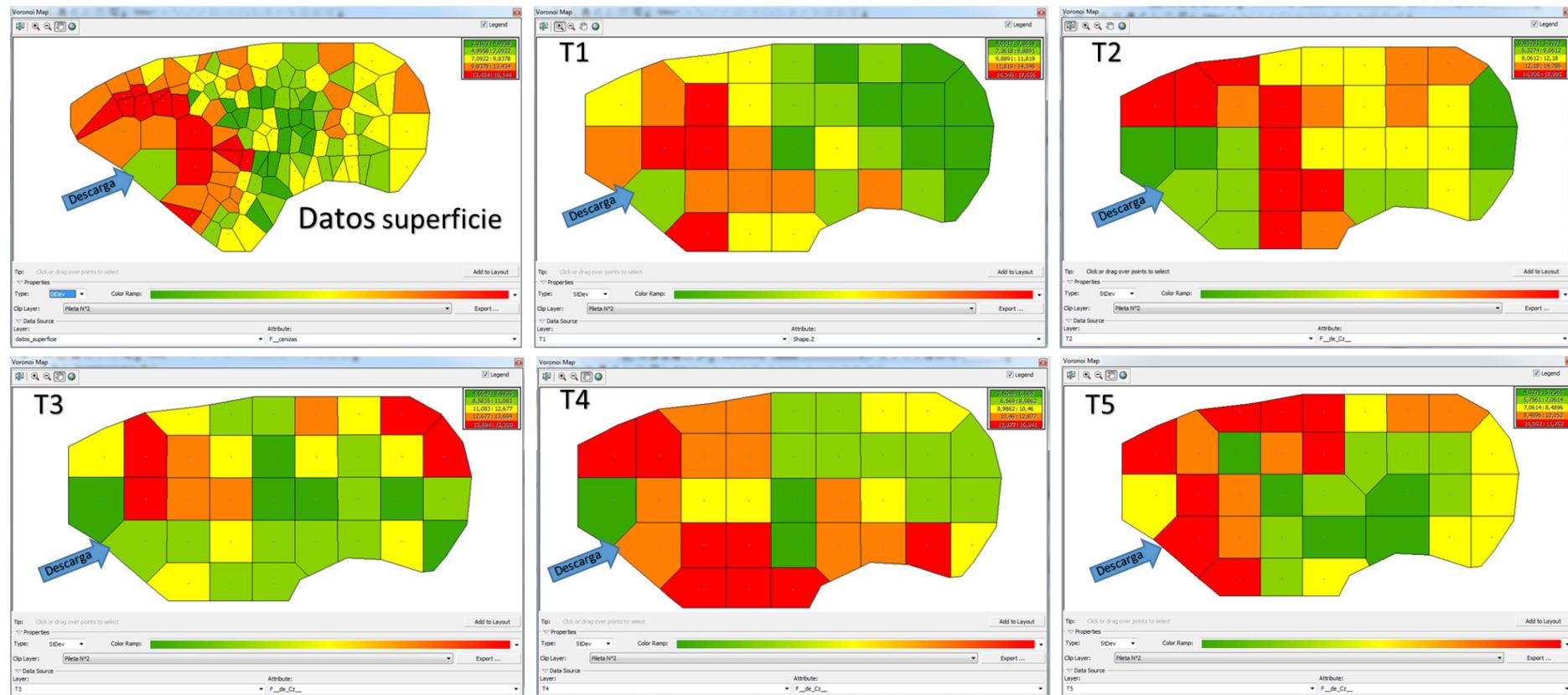


Fig. A.2.5: Mapas de Voronoi de desviación estándar por tramos obtenidos con la herramienta *Voronoi Map* del software ArcGIS v10.3. Rojo representa mayor variación en la desviación estándar y verde menor. La flecha azul indica el sentido de la descarga en la pileta de lodos N° 2. Referencias: T1 a T5= tramos a diferentes profundidades. Datos superficiales incluye las 35 muestras del T1 y 85 correspondientes a un muestreo del Laboratorio de YCRT llevado a cabo con pala hasta una profundidad de aproximadamente 0,50m.

ANEXO 3: MODELOS DE BLOQUES REALIZADOS CON DIFERENTES SOFTWARE UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO. PRESENTACIÓN DE VISTAS EN 3D.

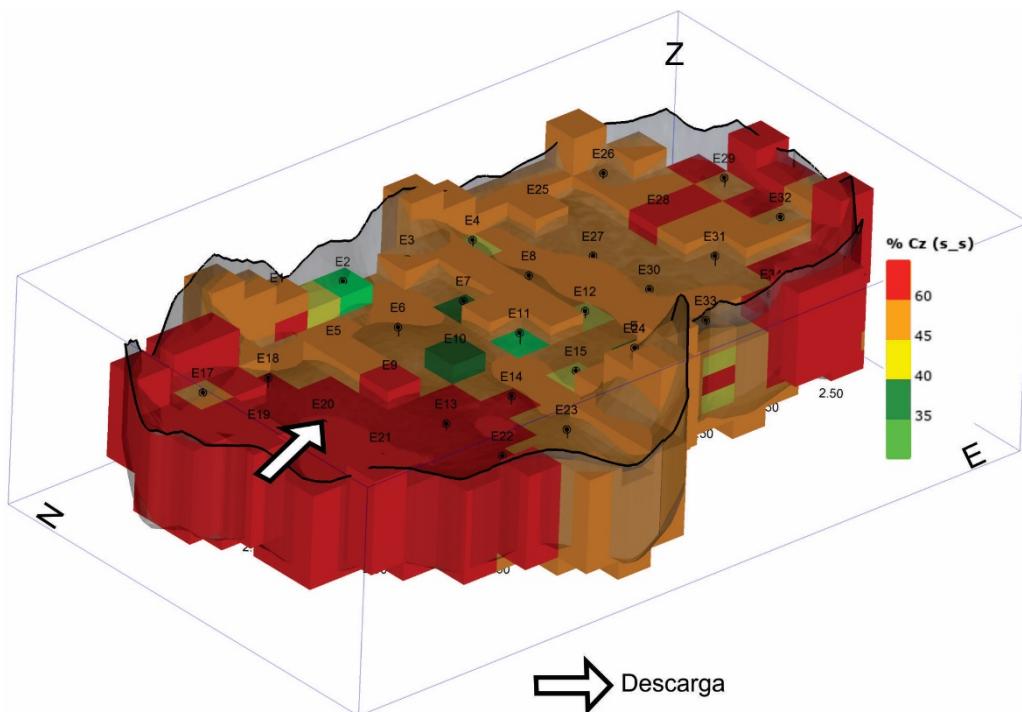


Fig. A.3.1: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Micromine v11.0.0. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

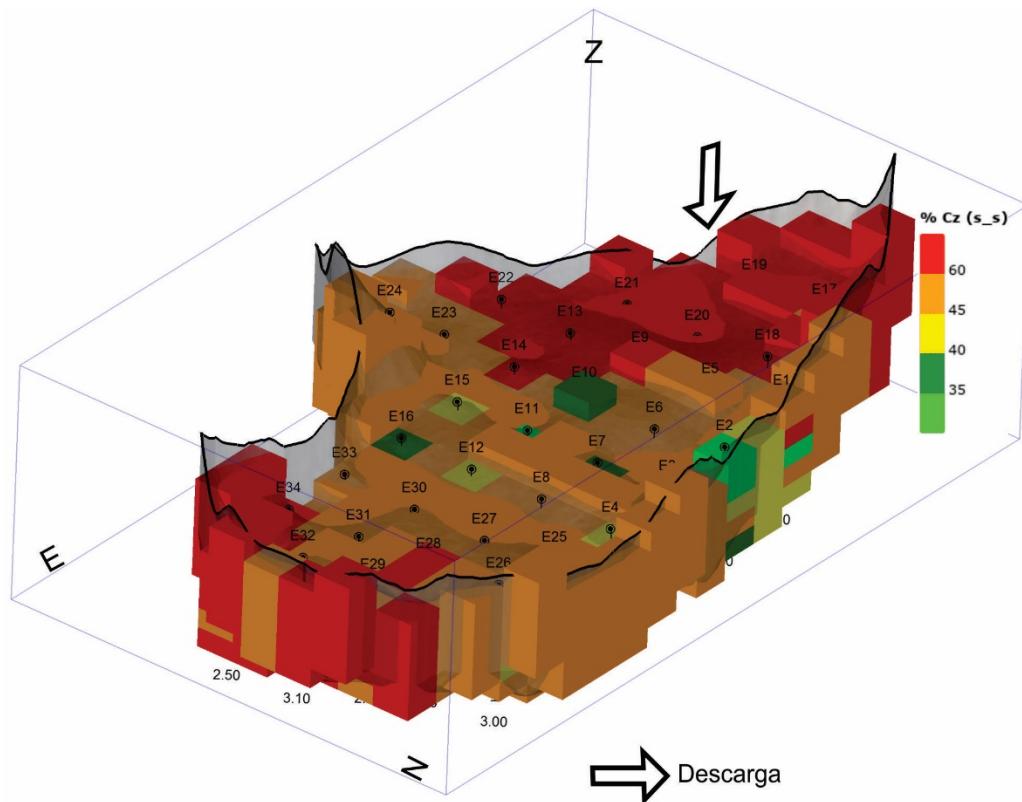


Fig. A.3.2: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Micromine v11.0.0. Visual al SW y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Modelo de Bloques 10x10x0.5m (RBF) en Leapfrog GEO

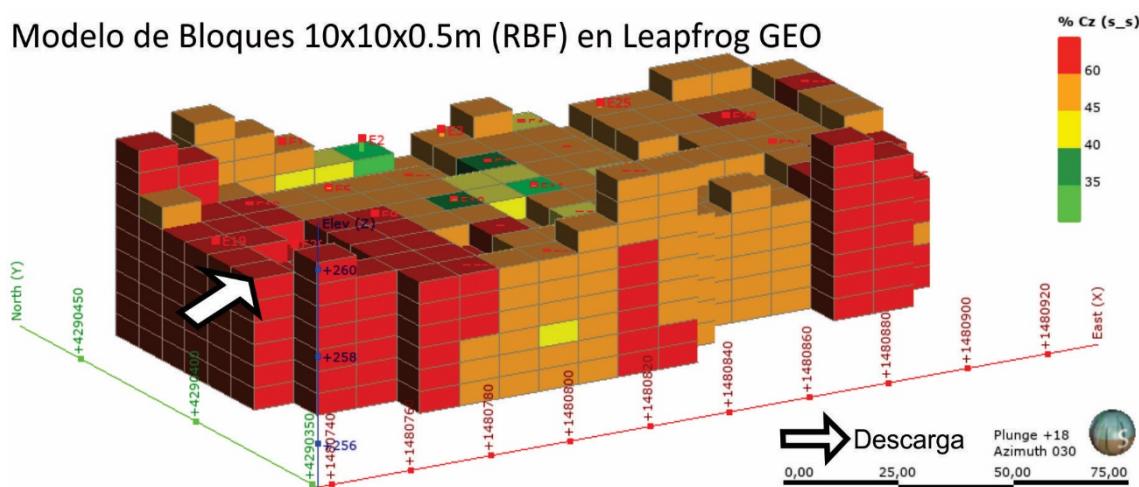


Fig. A.3.3: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Estéril Superior

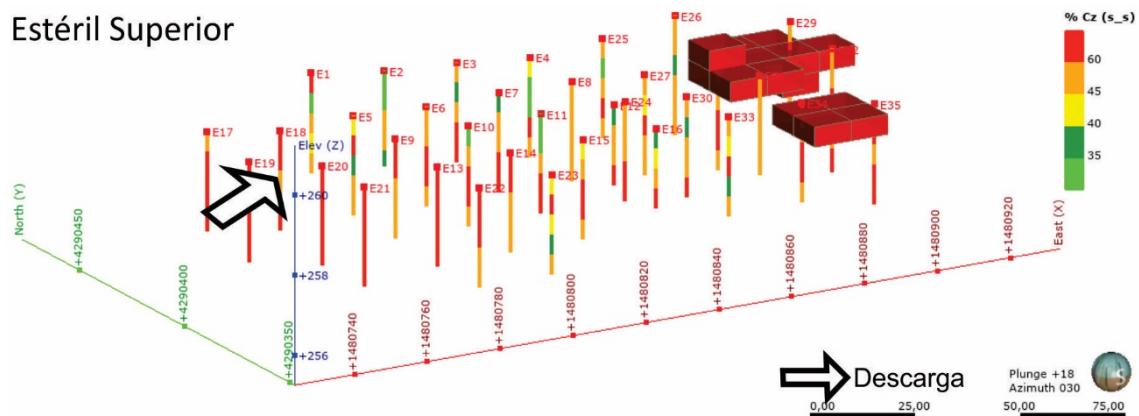


Fig. A.3.4: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Estéril Superior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Estéril Inferior

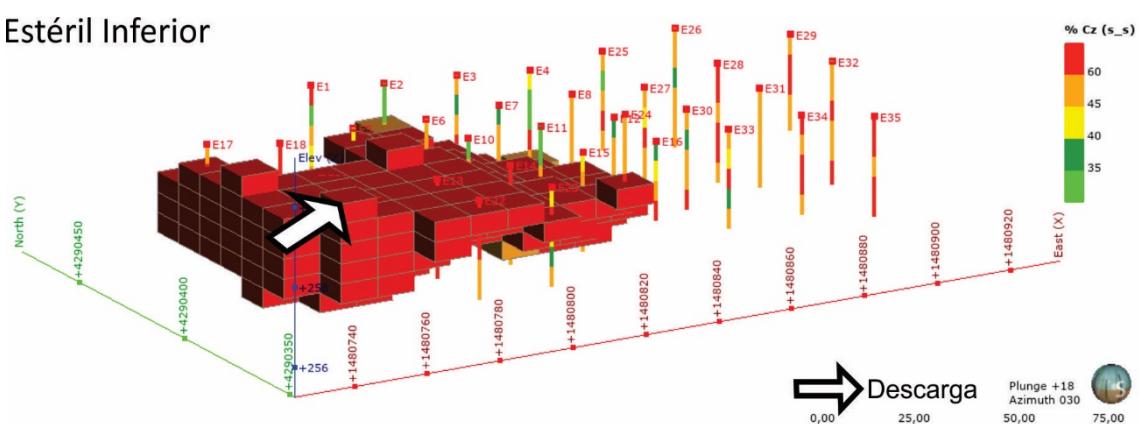


Fig. A.3.5: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Estéril Inferior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Arcilla

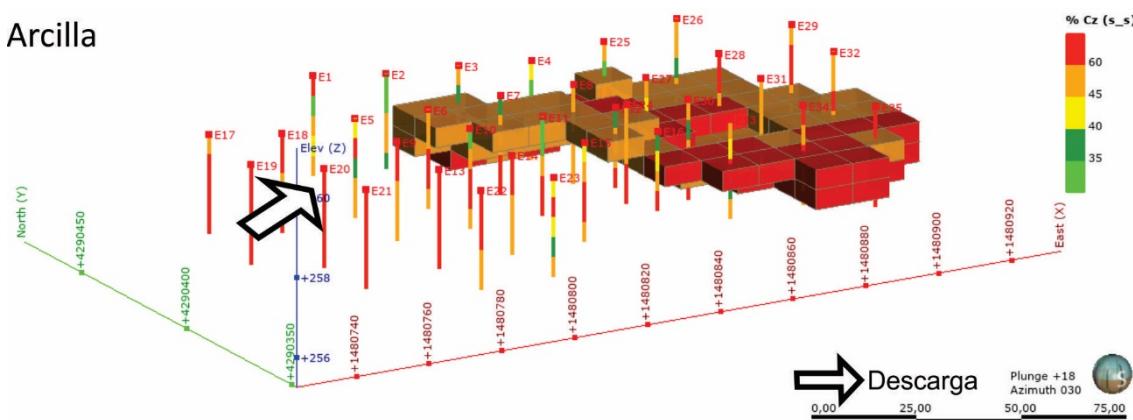


Fig. A.3.6: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Arcilla realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Carbón Superior

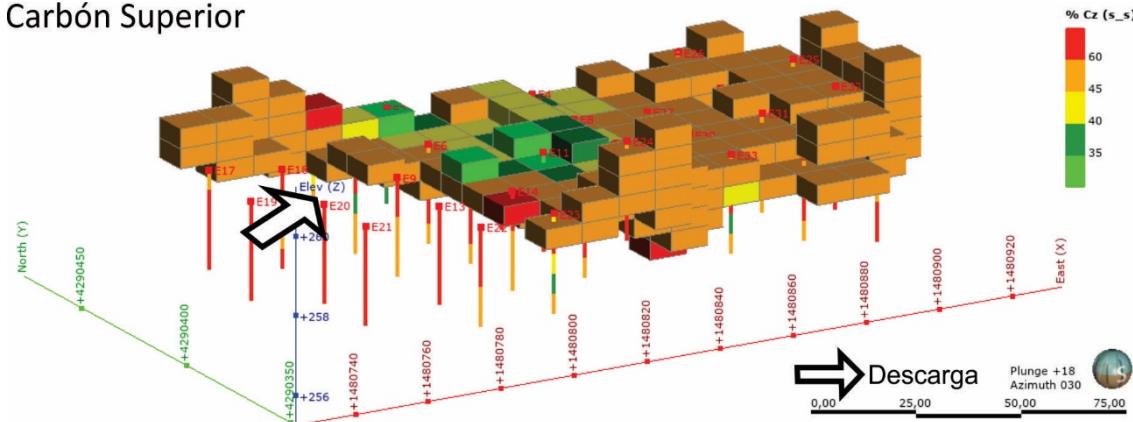


Fig. A.3.7: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Carbón Superior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

Carbón Inferior

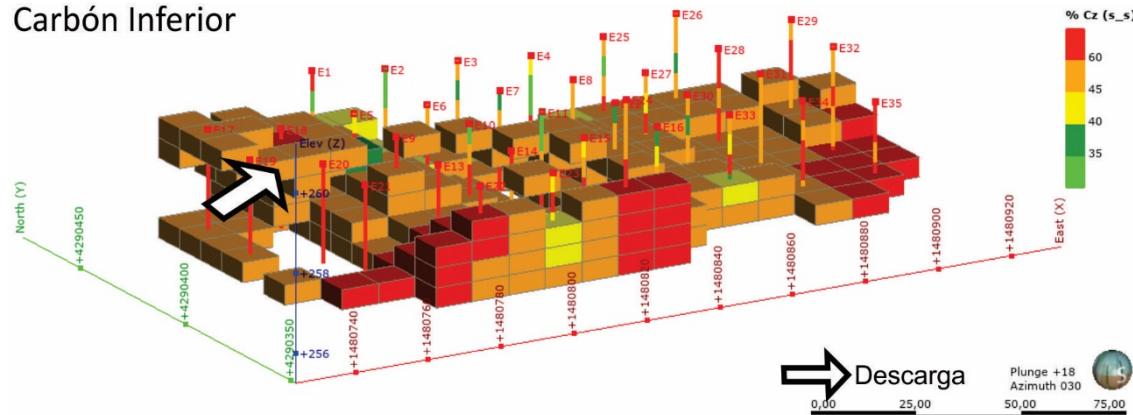


Fig. A.3.8: Modelo de Bloques 10x10x0,5 m para Cz %wt (s/s) restringido al material Carbón Inferior realizado en Leapfrog Geo v.4.4. Visual al NE y exageración vertical 10 veces. Nótese la descarga indicada con la flecha.

ANEXO 4: EJEMPLO DE CÁLCULOS DEL PROMEDIO PONDERADO DE CONTENIDO DE CENIZAS Y PODER CALORÍFICO SUPERIOR

En *Tabla A.4.1* se presentan a modo de ejemplo los resultados de laboratorio de los parámetros medidos durante la caracterización de la pileta de lodos N° 2, en el pozo E4. No se divultan los datos correspondientes a las 169 muestras ya que son de carácter confidencial de la empresa YCRT.

Tabla A.4.1: Variables reportados por el laboratorio y valores calculados a partir de estos datos para determinar el peso específico húmedo y seco.

Informe de Laboratorio							Variables Calculadas				
Pozo	Muestra	Desde	Hasta	R (m)	W (g)	Ws (g)	Ww (g)	w (%)	V* (cm³)	γ (t/m³)	γs (t/m³)
E4	00005-P	0,00	0,50	0,38	1.150	920	230	25,0	1.028,02	1,12	0,89
E4	00006-P	0,50	1,00	0,30	700	550	150	27,3	811,59	0,86	0,68
E4	00007-P	1,00	1,50	0,25	850	600	250	41,7	676,33	1,26	0,89
E4	00008-P	1,50	2,00	0,50	2.150	1.420	730	51,4	1.352,65	1,59	1,05
E4	00009-P	2,00	2,50	0,40	1.460	1.100	360	32,7	1.082,12	1,35	1,02

R=recuperación; W= peso total; Ws=peso sólido; Ww=peso agua; w=humedad; V= volumen; γ=peso unitario húmedo; γs=peso unitario seco

Ejemplo de cálculo para la muestra 00005-P:

$$\text{volumen } (V) = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (4,15 \text{ cm})^2 \cdot 38 \text{ cm} = 2.056,04 \text{ cm}^3$$

*Se utiliza la mitad del volumen calculado (2.056,04/2=1.028,02), ya que se envió al laboratorio la mitad de la muestra

$$\begin{aligned} \text{Peso unitario húmedo } (\gamma) &= \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{1150 \text{ g}}{1.028,02 \text{ cm}^3} \\ &= 1,12 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Peso unitario seco } (\gamma_s) = \frac{W_s}{V} = \frac{920 \text{ g}}{1.028,02 \text{ cm}^3} = 0,89 \text{ g/cm}^3$$

Para el cálculo tanto de γ como de γ_s ponderado se utiliza la siguiente fórmula:

$$\gamma \text{ ponderado} = \frac{\sum(R \cdot \gamma)}{\sum R}$$

$$\text{Humedad, } w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 = \frac{W - W_s}{W_s} \cdot 100 = \frac{1.150 \text{ g} - 920 \text{ g}}{920 \text{ g}} \cdot 100 = 25 \%$$

ANEXO 5: TABLA DE ABREVIATURAS Y CONVERSIÓN DE UNIDADES

Tabla A.5.1: Abreviaturas utilizadas a lo largo de este trabajo. Algunas no tienen traducción al idioma español y se utiliza su término original en inglés.

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ad	<i>as determined</i>
ar	<i>as received</i>
CV	Coeficiente de Variación
Cz	Contenido de cenizas
d o db	<i>dry basis</i>
daf	<i>dry ash free</i>
γ	peso específico húmedo
γ_d / γ_s	peso específico seco
FL	Frente Largo
g/cm ³	Gramos por centímetro cúbico (peso específico/densidad)
GCV	<i>Gross Calorific Value</i>
h	<i>Altura (fórmula del volumen cilindro)</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weight</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OK	<i>Ordinary Kriging/Kriging Ordinario</i>
PCS	Poder Calorífico Superior
PP	Promedio Ponderado
r	mitad del diámetro del tubo
R	Recuperación/ <i>Recovery</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>
RSD%	Relative Standard Deviation
STD	Standard Deviation
s/s	base seca
v o V	volumen
w	Humedad (suelo)
m.b.b.p.	Metros bajo boca de pozo
m ³	Unidad de volumen (metro cúbico)
M	<i>Moisture/Humedad (en análisis próximo)</i>
W	peso total
Ws	peso de sólidos
Ww	peso agua
Btu	British Thermal Unit
%wt	Percentage Weight
Kcal/kg	Kilo calorías por Kilogramo

Las cifras significativas reportadas en los cálculos de este trabajo se reportan con coma para los decimales y punto para los miles (ej. 3.124,5).

Conversión de Unidades

- 1 Btu = 1.055,06 joules
- 1 cal = 4,184 joules
- 1 g = 1 kg × 10⁻³
- 1 m = 100 cm = 1.000 mm