

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y PLAN DE DESARROLLO DE ESCOMBRERAS PARA EL ÁREA SUR DE LA MINA PASO DIABLO, MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Avila P, Gerardo J.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y PLAN DE DESARROLLO DE ESCOMBRERAS PARA EL ÁREA SUR DE LA MINA PASO DIABLO, MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Miguel Castillejo
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Vrotnesky Cediell

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Avila P, Gerardo J.
Para optar al Título
de Ingeniero de Minas

Caracas, 2008

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a la memoria de mi querida abuela Celina Paz, quién físicamente no se encuentra con nosotros pero su recuerdo perdurará en nuestras vidas por siempre.

AGRADECIMIENTOS

Manifiesto mi más sincero agradecimiento a la Universidad Central de Venezuela por su valiosa contribución en mi formación y a la empresa Carbones del Guasare S.A, por haberme brindado su total apoyo como estudiante en esta ilustre casa de estudios.

También doy las gracias a todos y cada uno de los docentes, que dejaron su huella imborrable e invalorable legado durante mi proceso de formación como profesional. Al profesor Miguel Castillejo y al ingeniero Vrotnesky Cediél quienes me prestaron su invalorable colaboración que permitió la culminación satisfactoria de este trabajo de investigación

Ávila P, Gerardo J.

**DISEÑO Y PLAN DE DESARROLLO DE ESCOMBRERAS PARA EL ÁREA
SUR DE LA MINA PASO DIABLO, MUNICIPIO MARA, ESTADO ZULIA**

**Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo. Tutor Industrial: Ing. Vrotnesky
Cediel. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas
y Geofísica. Año 2008, 164 p.**

Palabras Claves: Mina, carbón, estéril, escombreras, retrollenado, taludes,
precipitación, acarreo

Resumen. El presente trabajo plantea una propuesta de diseño y plan desarrollo de escombreras externas para el área Sur de la mina Paso Diablo. Dicha propuesta contempla el estudio desde el punto operativo, geotécnico, hidrológico y ambiental de los distintos lugares dispuestos para la construcción de un sistema de depósitos de material estéril, que garantice la viabilidad de las labores extractivas de las reservas carboníferas existentes en el área Sur. Los resultados obtenidos de la investigación servirán de sustento para el desarrollo de las actividades de aprovechamiento de las reservas carboníferas allí existentes, las cuales asciende a más de 80 MMTm, que a su vez tiene asociado más de 469 MMmcb de estéril. Las actividades de extracción de dicho mineral por parte de la empresa operadora (CDG) Carbones del Guasare, S.A, en la mina en cuestión, tienen previsto comenzar a finales de 2009, por medio del método conocido como tajo abierto (*open pit*) para un tiempo de vida previsto de doce años. En el desarrollo de la investigación se abordan los parámetros de diseño establecidos en la propuesta, además del mecanismo y secuencia de vertido planteado

para el desarrollo de estos depósitos. Por otro lado, se especifica un sistema de control para las aguas de escorrentía y de sedimentos, que se adapte fielmente a las normativas ambientales que regulan toda actividad económica que implique un impacto ambiental, aunado a un plan de recuperación y reforestación de los espacios desocupados una vez finalice la vida útil de la mina.

ÍNDICE

INTRODUCCION	18
CAPÍTULO I EL PROBLEMA	19
1.1- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
2.1.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
2.1.1.- General.....	22
2.1.2.- Específicos	22
1.3.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	23
1.4.- ALCANCES	25
1.5.- LIMITACIONES	25
CAPITULO II DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO	27
2.1.- Carbones del Guasare S.A	28
2.1.1.- Reseña Histórica	28
2.1.2.- Estructura organizativa	28
2.1.3.- Ciclo productivo	31
2.2.- Mina Paso Diablo	33
2.2.1.- Ubicación	33
2.2.2.- Geología regional.....	33
2.2.3.- Geología local	37
CAPITULO III MARCO METODOLÓGICO	39
3.1.- Diseño de la investigación	40

3.2.- Población y muestra.....	40
3.3.- Técnicas e instrumentos.....	40
3.4. Análisis de Datos	41
CAPITULO IV MARCO TEÓRICO.....	42
4.1.- Antecedentes de la investigación.....	43
4.2.- Base conceptual	44
4.2.1.- El Carbón	44
4.2.2.- Escombrera	54
4.2.3.- Lugar de emplazamiento.....	56
4.2.4.- Método constructivo	58
4.2.5.- Principales propiedades índices de las rocas	60
4.2.6.- Ensayos geomecánicos	61
4.2.7.- Cuencas hidrográficas.....	64
CAPÍTULO V ESTUDIO DEL LUGAR DE EMPLAZAMIENTO DE LAS	
ESCOMBRERAS	78
5.1.- Descripción de la zona Sur de la mina Paso Diablo	79
5.1.1.- Ubicación.....	79
5.1.2.- Descripción de la composición florística de Paso Diablo Sur	80
5.1.3.- Tipo del terreno de fundación.....	82
5.1.4.- Descripción del recubrimiento.....	82
5.1.5.- Descripción del sustrato rocoso	83
5.2.- Descripción del sistema hidrológico.....	91
5.2.2.- Modificación del sistema hidrológico.....	93

5.3.- Descripción y evaluación del régimen pluviométrico de la mina.....	94
CAPÍTULO VI PARÁ METROS CONSIDERADOS EN EL MÉTODO	
CONSTRUCTIVO DE LAS ESCOMBRERAS.....	101
6.1.- Método constructivo considerado.....	102
6.1.1.- Descripción de los parámetros de diseño de las escombreras	102
6.1.2.- Propiedades físicas de los estériles	102
6.1.3.- Evaluación de volúmenes de material estéril asociado a la explotación del carbón.....	107
6.2.- Descripción de los parámetros de diseño de las vías principales y secundarias de acceso a las escombreras.....	108
6.3.- Descripción de las operaciones de vertido.....	110
6.3.1.-Ritmos de descarga	110
6.3.2.- Plan de desarrollo adoptado para cada escombrera	113
6.4.- Sistema para el control de aguas superficiales.....	130
6.4.1.- Cunetas en las terrazas y base de las escombreras.....	130
6.4.2.- Cunetas laterales en vías permanentes y temporales	131
6.4.3.- Cuencas de sedimentación.....	132
CAPÍTULO VII MEDIDAS DE CONTROL SOBRE LOS ESTÉRILES	
CARBONOSOS.....	139
7.1.- Factores determinantes considerados en el método de tratamiento	140
7.2.- Excavación y remoción de estériles en combustión	141
7.3.- Recubrimiento de la superficie de escombrera	141
7.4.- Compactación superficial	142

7.5.- Evaluación del riesgo de combustión espontánea.....	142
7.5.1.- Indicadores de temperatura.....	142
7.5.2.- Indicadores de superficie	143
CAPÍTULO VIII RECUPERACIÓN Y REFORESTACIÓN.....	145
8.1.-Especies arbóreas seleccionadas.....	146
8.2.-Método de recuperación de las áreas para reforestación	146
8.2.1.- Densidad de siembra.....	146
8.2.2.- Conformación y acondicionamiento del terreno.....	147
8.2.3.- Estabilización de taludes.....	147
8.2.4.- Recuperación de terrazas y bermas.....	147
8.3.- Medidas biológicas de conservación de suelos.....	148
8.3.1.- Marcación y apertura de hoyos en las terrazas	148
8.3.2.- Plantación y construcción de los platones	148
8.3.3.- Colocación de tutores	148
8.4.- Medidas técnicas silviculturales	149
8.4.1.- Reposición del material muerto	149
8.4.2.- Control fitosanitario de la plantación.....	149
8.4.3.- Fertilización	149
8.4.4.- Riego.....	150
CAPÍTULO IX ANÁLISIS DE RESULTADOS	151
9.1.- Área Sur de la mina Paso Diablo	152
9.2.- Régimen pluviométrico de la mina Paso Diablo	154
9.3.- Sistema de control de aguas superficiales.....	155

9.4.- Sistema de vías de acceso a las escombreras.....	157
9.5.- Parámetros de diseño y secuencia de desarrollo de las escombreras.....	157
9.6.- Condiciones finales de las escombreras.....	159
CAPÍTULO X CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	161
10.1.- Conclusiones.....	162
10.2.- Recomendaciones	163
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
ANEXOS	167

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pag.
IV.1	Clasificación de los carbones según su contenido de carbono	47
IV.2	Factor de correlación del esfuerzo de compresión uniaxial y el índice de resistencia $Is_{(50)}$	63
IV.3	Valores del Coeficiente de escorrentía	70
IV.4	Velocidades máximas recomendadas para canales	71
IV.5	Velocidades máximas para canales en función de las pendientes de la superficie	72
IV.6	Valores del coeficiente de rugosidad de Manning	73
IV.7	Viscosidad cinemática del agua en función de su temperatura	74
IV.8	Intervalos granulométricos para diversas partículas	74
V.1	Composición arbórea de la mina Paso Diablo	80
V.2	Profundidad de las muestras pertenecientes al Pozo PDS-003A	83
V.3	Profundidad de las muestras pertenecientes al Pozo PDS-004A	83
V.4	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 1, Pozo PDS-003A	84
V.5	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 2, Pozo PDS-003A	85
V.6	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 3 Pozo PDS-003A	85
V.7	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 4, Pozo PDS-003A	86
V.8	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 1, Pozo PDS-004A	87
V.9	Resultados de análisis petrográfico de las muestra 2 y 3, Pozo PDS-004A	88
V.10	Resultados de análisis petrográfico de la muestra 4, Pozo PDS-004A	88
V.11	Profundidad y pozos correspondientes a las muestras ensayadas	89
V.12	Resultados de ensayo de carga puntual de las muestras	89
V.13	Características principales de las cuencas del área de la mina Paso Diablo Sur	92
V.14	Registros de lluvias máximas, estación El Carbón	96
V.15	Registros de lluvias máximas, estación Manuelote	96
V.16	Registros de lluvias máximas, estación Carichuano	96
V.17	Registros de intensidades de lluvia, estación El Carbón	97
V.18	Registros de intensidades de lluvia, estación Manuelote	97

V.19	Registros de intensidades de lluvia, estación Carichuano	98
VI.1	Parámetros de diseño de las escombreras externas según informe geotécnico de la Golder Associates, 1997	101
VI.2	Parámetros de diseño de las escombreras internas según informe geotécnico de la Golder Associates, 1997	101
VI.3	Características geomecánicas del material estéril	102
VI.4	Parámetros de diseño propuestos para las escombreras externas	105
VI.5	Volúmenes de estériles por niveles de la mina Paso Diablo Sur	107
VI.6	Características técnicas principales de los camiones Caterpillar 793C	109
VI.7	Características operativas principales de los equipos de carga	112
VI.8	Capacidades por sectores y niveles de la escombrera Suroeste	114
VI.9	Ritmos y distribución de descarga de estéril para la escombrera Suroeste	120
VI.10	Capacidades por niveles de la escombrera Sureste	120
VI.11	Ritmo y distribución de descarga para la escombrera Sureste	125
VI.12	Capacidades por niveles de la escombrera Central	126
VI.13	Ritmo y distribución de descarga para la escombrera Central	128
VI.14	Superficies por niveles de la escombrera Suroeste	132
VI.15	Superficies por niveles de la escombrera Sureste	132
VI.16	Superficie por niveles de la escombrera Central	132
VI.17	Caudales de aporte de las escombreras hacia las cuencas de sedimentación	133
VI.18	Dimensiones de los canales colectores	133
VI.19	Dimensiones calculadas de las cuencas de sedimentación	134
VIII.1	Especies de gramíneas empleadas en el plan de recuperación y reforestación de las escombreras	145

Lista de figuras

Fig.	Descripción	Pag.
1.1	Organigrama de CDG	27
1.2	Ciclo productivo del carbón	31
2	Ubicación de la mina	32
3	Mapa geológico regional	32
4	Columna estratigráfica tipo de la mina Paso Diablo	37
5	Heterogeneidad granulométrica de los estériles en una escombrera	54
6	Clasificación de las escombreras según su emplazamiento respecto al área de explotación	55
7	Tipos de escombreras de acuerdo a sus lugares de emplazamiento	56
8	Método constructivo de escombreras por vertido libre	57
9	Método constructivo de escombreras mediante fases adosadas	58
10	Método constructivo de escombreras mediante dique en pie de retención	58
11	Método constructivo de escombreras mediante fases ascendentes superpuestas	59
12	Preparación de muestra para aplicación de carga en dirección diametral	61
13	Preparación de muestra para aplicación de carga en dirección longitudinal	61
14	Superficie de rotura circular analizado por el método de Bishop simplificado	76
15	Áreas correspondientes a la mina Paso Diablo Sur	79
16	Ubicación relativa de los pozos muestreados	82
17	Sistema hidrológico del área Sur de la mina Paso Diablo	92
18	Sistema hidrológico modificado del área Sur de la mina Paso Diablo	93
19	Lluvias promedio mensual para cada estación	95
20	Lluvias promedio anual para cada estación	95
21	Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno de 11 años, estación El Carbón	99
22	Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno 11 años, estación Manuelote	99
23	Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno 11 años, estación Carichuano	99
24	Geometría de diseño para un talud	103
25	Análisis de estabilidad del talud por el método de Bishop simplificado	103
26	Perfil de una escombrera externa de base plana	104

27	Análisis de estabilidad de la escombrera considerando la afectación de tres niveles	105
28	Análisis de estabilidad de la escombrera considerando la afectación de cuatro niveles	105
29	Geometría de las vías principales y secundarias construidas en cortes	108
30	Geometría de las vías principales y secundarias construidas en rellenos	108
31	Avance inicial por vertido libre para taludes de 10m de altura	110
32	Ejecución del corte en el primer subnivel y avance del segundo por vertido libre	110
33	Realización del corte en el segundo subnivel para completar el talud final	111
34	Colocación de la capa vegetal	111
35	Diseño y emplazamiento final de la escombrera Suroeste	113
36	Vías de comunicación iniciales de los niveles en mina norte y sur con el lugar de emplazamiento de la escombrera Suroeste	114
37	Comunicación de los niveles 240 y 225 en mina con los sectores 120 y 140 al sur de la escombrera SO	115
38	Comunicación de los niveles 210 y 195 en mina con los niveles 120 y 140 del sector central de la escombrera SO	115
39	Configuración final de los sectores centro y sur en los niveles 120 y 140 de la escombrera SO	116
40	Desarrollo del sector norte a nivel 140 de la escombrera	116
41	Construcción del terraplen para el desarrollo del nivel 160 en los sectores norte y centro	117
42	Condición final de los sectores norte y centro de la escombrera	117
43	Desarrollo del nivel 180 del sector central de la escombrera	118
44	Construcción de la rampa de acceso a los niveles 160 y 180 de la escombrera	118
45	Configuración final de la escombrera SO	119
46	Diseño y emplazamiento final de la escombrera Sureste	121
47	Desarrollo del nivel 120 de la escombrera SE	122
48	Construcción de las vías de acceso e inicio de la labores desarrollo del nivel 140 de la escombrera	122
49	Construcción de las vías de acceso e inicio de la labores desarrollo del nivel 160 de la escombrera	123
50	Configuración final del nivel 160 de la escombrera	124
51	Construcción de las vías de acceso e inicio de la labores desarrollo del nivel 180	124
52	Construcción de las vías de acceso y desarrollo del nivel 200 de la escombrera	125

53	Bloque correspondiente al 27% del estéril a nivel 60 en la mina	127
54	Desarrollo de los niveles 100 y 120 de la escombrera Central	127
55	Configuración final de la escombrera Central	128
56	Configuración final del sistema de escombreras externas del área Sur de la mina Paso Diablo	129
57	Cuneta para drenaje de aguas de escorrentía para las terrazas y base de las escombreras	130
58	Geometría de una cuneta lateral en una vía tipo	131
59	Cuenca de sedimentación de la escombrera Suroeste	134
60	Cuenca de sedimentación norte de la escombrera Sureste	135
61	Cuencas de sedimentación localizadas en el extremo Este de la escombrera Sureste	136
62	Sistema de drenaje establecido para la escombrera Central	137
63	Material estéril combustionado posterior a mitigación con monitor hidráulico	140
64	Equipos de acarreo disponibles	141
65	Material estéril en estado de combustión espontánea	142
66	Exposición de estéril carbono en taludes finales	143
67	Patrón de siembra de árboles	145
68	Dimensiones de los hoyos para la siembra de los árboles	147
69	Comparación entre la resistencia a compresión de las muestras y la carga litoestática ejercida sobre la fundación por la escombrera Suroeste y Central	152
70	Comparación entre la resistencia a compresión de las muestras y la carga litoestática ejercida sobre la fundación por la escombrera Sureste	153

INTRODUCCION

En la actividad minera se desarrollan un conjunto de etapas y fases de producción que se encuentran en una estrecha interdependencia, por lo que una adecuada ejecución de éstas de forma previa, garantizará la eficiencia de las posteriores.

En la minería de carbón a cielo abierto, la principal característica es la alta productividad, por lo que la etapa de arranque puede ser ejecutada por empleo directo de maquinaria o por medio del uso de explosivos. Como consecuencia de ello, se generan altos volúmenes de material estéril que requiere de un adecuado y preconcebido plan de diseño y desarrollo de los depósitos, destino final del mismo.

Las escombreras como depósitos secuenciales de material estéril, deben cumplir con especificaciones técnicas, operativas, económicas, socio-económicas y ambientales que garanticen su factibilidad. De allí, la razón de su importancia en la cadena productiva dentro de la actividad minera a pequeña y a gran escala.

La presente monografía se realiza bajo la estructura metodológica exigida para el desarrollo del trabajo especial de grado. El mismo está conformado por un planteamiento del problema, establecimientos de objetivos, justificación, alcances, marco teórico, marco metodológico, conclusiones y recomendaciones que servirá de base para el desarrollo de la investigación.

Por otro lado, se especifican las técnicas e instrumentos que se emplearán en las labores de recopilación de la información y análisis de los mismos, en función de un plan de acción previamente establecido.

CAPÍTULO I
EL PROBLEMA

1.1- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la minería a cielo abierto de carbón, los volúmenes de estéril removidos anualmente son altos y son inherentes a las condiciones geológicas, económicas y técnicas de los yacimientos que propicien la extracción del mineral, en función de la oferta-demanda que establece el mercado y las reservas disponibles. Dicho material se caracteriza por propiedades físico-químicas particulares que exige de labores operativas de manejo especiales, en consonancia con los niveles de producción y de parámetros ambientales que establezca la empresa operadora y la ley respectivamente.

En la mina Paso Diablo, operada por la empresa Carbones del Guasare S.A (CDG), se generan producto de la actividad extractiva, tres tipos de materiales estériles en función de la disposición secuencial y natural del yacimiento: capa vegetal, material superficial (*overburden*) y material del subsuelo (*interburden*). Estos exigen para su manejo, de una planificación que especifique las condiciones finales en las áreas seleccionadas para su vertido, obedeciendo a factores de costos contemplados en el presupuesto: relación de remoción estéril-carbón, características estructurales del yacimiento y perfiles de acarreo óptimos.

En la mina Paso Diablo, se dispone de tres amplias zonas, localizadas al Sur de la misma. Estas constituyen una posibilidad factible para la construcción de escombreras que reciban el material estéril proveniente de los desarrollos de mina en el sector del Sur, en su primera fase y durante todo su desarrollo. La mina cuyo desarrollo se efectúa actualmente en la zona Norte, cuenta con un sistema de

escombreras externas en fase de desarrollo localizados en el Noroeste (escombrera Oeste), Norte (escombrera Norte) y Noreste (escombrera Este), siendo esta última desarrollada hasta el nivel 180. Los planes de mina establecen que los volúmenes de material estéril que recibirán las escombreras en cuestión, serán provenientes del desarrollo en las áreas al Norte, hasta finalizar el período quinquenal 2007-2011. Para el año 2009, se tiene contemplado comenzar el predesarrollo en la zona Sur, para posteriormente iniciar las operaciones de extracción del carbón en 2010. En vista de esta situación, existe la necesidad de habilitar nuevos sectores para el depósito de estéril, en donde se ubican las restantes reservas carboníferas, enmarcadas dentro de la concesión que opera CDG actualmente, las cuales se encuentran por el orden de los 80 MMTm y de la que se tiene previsto se generen 469,908 MMmcb, es decir, 610,880 MMm³ suelto de estéril.

2.1.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1.- General

- Proponer un diseño y un plan de desarrollo de escombreras para el área Sur de la mina Paso Diablo, con el propósito de maximizar la capacidad de recepción de material estéril y mantener niveles de producción óptimos.

2.1.2.- Específicos

- Elaborar un levantamiento y estudio de la zona en ocupación.
- Evaluar el sistema de drenajes naturales y régimen pluviométrico anual de la mina.
- Plantear mecanismos de control de aguas superficiales.
- Elaborar un sistema de vías principales y secundarias de acceso al área.
- Proponer los parámetros de diseño y secuencia de desarrollo de las escombreras.
- Generar los modelos tridimensionales de las escombreras especificando las condiciones finales de las mismas y los volúmenes parciales y totales de material estéril.

1.3.- JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para Carbones del Guasare S.A, es de suma importancia el aprovechamiento de los recursos carboníferos por medio del método conocido como Tajo abierto (*open pit*), regido bajo la filosofía de la eficiencia en consonancia con políticas y estrategias que se encuentren en completa armonía con el ambiente. De allí que la planificación de mina, además de considerar los parámetros técnicos-económicos que garanticen la rentabilidad del negocio carbonífero, establece en igual orden de importancia, lineamientos claros y específicos en la selección de la ubicación y el método constructivo de los depósitos de material estéril, siendo estos, una necesidad y un producto inherente de toda actividad minera independientemente de la naturaleza del yacimiento y del mineral extraído.

En la actualidad en la mina Paso Diablo, existe un sistema de escombreras internas y externas, de las cuales las primeras se desarrollan por el método constructivo de vertido libre sobre áreas desocupadas, a través del procedimiento conocido bajo el nombre de retrolenado (*backfill*), mientras, que las segundas son construidas mediante el método fundamentado en fases ascendentes superpuestas, y cuyos parámetros de diseño se basan en resultados generados de estudios geotécnicos previos. El mencionado sistema de escombreras de acuerdo al plan quinquenal correspondiente al período 2007-2011, el cual se encuentra en actual ejecución, tiene previsto recibir el material estéril proveniente de los avances en los sectores noroeste, noreste y centro denominado sector de transición, en forma exclusiva.

En vista de esta situación, existe la necesidad de establecer y habilitar nuevas zonas de vertido para la construcción de escombreras, que permitan el desarrollo de mina en el área Sur. Para lograrlo se dispone de un amplio sector ubicado en la zona en cuestión, el cual posee condiciones de relieve suave e hidrografía que cumple con los requerimientos de viabilidad, necesarios para la construcción de un depósito de estéril. Dicho sector cuenta con una estación de medición pluviométrica cercano (estación Carichuano), la cual proporciona información suficiente y necesaria sobre el régimen pluviométrico de la mina.

La gerencia de ingeniería y planificación de CDG, ha elaborado una propuesta inicial de desarrollo de escombrera en el área, la cual se tiene estimado comience su primera fase a finales de 2009 y principios de 2010. La investigación dará soporte técnico a dicha propuesta para su ampliación, definiendo con ello los mecanismos operativos necesarios para el cumplimiento de los objetivos que sean establecidos por la empresa, durante los doce años previstos para el proyecto.

Con la construcción e incorporación de esta escombrera en la zona Sur de la mina Paso Diablo, se podrá dar inicio a las labores de desarrollo, garantizando con ello las condiciones que propicien la posibilidad de alcanzar niveles de producción de carbón óptimos y de forma sostenible.

1.4.- ALCANCES

El trabajo de investigación se fundamentará en el desarrollo de una propuesta de diseño y de un plan de desarrollo de escombreras para el área Sur de la mina Paso Diablo. Dicha investigación se desarrollará con información obtenida a partir de informes preliminares sobre el proyecto de mina Sur elaborada por la Gerencia de Ingeniería de CDG, la cual considera tres escombreras en la mencionada zona, al Oeste, Este y Norte de la mina. La investigación considerará, sólo el diseño y plan de desarrollo de las escombreras externas, fundamentado en datos recopilados en informes técnicos proporcionados por la empresa operadora en cuestión.

1.5.- LIMITACIONES

Para la caracterización geotécnica del lugar de emplazamiento por razones de tiempo y costo, se considerará el análisis de trece núcleos pertenecientes a cinco pozos (PDS-003A, PDS-004A, PDS-005B, PDS-017A y PDS-020P), localizados 1,4 km de distancia al Noreste del Centro de Operaciones de CDG, los cuales constituían los únicos, de los que se pudo obtener muestras físicas para la realización de los estudios que dieran sustento a la investigación. Para la determinación de las propiedades mecánicas del sustrato rocoso, en cuanto a la evaluación del asentamiento asociado a la carga litoestática ejercida por las escombreras, sólo se pudo someter las muestras a ensayos de carga puntual, además de solamente poder practicar análisis petrográfico a muestras pertenecientes a los dos primeros pozos, antes mencionados. Los resultados suministrarán información referencial y no

concluyente de las propiedades geomecánicas y petrográficas del sustrato rocoso del área en cuestión.

CAPITULO II
DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

2.1.- Carbones del Guasare S.A

2.1.1.- Reseña Histórica

En 1876 el gobierno del estado Zulia comisiona al geólogo Wenceslao Briceño Méndez para explorar la zona. En 1973 le son entregadas a la Corporación para el Desarrollo de la Región Zuliana (Corpozulia) para la exploración de 70 mil hectáreas que integran la Cuenca Carbonífera del Guasare.

En 1986 por decisión del Ejecutivo Nacional, Corpozulia entrega a PDVSA el manejo de las concesiones a través de su filial Carbozulia, con lo que se inicia explotación y comercialización del carbón. Con la creación en 1988 de Carbones del Guasare S.A. (CDG). El 2 de febrero del 2004 el Ejecutivo Nacional transfiere nuevamente a Corpozulia las acciones mineras de CDG

2.1.2.- Estructura organizativa

La figura 1.1, muestra la estructura organizativa de la empresa CDG:

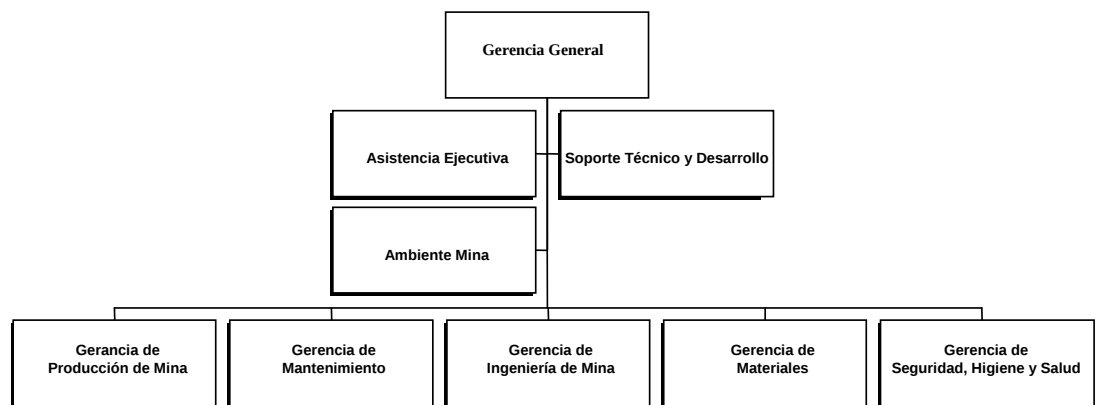


Figura 1.1: Organigrama de CDG

Fuente: Superintendencia de Ingeniería de Mina, CDG, 2007

La empresa operadora de la mina Paso Diablo, como lo indica la figura anterior, se encuentra conformado por una Gerencia General de Mina, la cual coordina y ejerce las funciones de administrar los presupuestos a través de la Asistencia Ejecutiva.

Establece los lineamientos sobre los que se fundamenta la planificación a largo plazo mediante el Departamento de Soporte Técnico y Desarrollo, y por último define las estrategias a seguir en las operaciones en la mina bajo los estatutos especificados en las legislaciones ambiental y laboral, por medio del Departamento de Ambiente de Mina.

Las dependencias subordinadas a la Gerencia General de Mina, son las siguientes:

a.- Gerencia de Producción de Mina

Se encarga de coordinar y definir las acciones operativas necesarias para llevar cabo la secuencia de explotación en los frentes de acuerdo a lo establecido en la planificación de mina. Una de las responsabilidades de esta gerencia, es la de garantizar las condiciones necesarias para que las operaciones conserven niveles de estandarización permitiendo así, que las labores de mina sean lo más eficientes posible. La Gerencia de Producción cuenta con una Superintendencia de Perforación y Voladura y un personal de topografía de manera exclusiva, con los cuales se garantiza de las condiciones de trabajo de los frentes para las palas.

b.- Gerencia de Mantenimiento

Su responsabilidad radica en garantizar que el inventario de equipos pesados y livianos, encuentre futuro disponible para la ejecución de las labores de mina. De su desempeño depende que las estadísticas de disponibilidades físicas de dicho inventario sea el más óptimo posible.

c.- Gerencia de Ingeniería de Mina

Establece los lineamientos para las secuencias de explotación de los mantos de carbón en plazos definidos para ser ejecutadas por la Gerencia de Producción, fundamentado en la información suministrada por la Gerencia de Mina, la cual especifica las reservas minables a través de su Superintendencia de Geología. Por otra parte, elabora los diseños y los planes de desarrollo de las escombreras, además de definir las estrategias que impliquen labores construcción de nueva o desmantelamiento de infraestructura de mina.

Por otro lado la Gerencia de Mina, además de coordinar las labores de exploración, elaboración del modelo geológico y efectuar los cálculos de las reservas mineras a través de la Superintendencia de Geología, gestiona también, el despacho del carbón en el mercado nacional e internacional, garantizando que los cargamentos cumplan con lo requerimientos de tonelaje y calidad que los clientes establecen, mediante el muestreo de en las labores de perforación en las actividades de exploración, el cual es responsabilidad de la Superintendencia de Control de Calidad

d.- Gerencia de Materiales

Gestiona los procesos de adquisición y administración del inventario de repuestos de los equipos de minería y auxiliares, además de todos los materiales de seguridad requeridos por el personal de la mina para el ejercicio de sus funciones.

e.- Gerencia de Seguridad, Higiene y Salud.

Tiene como papel principal verificar y hacer cumplir los estatutos de seguridad laboral tanto para el personal operativo como administrativo. Efectúa evaluaciones integrales y regulares de las instalaciones donde se desarrollan las labores del

personal en todos niveles, como mecanismo de resguardo de la integridad física y mental de estos.

2.1.3.- Ciclo productivo

La actividad extractiva del carbón a cielo abierto, contempla un conjunto de etapas y fases, las cuales son interdependientes. Las etapas principales de la actividad desarrollada por CDG son los siguientes:

- Evaluación de las reservas de estéril y carbón.
- Ocupación y deforestación de áreas.
- Perforación y voladura del macizo rocoso.
- Arranque, carga y acarreo del material estéril fragmentado.
- Remoción y almacenamiento del estéril en las escombreras.
- Arranque, carga y acarreo del carbón.
- Transporte del carbón a los patios de remanejo o a la trituradora primaria de acuerdo al nivel del inventario.
- Reducción de tamaño del carbón, transporte por medio de cintas hasta los patios de apilamiento.
- Carga en los camiones y transporte hasta el puerto de embarque.
- Almacenamiento del carbón en pilas.
- Carga del carbón a la cinta transportadora hasta la costa.
- Carga en las gabarras.
- Embarque final en los buques

El proceso industrial del carbón efectuado por CDG, es mostrado en la figura 1.2.

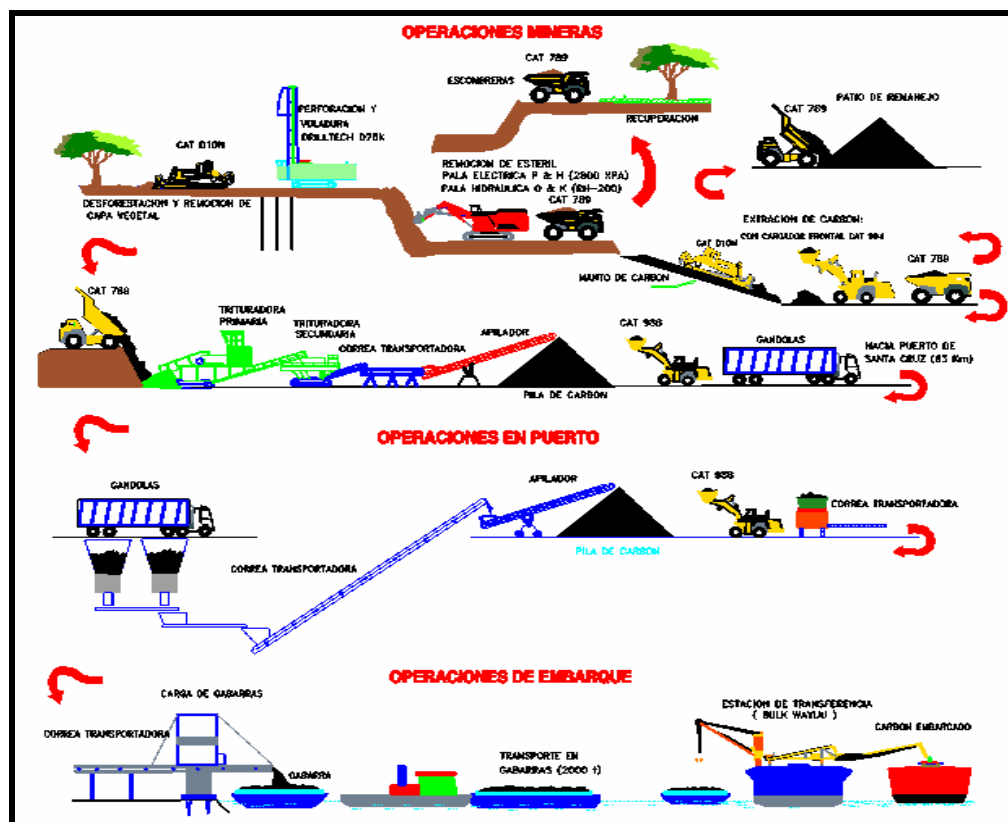


Figura 1.2: Ciclo productivo del carbón
Fuente: Superintendencia de Ingeniería y planificación, CDG

2.2.- Mina Paso Diablo

2.2.1.- Ubicación

La mina Paso Diablo se localiza en la parroquia Luis De Vicente del municipio Mara al noroeste del estado Zulia. La figura 2 muestra la ubicación de la mina.

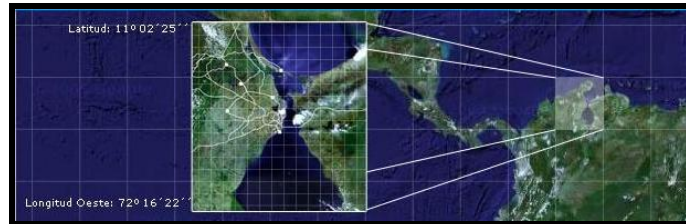


Fig. 2: Ubicación de la mina

Fuente: www.guasare.com, Consulta efectuada en octubre de 2007

2.2.2.- Geología regional

Las formaciones geológicas Guasare, Marcelina y Misoa constituye las formaciones tipo de la región en donde se encuentra ubicada la mina Paso Diablo y es el sinclinal de Manuelote, se ubican estas dos formaciones que forman parte de unidades del Paleoceno (Guasare y Marcelina), y una que forma parte de la unidades del Eoceno (Misoa), siendo la Formación Marcelina la que contiene los carbones económicamente minables. La figura 3, muestra el mapa geológico regional.

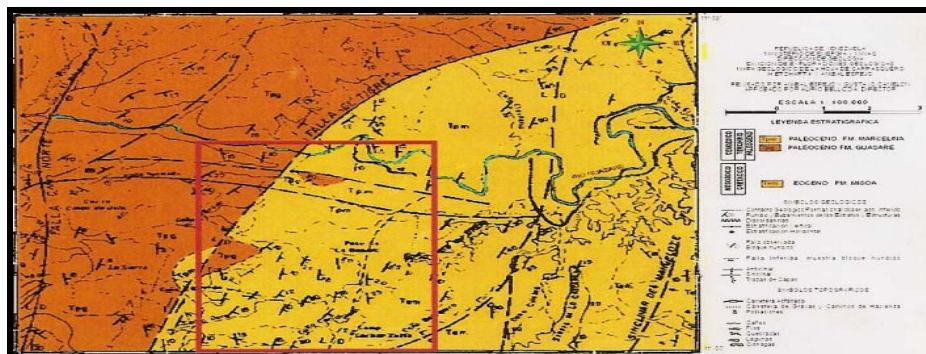


Fig. 3: Mapa geológico regional

Fuente: "Informe favorable para adquisición, traslado y uso de explosivos", Superintendencia de perforación y voladura, Carbones del Guasare S.A (CDG), 2007

2.2.2.1.- Formación Guasare

- Localización:

Margen sur del río Guasare, a unos 4 km de la estación El Carbón y 300 metros bajo la desembocadura del caño Colorado, en el límite norte del municipio Mara, estado Zulia.

- Descripción:

En los afloramientos de los ríos Guasare, Socuy y Cachirí, la Formación consiste en calizas pardo grisáceo a gris amarillento o gris, generalmente glauconíticas. Algunas capas son ricas en restos fosilíferos de *Ostrea* y *Venezulia*. Intercaladas con las calizas, se presentan lutitas y limolitas grises a parduscas y areniscas grises, calcáreas y glauconíticas. En el subsuelo del campo Alturitas, Key señala que la litología consiste principalmente en lutitas gris oscuro, arenosas, macizas o laminadas, areniscas marron claro, calcáreas y glauconíticas. El espesor de la Formación Guasare es de unos 120 m. En el río Cachirí es de 390 m, y en el río Socuy, de 370 m.

En la Sierra de Perijá y la mayor parte de la plataforma Maracaibo, se encuentra concordante con la Formación Mito Juan. Al SE del lago de Maracaibo yace con la Formación Colón. En el tope tiene un contacto de transición con la formación Marcelina de Perijá y Costa Occidental del Lago. Por el este. Al desaparecer Marcelina por la erosión, el contacto pasa a ser discordante con la Formación Misoa.

2.2.2.2.- Formación Marcelina

- Localización:

Tiene su sección tipo en el río Guasare, desde el tope de una caliza maciza, 550 m aguas arriba de la desembocadura del caño Colorado, hasta la base de unidad de areniscas gruesas y masivas, a 50 m bajo la boca del caño Santa Rosa, afluente del río Guasare.

- Descripción:

Intercalación de areniscas, lutitas, lutitas arenosas y capas de carbón. En la base de la unidad, las areniscas son macizas, gruesas, de color gris claro y localmente calcáreas. Más arriba se hacen delgadas, están intercaladas con lutitas color gris y presentan planos de estratificación con mica y carbón.

El carbón es de tipo sub-bituminoso a bituminoso, y se presenta principalmente hacia la base de la formación, en capas de 2 hasta 10 m de espesor.

2.2.2.3.- Formación Misoa

- Localización:

Tiene su sección tipo aflorando a lo largo del río Misoa, donde éste corta a través del flanco occidental de la Serranía de Trujillo.

- Descripción:

Las areniscas presentan tamaños variados de grano, pero en general, son de grano fino y gradan a limolitas y luego a lutitas. Son generalmente auras, micáceas, frecuentemente carbonáceas y generalmente bien estratificadas a macizas. Se presentan en unidades compuestas, con espesores normales de varias decenas de

metros, las cuales localmente se agregan para totalizar espesores de centenares de metros, formando serranías pronunciadas.

Las lutitas tienen composición variable, casi siempre son micáceas, arenosas a limolíticas, con abundantes estratos delgados, estrías y películas de arena, limo y material carbonáceo (incluyendo restos de hojas), que les den un aspecto laminado con estructura "flaser". Se presentan tanto en forma de intercalaciones menores en las unidades compuestas de arenisca-limolita, como en secuencias que alcanzan varios centenares de metros de espesor, entre complejos de areniscas.

Las calizas son escasas y se presentan en la base de la formación, son de color gris a gris azulado, duras, con espesores de menos de un metro a varios metros, arenosas, gradando a areniscas calcáreas.

La Formación Misoa se reconoce en el subsuelo del Lago de Maracaibo y al oeste del mismo, desde el campo Mara a Alturitas, al suroeste se extiende al Canopo de Tarra, donde se relaciona lateralmente con la Formación Mirador. En su tope esta formación se encuentra en contacto concordante con la formación Paují; el contacto puede ser abrupto o transicional. Hacia el este, presenta a veces un intervalo glauconítico (Miembro Caús) en el límite formacional. La base de dicha Formación, de manera general, se define como un cambio en sentido descendente, a las lutitas de la Formación Trujillo; el contacto no se ha delimitado en detalle, debido a la presencia de capas de areniscas de gran espesor presentes en esta última. En el subsuelo del Lago de Maracaibo, la unidad suprayace discordante a las formaciones Guasare y Marcelina.

2.2.3.- Geología local

La Formación Marcelina está conformada por un número de mantos de carbón que oscila entre 25 y 30, de los cuales se distinguen nueve grupos. Actualmente, en la Mina Paso Diablo se explotan 17 de estos mantos, del 4O al 8I, cuyos espesores suman 35 m, contenidos a su vez en la columna estratigráfica de 200 m aproximadamente. Los carbones del grupo 9 y superiores afloran al oeste del corredor de falla, fuera del bloque a ser explotado. La información geológica recopilada para el área de la Mina Paso Diablo, proviene de las observaciones de campo en afloramientos, en plataformas, vías y caños, y por perforaciones realizadas. La orientación de estos mantos es N10° E con buzamiento entre 10° y 18°. Los límites del bloque explotado son los siguientes:

Límite sur: falla normal de Baqueta, con rumbo E-O y buzamiento alto al sur (Quebrada Baqueta).

Límite este: definido por el corredor de falla; éste es un sistema formado por dos fallas inversas que atraviesan el depósito de norte a sur.

Límite oeste: definido por la línea de afloramiento del manto 4O y/o la relación de remoción (estéril/carbón) del manto en cuestión (5,5:1).

Límite norte: determinado por los criterios de minería y la continuidad de los mantos.

En la mina Paso Diablo existe un sistema de fallas subparalelas de rumbo N45°O, con espaciamientos entre 60 y 160 m; en el área de mina aparenta ser mayor debido no a la simplificación de la tectónica, sino a la poca información que se posee. La figura 4 muestra la columna estratigráfica tipo del área de Mina.

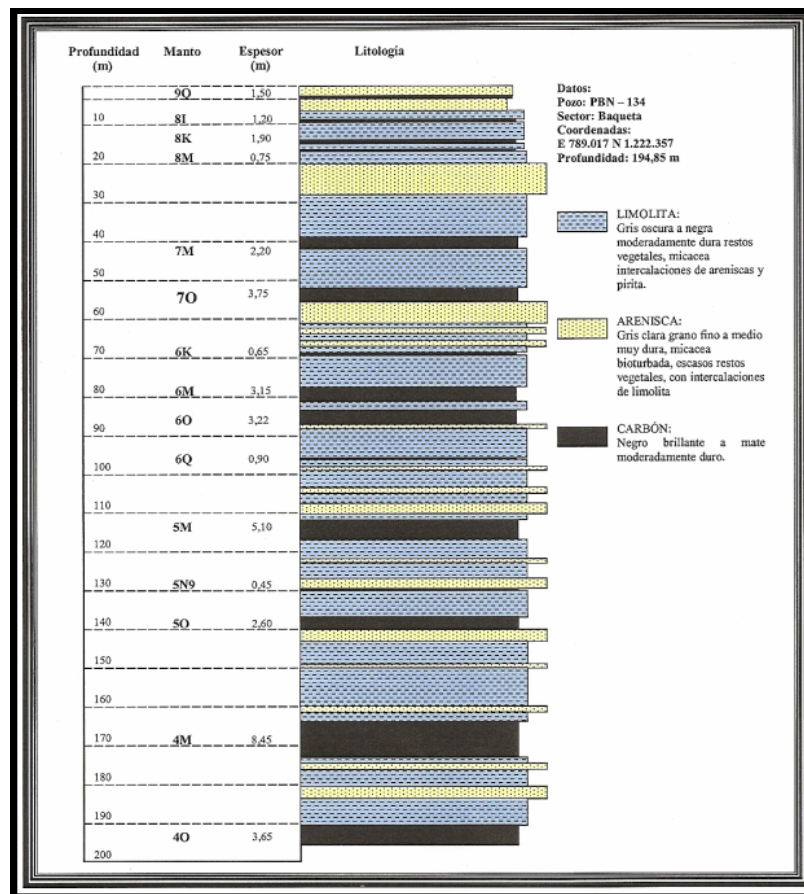


Fig. 4: Columna estratigráfica tipo de la mina Paso Diablo

Fuente: "Informe favorable para adquisición, traslado y uso de explosivos", Superintendencia de perforación y voladura, CDG, 2007

CAPITULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1.- Diseño de la investigación

De acuerdo a los objetivos de la investigación, la misma será netamente correlacional, en donde se establecerá la relación entre las propiedades geomecánicas de los estériles, además de los criterios considerados en el diseño y construcción de las escombreras externas en el área Norte para su incorporación en la zona Sur de la mina Paso Diablo.

3.2.- Población y muestra

La población objeto de estudio corresponde a la mina Paso Diablo, ejecutada por la empresa Carbones del Guasare S.A, mientras, que la muestra está representada por el sector Sur en la que se tiene previstos realizar la construcción de un sistema de escombreras externas, cuyo desarrollo se tiene previsto inicie a finales de 2009.

3.3.- Técnicas e instrumentos

Las técnicas e instrumentos que se emplearán para la recopilación de la información requerida para el desarrollo de la investigación, serán:

- Recopilación de información documental.
- Actividades de recopilación de información mediante trabajo de campo.
- Evaluación de los parámetros de diseño y planes de escombreras previos establecidos por la empresa operadora.
- Análisis y procesamiento de los resultados mediante trabajo de oficina.

- Generación de los modelos finales de escombreras propuestos para el área Sur de la mina Paso Diablo, especificando la secuencia de desarrollo por niveles y los volúmenes de estéril asociado a cada uno de ellos.

3.4. Análisis de Datos

El procesamiento de datos y su posterior análisis se fundamenta en la utilización de herramientas informáticas específicas: módulo Minescape y Geo-Slope desarrollados por las empresas Mincom y Geostudio, respectivamente.

CAPITULO IV.
MARCO TEÓRICO

4.1.- Antecedentes de la investigación

Kent, Alistair (2000) “Métodos de análisis de estabilidad y desarrollos recientes de escombreras en minas de carbón”

Estudio y evaluación de estabilidad y métodos constructivos en escombreras de una mina de carbón en la Columbia Británica del Canadá.

Se efectúa una correlación de las condiciones geomecánicas, topográficas y climatológicas de la mina en relación a otros ocho desarrollos carboníferos en los Estados Unidos.

Jaspe, Sixto (2001) “Estudio de factibilidad técnica para la recuperación de carbón, bajo ubicación potencial de una escombrera al noreste del sector Baqueta, Mina Paso Diablo, Carbones del Guasare S.A”.

Descripción, evaluación y análisis de núcleos de perforación en el área noreste del sector Baqueta con el propósito de establecer una escombrera considerando aspectos de viabilidad y factibilidad operativa para el lugar seleccionado.

Van Zanten, Johan (2004) “Diseño y manejo de aguas de mina en el Pit Baqueta de la mina Paso Diablo, Estado Zulia como aporte al desarrollo sustentable de la región”

Propuesta para la construcción de obras de drenaje para la conducción de aguas de mina y retención de sólidos en suspensión hídrica en el Pit Baqueta de la mina Paso Diablo, operada por la empresa Carbones del Guasare S.A. El propósito del manejo de aguas de mina es evitar las inundaciones que ocurren durante los períodos de precipitación, con la misión y visión de conservación ambiental e inserción de la actividad minera en el concepto de sustentabilidad.

Angola, Kenneth (2005) “Evaluación de autocombustión de carbón en mina Paso Diablo con fines de mitigación de impacto ambiental, Carbones del Guasare S.A, municipio Mara, estado Zulia.”

Esta investigación se fundamenta en el análisis de los mecanismos por los cuales ocurre la combustión espontánea durante la extracción del carbón y su almacenamiento. También se orienta hacia las incidencias de fuego incontrolables en el amplio contexto geográfico y en términos del impacto de ocurrencias mayores en el ambiente global.

Primeramente se describen los factores intrínsecos y extrínsecos que promueven el proceso de autocombustión, para posteriormente efectuar estudios y análisis físico-químicos para conocerlos a fondo y determinar las partes que generan este proceso.

4.2.- Base conceptual

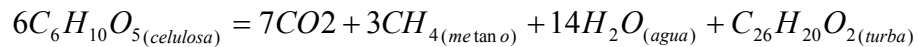
4.2.1.- El Carbón

De acuerdo a López (1976), se da el nombre de carbón mineral, a una sustancia sólida de color castaño o negro, que proviene del cambio metamórfico sufrido por la acumulación de fragmentos de plantas enterradas bajo capas de rocas sedimentarias. Estos materiales orgánicos crecieron o se acumularon inicialmente en un medio cienagoso formando lechos de turba. Por lo que se puede considerar que el punto de partida de una formación de carbón es usualmente la turba o alguna acumulación de material orgánico, en estado de parcial descomposición. Estos lechos de turba fueron petrificados bajo el proceso de enterramiento bajo gruesas capas de sedimentos,

durante el cual ayudaron otros procesos geológicos, que los comprimieron y ayudaron en el metamorfismo a convertir la turba original en carbón.

El carbón mineral se forma a partir de la turba, que es un tipo de humos que resulta de la descomposición de la materia vegetal en condiciones de excesiva humedad o en zonas prácticamente cubiertas de agua.

La química del cambio gradual de la planta vegetal a la turba, es expresada de una manera muy generalizada por la siguiente ecuación:



4.2.1.1.- Yacimientos de carbón mineral

Los yacimientos o depósitos de carbón mineral, son cuerpos de rocas o litocuerpos de un número subordinado de éstos, o estratos o capas sedimentarias horizontales o inclinadas, según la estructura geológica regional en que ocurran; superpuestas formando cada una condiciones ambientales diferentes. De manera, que la mayoría de los depósitos carboníferos, son cuerpos de rocas multilaminares, compuestas de un número de diferentes litotipos. La composición vertical de un yacimiento puede variar al igual que de forma lateral, debido a que el área de cada litotipo es más extenso lateralmente que verticalmente. La extensión lateral de un litotipo refleja la extensión de la turbera, mientras, que el espesor representa la duración de ocupación de sitio de la misma.

Los petrólogos de carbón y los paleobotánicos, reconocen las capas de carbón por su aparente diferencia y porque cada una está formada por una asociación particular de materia orgánica e inorgánica.

Las características físicas de los depósitos de carbón conciernen a los aspectos estructurales de sus capas y a su textura que se determinan mediante el estudio de la composición física macroscópica y microscópica de sus litocuerpos. Desde el punto de vista estructural los mantos o capas de carbón, constituye un conjunto de estratos geológicos caracterizados por las misma irregularidades de espesor, uniformidad y continuidad; exactamente igual que cualquier conjunto de estrato de origen sedimentario.

Son muchos los factores geológicos que intervienen en la vida geológica de un depósito, factores que influyen en el espesor de sus capas, su continuidad, su calidad, y en general las condiciones físicas del yacimiento.

4.2.1.2.- Minería del carbón

Las capas de carbón apropiadas para ser explotadas económicamente, son las que tienen más de 50 cm de espesor, siendo las más satisfactorias desde el punto de vista técnico-económico, las que alcanzan espesores mayores a un metro.

La extracción del carbón se efectúa mediante dos métodos: a tajo abierto y subterránea. A cielo abierto se remueven los sedimentos que se encuentran sobre la capa de carbón como mototraillas, escarificadores (*scrapers*), tractores y palas mecánicas. Luego se realiza la remoción de la capa de carbón con palas mecánicas o cualquier otro tipo de cargador mecánico, que es vertido sobre camiones apropiados que transportan el carbón hasta las plantas de preparación.

Para que la explotación del carbón pueda ser económicamente rentable la relación de remoción (cantidad de metros cúbicos de estéril por cada tonelada de carbón extraído) no puede ser muy alta en función de un presupuesto establecido.

En cuanto a la minería subterránea, que se realiza a determinada profundidad de la superficie del suelo, puede llevarse a cabo mediante dos sistemas: cámaras y pilares (*room and pillar*), o por el método de Tajo largo (*Long wall*).

a.- Explotación por cámaras y pilares (*room and pillar*):

Este método consiste en excavar cámaras o frentes en las capas de carbón a explotar, partiendo de pasajes o galerías previamente abiertas desde la entrada y a nivel del pozo. El punto de entrada a una mina subterránea puede ser entonces, a nivel de la superficie dependiendo de la topografía de la región, o a través de pozos verticales o inclinados.

b.- Explotación por Tajo largo (*Long wall*):

El carbón extraído mecánicamente o por medio de una máquina minadora instalada a lo largo y en contacto con la fase de la capa de carbón que se explotará; la máquina se mueve rítmicamente hacia delante y hacia atrás arrancando por fricción en su movimiento el material de la capa. El material cae sobre una correa transportadora que lo trasladará hacia los vagones de carga para ser llevadas al exterior de la mina. El techo durante la extracción, es sostenido artificialmente por medio de soportes de acero. A medida que avanza el trabajo de extracción, se retiran los soportes; operación que se realiza cuando existen diez o veinte metros de entre la fase de extracción y los soportes, permitiendo de esta manera que el techo baje hasta encontrarse con el suelo a medida que se retiran los soportes.

4.2.1.3.- Naturaleza química del carbón

Según López (1976), el carbón mineral es una materia de origen vegetal que ha cambiado sus propiedades químicas y físicas debido a acciones geológicas, aliados

procesos físicos y químicos. Es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de altos pesos moleculares. Los principales elementos que se encuentran son: el carbono, el hidrógeno, oxígeno (en baja proporción), nitrógeno y azufre. Cada uno de estos elementos no existen en todos los tipos de carbón, así como su proporción en cada uno de estos. Las cenizas derivadas del carbón, consisten principalmente de cuerpos inorgánicos mecánicamente incrustados en éste durante procesos de la formación de la turba y el de carbonización. Estas cenizas varían mucho en su composición, que por lo general son una mezcla de: sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido de hierro (FeO_3), magnesia (MgO), cal (CaO) y otros óxidos.

A continuación se describen las diversas configuraciones químicas de los elementos antes mencionados en la estructura molecular del carbón:

- Carbono:

Elemento químico con número atómico 6, peso atómico 12,011 grs/mol, es el único en la química que forma un gran número de compuestos mayores que la suma total del total de los formados por los demás elementos. El carbono se encuentra en grandes cantidades en los depósitos carboníferos, formando compuestos de gran complejidad con hidrógeno y nitrógeno. El contenido aproximado de carbono en los diferentes rangos de carbón mineral y que a su vez determina su poder calorífico, se muestra en la tabla IV.1.

Tabla IV.1: Clasificación de los carbones según su contenido de carbono

Rango	Contenido de carbono
Turba	50% a 60%
Lignito	60% a 70%
Bituminoso	70% a 90%
Antracita	90% a 94%

Fuente: “El Carbón mineral”, Ministerio de Energía y Minas (MEM), (1976)

- Hidrógeno:

Elemento químico con número atómico 1, peso atómico 1,007 grs/mol. El contenido de hidrógeno en los carbones oscila entre 4,5% y 5,5%. Suple parte de su poder calorífico.

- Oxígeno:

Elemento químico con número atómico 8, peso atómico 16,000 grs/mol. El oxígeno existe en los carbones minerales en varias formas: Los grupo hidroxil (OH), carbonil (CO) y carboxil (COOH) pueden ocurrir en los rangos bajos del carbón. El agua (H₂O) contribuye en la presencia de hidrógeno y oxígeno en los carbones.

- Nitrógeno:

Elemento con número atómico 7 y peso atómico 14,008 grs/mol. Es el único de los elementos en los carbones que se encuentra presente exclusivamente en combinaciones orgánicas. Las cantidades en la que ocurren oscilan entre 1% y 2%. Los carbones bituminosos poseen mayor contenido de este elemento que el lignito y la antracita.

- Azufre:

Elemento químico de número atómico 16 y peso atómico 32,006 grs/mol. Se encuentra presente en los carbones en forma orgánica e inorgánica. La forma orgánica aparece de manera uniformemente distribuida en las sustancias que componen el carbón, estando su origen relacionado con las plantas que se transforma en turba, las cuales poseen azufre en las proteínas y sustancias no proteínicas. Este azufre forma hidrogeno sulfurado en los procesos de

carbonización de la turba, y en ocasiones ocurre en forma de pirita (FeS_2). Por su parte, el azufre orgánico presente en el carbón mineral, varía entre los límites de 0,3% a 3%.

4.2.1.4.- Propiedades físicas del carbón

De acuerdo a López (1976), las propiedades físicas del carbón mineral son aquellas características que lo describen en su estado natural antes de ser procesado, para luego ser utilizado. Las propiedades físicas más importantes que deben tomarse en cuenta son: gravedad específica, dureza, triturbilidad, friabilidad, estabilidad del tamaño, color, lustre, fractura, clivaje, dimensión, meteorización y combustión espontánea.

- Gravedad específica:

Se refiere a la relación entre el peso del carbón en el aire y el peso de igual volumen de agua. El peso específico del carbón mineral oscila entre 1,25 y 1,70 grs/mol, el cual crece con el rango. La gravedad específica del carbón afecta su ignición, entre más baja esta sea mejor es su ignición.

- Dureza:

Se relaciona directamente con su estructura. Carbones de alto contenido de volátiles son usualmente más firmes que los de bajo contenido, los que los hace más resistentes a los efectos del transporte.

- Triturbilidad:

Determina la factibilidad de fragmentación que posee el carbón. Esta propiedad es de suma importancia cuando el mineral es requerido para ser pulverizado para uso industrial.

- Friabilidad y estabilidad:

Se refieren a la capacidad del carbón de resistir roturas asociadas a operaciones de transporte.

- Color y lustre:

El color en el carbón varía de marrón a gris oscuro en los lignitos a negro intenso en las antracitas. Por su parte, el lustre corresponde a la manera en que el mineral refleja la luz desde su superficie. En casi todos los carbones bituminosos, existen bandas de lustre brillantes intercaladas con bandas de carbón opaco. Los de tipo bituminoso duro, generalmente tienen un lustre opaco.

- Fractura y clivaje:

El término fractura se refiere a la manera en que el carbón se rompe al ser impactado, generalmente es un indicador del rango de éste. Las antracitas poseen un tipo de fractura concoidal (superficie de fractura similar al vidrio). Los carbones con poco contenido de material volátil poseen fractura columnar, mientras, que los de alto contenido de volátiles presentan un tipo de fractura en forma de cubos. En algunos carbones se presentan una combinación de planos verticales que cruzan las capas originales en dos direcciones, prácticamente en ángulo recto de un plano al otro. Estas juntas son aprovechadas en las operaciones mineras de extracción para producir bloques de ciertas dimensiones.

- Dimensión y tamaño:

Corresponde a las dimensiones de los fragmentos de carbón que se obtienen al separarlo por procesos mecánicos.

- Meteorización:

Se refiere a la tendencia de los carbones de fracturarse espontáneamente cuando se secan o humedecen. Una característica importante de los carbones es su tendencia a disociarse cuando se someten a la intemperie.

- Combustión espontánea:

Esta propiedad al igual que la meteorización determina la capacidad del carbón para su almacenamiento. La combustión espontánea es la oxidación lenta del mineral que ocurre de forma proporcional a la superficie expuesta. Este proceso es muy común en las pilas de carbón con altos contenidos de finos, además de los afloramientos.

4.2.1.5.- Clasificación industrial del carbón

El valor de los carbones se mide industrialmente, por su contenido de agua, cantidad de cenizas, proporción de carbono, hidrogeno, azufre y sobre todo por su poder calorífico.

Para propósitos prácticos, los análisis del carbón se realizan mediante procesos sencillos, en los cuales sólo se determina los cuatro constituyentes mencionados a continuación:

- a. Agua: el contenido de agua se determina como nivel de humedad en los carbones.
- b. Impurezas minerales: determinadas como cenizas, es decir, el residuo del material inerte producto de la combustión del carbón.
- c. Sustancias volátiles: representa los gases y vapor de agua que es emanada de la muestra al someterla a cierta temperatura.

- d. Carbón fijo: constituye el residuo que se quema a alta temperatura después que las sustancias volátiles han sido extraídas.

Las sustancias volátiles y el carbón fijo, son los elementos que le confieren al carbón la capacidad de generar energía calorífica cuando combustiona. Por su parte las cenizas y la humedad le restan a éste dicha facultad. Actualmente, la generación de energía calorífica, representa el mayor uso de este mineral.

La clasificación industrial del carbón obedece a los niveles en los que se encuentran los cuatro elementos antes mencionados, siendo los tipos de carbones los siguientes:

- a. Turba: según Matos Molero (1976), la turba carbonífera es un compuesto orgánico que ocurre como una masa de color marrón con tendencia a negruzco, terroso, liviano, esponjoso, grasa al tacto y conformado por un 45% de agua.
- b. Los lignitos: poseen un nivel de humedad alto (35% a 45%) y generalmente tienen el 50% de materiales volátiles. Los lignitos arden generando mucho humo y su poder calorífico es de unas 4.000 calorías por kilogramo (6.300 a 8.300 BTU por libra); su color es pardo. Cuando están secos se disgregan fácilmente en granos o escamas.
- c. Los sub-bituminosos: pertenecen al rango inmediato superior, conteniendo una humedad por el orden del 15% a 35%. Poseen un poder calorífico superior al de los lignitos (8.300 a 10.500 BTU por libra), pero al igual que estos se disgregan cuando se encuentran deshidratados.

- d. Los bituminosos o hullas: representan la denominación que se le otorga a un amplio grupo de carbones llamados grasos (bituminosos) o magros, de acuerdo al contenido de material volátil que varía entre el 31% y el 14%. Su poder calorífico puede variar entre 5.000 y 8.500 BTU por kilogramos (10.000 a 14.000 BTU por libra). Se encuentran naturalmente como masas negruzcas, blandas y más o menos en formas cúbicas.
- e. Las antracitas: este grupo posee el más alto contenido de carbono fijo, la proporción de este elemento oscila entre 92% y 98%, el material volátil se encuentra entre 8% y 2%. Constituye el grupo de los carbones bituminosos de mayor densidad ($1,7 \text{ grs/cm}^3$), son de difícil inflamación, arden casi sin llama, sin humo y sin cenizas, de allí el porque es uno de los carbones mejor cotizados en el mercado.

4.2.2.- Escombrera

De acuerdo al Instituto Tecnológico Geominero de España, ITGE, (1999), una escombrera es un depósito ordenado y secuencial de material estéril procedente de una explotación minera, pudiendo ser ésta a tajo abierto o de forma subterránea. Siendo el estéril, el resultado de la extracción del mineral sin valor económico.

4.2.2.1.- Principales propiedades de los estériles mineros

El material estéril proveniente de la actividad extractiva, generalmente posee una litología diversa, como consecuencia del mezclado que se efectúa durante las labores de arranque en los frentes de mina. La granulometría puede llegar a ser muy heterogénea, sobre todo en aquellas minas en donde se ejecutan actividades de perforación y voladura que pueden generar bloques de grandes dimensiones. La

figura 5, muestra como al ser vertidos el material, se disponen al pié del talud los bloques de gran tamaño, alcanzado alguno de ellos grandes trayectos debidos por efecto gravitacional.



Fig. 5: Heterogeneidad granulométrica de los estériles en una escombrera

Fuente: Donaire (2000)

Por otro lado, los estériles son variados en sus composiciones químicas, lo que constituyen un factor muy importante, a considerar en la selección del lugar de emplazamiento de los mismos, ya que éstos pueden poseer altos contenidos de metales tóxicos que pueden llegar al alterar parcial o totalmente la calidad de las aguas de los distintos cuerpos de aguas que atraviesen la zona en cuestión.

4.2.2.2.- Clasificación de las escombreras según su forma y tamaño

La cantidad de estéril que se establece verter sobre un determinado lugar, no sólo depende de la configuración geológica del yacimiento y de la topografía del área, sino del valor económico del mineral y de los costos de extracción. Las relaciones de remoción en explotaciones de minerales metálicos y energéticos como el carbón, por lo general son muy superiores a la unidad.

Según sea la localización del asentamiento de la escombrera respecto a la explotación, estas pueden clasificarse en *interiores*, si el material es depositado en las fosas desarrolladas tras la apertura de la excavación inicial y *exteriores*, si el material estéril es depositado en zonas fuera de los frentes de excavados, como se muestra en la figura 6.

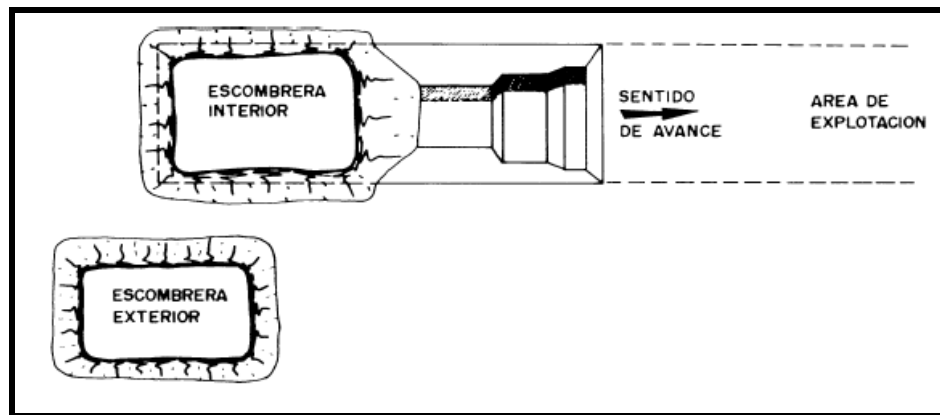


Fig 6: Clasificación de las escombreras según su emplazamiento respecto al área de explotación
Fuente: Donaire (2000)

4.2.3.- Lugar de emplazamiento

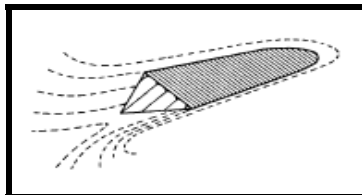
4.2.3.1.- Criterios para la selección del lugar de emplazamiento

En la minería una vez delimitada la zona disponible para el emplazamiento inicial de una escombrera, es necesario tomar en consideración las restricciones técnicas, económicas, socioeconómicas y ambientales, las cuales en conjunto determinan el tamaño y la forma que tendrá el depósito de material estéril.

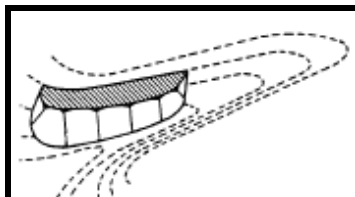
La magnitud del perfil de acarreo desde el área de explotación hasta la de vertido del estéril, la capacidad de almacenamiento de dicho sector, nivel de impacto sobre el ecosistema y el medio natural, son criterios de suma importancia en la elección del lugar de emplazamiento de la escombreras.

En función del lugar de emplazamiento y su configuración, las escombreras se clasifican en los siguientes tipos: escombreras en drenajes o vaguadas, en laderas, en divisorias de aguas, en llanuras o exenta y en rellenos, como se muestra en las figuras 7.a, 7.b, 7.c, 7.d y 7.e, respectivamente.

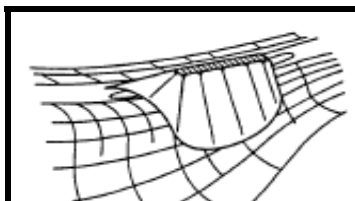
7.a) En drenaje o vaguada



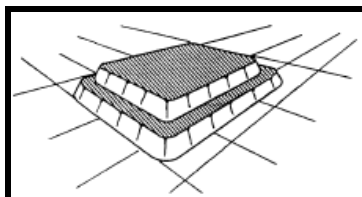
7.b) En ladera



7.c) En divisorias de aguas



7.d) En llanuras o exenta



7.e) En relleno

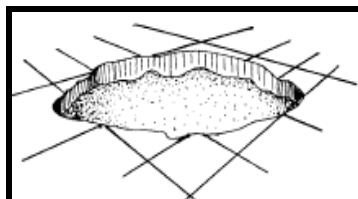


Fig. 7: Tipos de escombreras de acuerdo a sus lugares de emplazamiento

Fuente: Donaire (2000)

4.2.4.- Método constructivo

En base a los criterios para la selección del lugar de emplazamiento de escombreras, se procede con la selección de la técnica de vertido en función de los parámetros geomecánicos del material estéril y la factibilidad operativa asociada a niveles de producción establecidos.

4.2.4.1.- Clasificación de los métodos constructivos de escombreras

Existen diversos métodos para el desarrollo de una escombrera, que varían de acuerdo con la naturaleza del lugar de emplazamiento seleccionado, implicaciones ambientales, limitaciones operativas y niveles de estabilidad. Entre los principales métodos se encuentran:

4.2.4.1.1.- Vertido Libre

Se fundamenta la disposición del material estéril por efecto gravitacional, como se muestra en la figura 8, definiendo con ello taludes con inclinación correspondiente al ángulo de fricción del material.

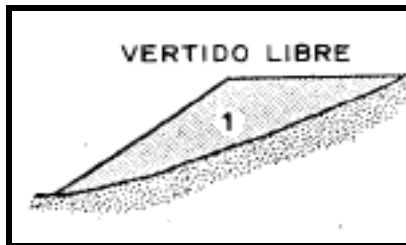


Fig. 8: Método constructivo de escombreras por vertido libre

Fuente: ITGE, 1999.

4.2.4.1.2.- Fases adosadas

Consiste en desarrollar la secuencia de vertido de forma descendente, mediante la construcción de terrazas de anchos iguales como lo indica la figura 9, lo

que le otorga a la escombrera una mayor estabilidad, pero, es limitante en el sentido de hacer difícil el acceso a los niveles inferiores .



Fig. 9: Método constructivo de escombreras mediante fases adosadas
Fuente: ITGE, 1999.

4.2.4.1.3.- Dique en pie de retención

Se fundamenta en la construcción de taludes con anchos iguales con la variante de establecer al pie del mismo pequeños diques que contrarrestan los desplazamientos del material estéril, asociados a las fuerzas gravitacionales como se muestra en la figura 10.

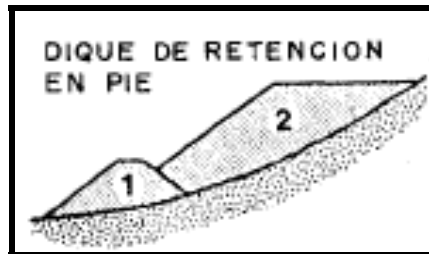


Fig. 10: Método constructivo de escombreras mediante dique en pie de retención
Fuente: ITGE, 1999.

4.2.4.1.4.- Fases superpuestas ascendentes

Este método constructivo se basa en el establecimiento de una secuencia ascendente de avance por niveles en la escombrera, como se indica en la figura 11. Es el método constructivo de escombreras más empleado en la minería debido a que brinda mayores condiciones de estabilidad y flexibilidad en las labores operativas.

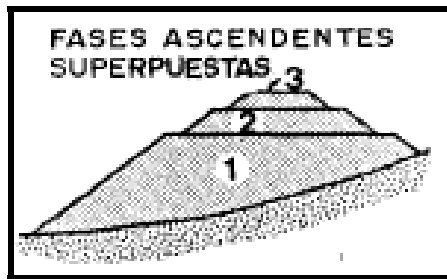


Fig.11: Método constructivo de escombreras mediante fases ascendentes superpuestas
Fuente: ITGE, 1999.

4.2.5.- Principales propiedades índices de las rocas

4.2.5.1.- Peso específico

También conocido como densidad, establece la relación de masa por unidad de volumen. Esta puede ser expresada en gr/cm^3 , ton/m^3 , según sea el caso.

4.2.5.2.- Resistencia

Se refiere a la capacidad de soportar una carga o fuerza aplicada por parte de la roca. Entre los principales ensayos que permiten establecer la resistencia de una roca, se menciona:

a. Resistencia a compresión simple:

Según (Vallejo, 2002), es el máximo esfuerzo que soporta la roca compresión uniaxial, efectuada sobre una probeta cilíndrica sin confinar en la laboratorio.

Viene dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

Donde,

σ_c : *esfuerzo compresivo aplicado*

F_c : *fuerza compresiva aplicada*

A : *área de aplicación*

b. Resistencia a carga puntual:

Se refiere a la capacidad de soportar la roca a un esfuerzo uniaxial sobre una superficie pequeña. Constituye un método que suministra información sobre las propiedades índice de la muestra estudiada de forma rápida y a bajo costo.

4.2.6.- Ensayos geomecánicos

Para la determinación de las propiedades índices de las rocas, es necesario efectuar una toma de muestras representativas. Estos métodos de análisis, se realiza sobre muestras de mano en levantamientos geológicos y testigos recuperados mediante perforaciones en la zona de estudio. La American Society for Testing and Materials (ASTM), establece un conjunto de normativas que unifican diversos criterios para el estudio geomecánico sobre muestras de roca.

4.2.6.1.- Ensayo de carga puntual

De acuerdo a la ASTM (2002), el método de ensayo de carga puntual permite obtener información sobre la capacidad de soporte a carga puntual de una muestra de roca. El mismo puede ser realizado sobre testigos recuperados, bloques o cuerpos irregulares, permitiendo con ello, clasificar y caracterizar la roca.

El método de análisis de carga puntual en circunstancias en los que existen limitaciones de tiempo y financiamiento.

Para dimensionar las muestras a analizar, la normativa establece y especifica los parámetros geométricos a considerar en el análisis.

Cuando el ensayo se efectúa sobre muestra de núcleos, se debe tomar en cuenta la dirección de la aplicación de la carga respecto a su eje longitudinal:

- Dirección de carga diametral

Se considera la separación desde los bordes de la muestra al punto de aplicación de la carga (L) y la separación diametral de los puntos en los cuales se ejercerá la carga (D), como se muestra en la figura 12.

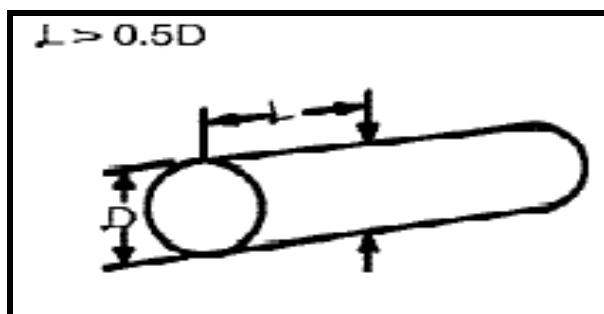


Fig. 12: Preparación de muestra para aplicación de carga en dirección diametral

Fuente: Norma ASTM para ensayo de carga puntual (D 5731-02), 2002

- Dirección de carga longitudinal

Se considera la separación de los puntos de aplicación de la carga (D) y la dimensión diametral de la muestra de núcleo (W), como se indica en la figura 13.

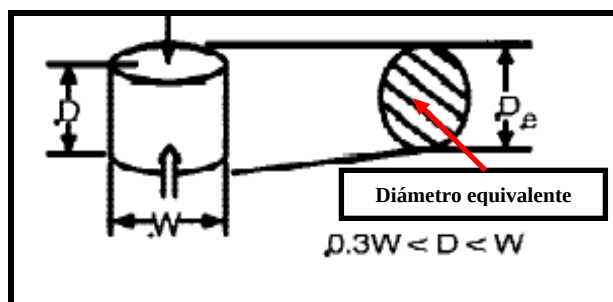


Fig. 13: Preparación de muestra para aplicación de carga en dirección longitudinal

Fuente: Norma ASTM para ensayo de carga puntual (D 5731-02), 2002

Una vez conocida las dimensiones de la muestra, se procede con la ejecución del ensayo para el registro del valor de la carga máxima que soportó la probeta, expresada generalmente en kilonewton (KN).

El índice de resistencia de la roca de acuerdo a lo especificado por la norma, viene dado por la expresión:

$$I_s = \frac{P}{D_e}$$

Donde;

Is: índice de resistencia no corregido (MPa)

P: carga máxima (KN)

De: diámetro equivalente

De=*D* (mm), para el caso con muestra de núcleos, en el que *D* corresponde al diámetro del mismo.

De= $4A/\pi$, donde *A*, corresponde al área mínima de la sección transversal del plano de contacto de las puntas. *A* esta dada por el producto *WD*, medidos en la preparación de la muestra, donde (*D*) corresponde a la separación de las puntas de aplicación de la carga y (*W*) el ancho de la sección transversal de la muestra.

La norma establece que cuando el ensayo se realiza sobre muestras de núcleos de 50 mm de diámetro o cercano como el tipo NX (54.4 mm), se puede calcular el índice de resistencia según la ecuación descrita a continuación:

$$F = \sqrt{\frac{De}{50}}$$

En el caso de no presentarse dicha condición, es necesario calcular un factor de corrección (*F*), el cual viene dado por la expresión:

$$F = \left(\frac{De}{50} \right)^{0,45}$$

Una vez determinada el factor de corrección, se procede con el calculo del índice de resistencia corregido (*I*₍₅₀₎), definido por la expresión siguiente:

$$I_{s(50)} = F \times I_s$$

Calculado el índice de resistencia corregido, se procede con la determinación de la resistencia de la resistencia a compresión de la muestra. La misma está dada por la ecuación:

$$\sigma_{uc} = C \times I_{s(50)}$$

σ_{uc} : *esfuerzo a la compresión uniaxial máxima (MPa)*

C : *factor de correlación entre el esfuerzo de compresión y el índice de resistencia ($I_{s(50)}$).*

El factor de correlación generalizada (C), se obtiene de acuerdo a la tabla IV.2, se muestran los valores que se consideran en función del diámetro de la muestra.

Tabla IV.2: Factor de correlación entre el esfuerzo a compresión uniaxial y el índice de resistencia (I_{s50})

Diámetro de la muestra (mm)	Valor de "C"
20	17,5
30	19,0
40	21,0
50	23,0
54	24,0
60	24,5

Fuente: Norma ASTM para ensayo de carga puntual (D 5731-02), 2002

4.2.7.- Cuencas hidrográficas

De acuerdo a la Iniciativa Mexicana de Aprendizaje para la Conservación (IMAC), una cuenca es un término geográfico e hidrológico, definido como el área de la superficie terrestre por donde el agua de lluvia escurre y transita o drena hacia una corriente principal y por ésta hacia un punto común de almacenamiento interior como un lago o laguna en donde recibe el nombre de *cuenca endorreica* o en el caso

contrario, la acumulación ocurre en un punto exterior, se denomina *cuenca exorreica*.

Generalmente el nombre de la corriente principal define el nombre de la cuenca.

4.2.7.1.- Clasificación de las cuencas hidrográficas

Existen dos sistemas de clasificación de las cuencas hidrográficas: de acuerdo a su extensión o área de influencia y según la naturaleza del punto de almacenamiento o acumulación final de las aguas.

- De acuerdo a su extensión o área de influencia:

Según el IMAC, en su página www.imacmexico.org, (consultada en febrero de 2008) éstas se clasifican en macrocuencas o cuencas de primer orden cuando corresponden a grandes sistemas hidrológicos, subcuencas o cuencas de segundo orden, y finalmente microcuencas o cuencas de tercer orden.

- De acuerdo a la naturaleza del punto de almacenamiento final de las aguas:
 - Cuencas exorreicas: sus aguas desembocan en el mar o en el océano.
 - Cuencas endorreicas: drenan sus aguas en el interior del continente, sobre lagos o lagunas
 - Arreicas: sus aguas se evaporan o se filtran en el terreno sin lograr drenarlas sobre cuerpos de agua internos o externos.

4.2.7.2.- Elementos de una cuenca hidrográfica

a.- Río principal

El río principal actúa como el único colector de las aguas. Su identificación puede fundamentarse en: el curso fluvial más largo, mayor caudal medio, mayor caudal máximo. El río posee un curso, el cual corresponde a la distancia desde su nacimiento a su desembocadura y se distinguen tres partes:

- Curso superior: ubicado en los más elevados del relieve en donde la erosión por parte de las aguas ocurre de forma vertical, resultando en la profundización del cauce.
- Curso medio: en donde el río comienza a generar curvas (*meandros*), ensanchando el valle.
- Curso inferior: situado en la parte más baja de la cuenca, en donde la energía potencial del río es baja y los materiales sólidos se sedimentan.
- Cauce: canal natural por donde corren las aguas. El cauce define la trayectoria del río desde su nacimiento hasta su desembocadura.
- Margen derecha: borde ubicado a la derecha del río, observando en el mismo sentido en el que corren las aguas.
- Margen izquierda: borde ubicado a la izquierda del río, observando en el mismo sentido en el que corren las aguas.
- Aguas abajo: se dice que un punto se encuentra aguas abajo cuando se avanza con respecto a este en el mismo sentido de la corriente.
- Aguas arriba: es lo opuesto de lo anterior.

b.- Ríos afluentes:

Corresponden a los ríos secundarios que vierten sus aguas al río principal. Cada uno posee su respectiva cuenca, denominada subcuenca.

c.- Línea divisoria de vertientes (*divortium aquarum*):

Separa dos o más cuencas vecinas. Es la línea divisoria utilizada para definir el límite entre dos cuencas hidrográficas.

d.- Relieve de la cuenca:

Constituido por los valles principales y secundarios, con sus respectivas líneas de relieve mayores y menores y la red fluvial que conforma una cuenca hidrográfica. Está formada por las montañas y sus flancos, por las quebradas o torrentes, valles y mesetas.

e.- Partes de una cuenca hidrográfica:

- Cuenca alta: es la parte de ésta en donde predomina el fenómeno de la erosión, acompañado de transporte hacia las partes bajas. Generalmente los indicios de arrastre y socavación son visibles.
- Cuenca media: se refiere a la zona en donde de forma media ocurre un equilibrio entre la cantidad de material sólido transportados por la corriente y el el material saliente. Por lo general existen no se muestran indicios de erosión.
- Cuenca baja: es la parte de almacenamiento y acumulación del material transportado, formando lo que se denominan *conos de deyección*.

4.2.7.3.- Precipitaciones

Según Carciente (1965), la precipitación es la caída del agua, en forma líquida o sólida sobre la superficie terrestre. La precipitación se origina cuando el vapor de agua asciende a la atmósfera y se enfría, produciéndose la unión de las gotas de agua para formar las nubes, fase conocida como *condensación*. La condensación puede tener su origen en tres causas: la convección termal, las barreras orográficas, y los frentes ciclónicos.

4.2.7.3.1.- Clasificación

Las precipitaciones se clasifican en tres tipos, de acuerdo a la causa que originó la condensación: precipitaciones convectivas, orográficas y ciclónicas.

a.- Precipitaciones convectivas:

Se originan por el levantamiento natural del aire caliente, menos denso que el aire frío que lo rodea. Estas precipitaciones suelen desatar tormentas de corta duración y de intensidades de lluvia considerables.

b.- Precipitaciones orográficas:

Resultan del ascenso mecánico del aire sobre cadenas montañosas. Generalmente abarcan grandes extensiones, y se caracteriza por ser homogéneas y de intensidades bajas.

c.- Precipitaciones ciclónicas:

Conocidas también como *frontales*, provienen de la convergencia y levantamiento de masas en áreas de baja presión. Poseen características similares a las orográficas.

4.2.7.3.2.- Duración e intensidad

La duración de una lluvia, es el tiempo que tarda en precipitar ésta sobre la superficie terrestre. La intensidad por su parte, constituye la cantidad de agua que ha caído en ese lapso de tiempo. Por lo general la duración se expresa en minutos o en horas, mientras que la intensidad se hace en lámina o altura de agua por hora o en litros por segundo por hectárea. Para pasar de lámina de agua a litros sobre segundo sobre hectárea, se multiplica por el factor 2,78.

4.2.7.3.4.- Tiempo de concentración de una cuenca

Cuando se necesita estimar el caudal asociado a una cuenca para diseñar una estructura de drenaje, se supone que la intensidad considerada tiene una duración correspondiente al tiempo que tarda en llegar el agua desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de descarga o de salida. Dicho tiempo recibe el nombre de *tiempo de concentración* de una cuenca. Existen diversas ecuaciones empíricas que han sido utilizadas para determinar el tiempo de concentración, en Venezuela la ecuación que mayor aceptación ha tenido es la conocida como la ecuación del río Guaire, la cual esta dada por la siguiente expresión:

$$t_c = 0,355 \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} \right)^{0,595}$$

t_c : tiempo de concentración (min)

A : área de la cuenca considerada (km²)

S : pendiente (m/km)

4.2.7.3.5.- Tiempo de retorno o intervalo de recurrencia

Según Carciente (1965) en hidrología la frecuencia de una lluvia es el número de veces que una precipitación de cierta magnitud es igualada o excedida en un determinado número de años. En el uso cotidiano, como expresión numérica mas simplificada de la frecuencia se emplea la que corresponde al tiempo de retorno o intervalo de recurrencia, que es el máximo tiempo entre dos eventos que igualan o sobrepasan un valor dado.

Cuando se disponen de un número de datos, se ordenan los registros de manera decreciente, asignándole a cada valor el número $m = 1$, al segundo el valor $m = 2$ y

así sucesivamente. El valor m , representa el número de veces que ha de ocurrir dicha lluvia durante los años del registro. El tiempo de retorno de esta dado por la expresión:

$$Tr = \frac{n}{m}$$

Donde;

Tr: período de retorno en años

n: número de años del registro

m: número de orden de cada dato.

4.2.7.4.- Estructuras de drenaje

4.2.7.4.1.- Métodos para la estimación del caudal de diseño

El caudal de diseño, corresponde a la cantidad de agua por unidad de tiempo que se encuentra asociado a una cuenca para una lluvia de una intensidad y duración determinada y que será drenada a través de una estructura artificial. Entre las formulas que permiten determinar el caudal de diseño en la actualidad, se destaca la formula racional, la cual fue desarrollada por Emil Kuichling en 1889 para estimar el escurrimiento en áreas urbanas. Esta ecuación expresa que la descarga es igual a un porcentaje de la precipitación multiplicada por el área de captación considerada. La formula racional viene dada por la expresión:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6}$$

Donde;

Q: caudal de descarga (m³/seg)

C: coeficiente de escorrentía (adimensional)

I: intensidad de la precipitación considerado (mm/hora)

A: área de captación de la precipitación considerada (km²)

El método racional posee sus limitaciones, por no considerar la capacidad de almacenamiento o retención de la cuenca y se fundamenta en establecer que el caudal de descarga es igual a la precipitación pluvial menos toda la retención.

Aún con registros pluviométricos consistentes, la fórmula racional induce errores en los cálculos a medida que aumenta el área de la cuenca, por lo que solo es aporte resultados confiables para superficies menores a las 500 hectáreas. Para su aplicación, es necesario conocer un coeficiente de escorrentía, del tiempo de concentración, de la intensidad de la lluvia correspondiente y el área de la cuenca a drenar. Los valores del coeficiente de escorrentía dependen de las características de la superficie y la pendiente del terreno, como se muestra en la tabla IV.3

Tabla IV.3: Valores para el coeficiente de escorrentía

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		50%	20%	5%	1%	
Sin vegetación	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,35	0,25	0,2

Fuente: Carciente (1965)

Una vez determinado el caudal estimado mediante la ecuación racional, el área de la sección efectiva, está definida por la ecuación de continuidad, la cual establece que la sección transversal (A_{sec}) considerada constante para una estructura de drenaje, es el cociente entre el caudal (Q) de diseño en m³/seg y velocidad media (V) considerada para el fluido.

$$A_{\text{sec}} = \frac{Q}{V}$$

Cuando es necesario diseñar una estructura de drenaje para la conducción de las aguas provenientes de una cuenca, por razones operativas (canales y/o diques), sus características obedecen a la naturaleza de los materiales con los cuales son contruidos, los cuales define la velocidad mínima que sirva de garantía para evitar la decantación de los sedimentos, que según Rodríguez y Ayala (1990) se recomienda en 0,25 m/seg. La tabla IV.4, establece la velocidad máxima recomendada en función del tipo de revestimiento.

Tabla IV.4: Velocidades máximas recomendadas para canales

Tipo de revestimiento	Velocidad admisible (m/s)
Hierba bien cuidada en cualquier clase de terreno	1,8
Terreno parcialmente cubierto de vegetación	0,6 - 1,20
Arena fina o limo (poca o nada de arcilla)	0,30 - 0,60
Arena arcillosa dura	0,60 - 0,90
Arcilla dura muy coloidal	1,2
Arcilla con mezcla de grava	1,2
Grava gruesa	1,2
Pizarra blanda	1,5
Mamposteria	4,5
Hornigon	4,5

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990)

Según Rodríguez y Ayala (1990), las pendientes mínimas para canales de desagüe general, son las siguientes:

- Canales revestidos: 0,2%
- Canales no revestidos: 0,5%
- Siempre que sea posible, se procurará alcanzar al 1% de pendiente.

Para determinar las dimensiones óptimas de un canal colector en general, se recurre a la ecuación de Manning, la cual viene dada por la expresión:

$$V = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Donde,

V: velocidad media (m/seg)

R: radio hidráulico (m), la cual representa la relación entre el área y el perímetro mojado

S: pendiente de diseño, expresada como la tangente del ángulo de inclinación

n: coeficiente de rugosidad de Manning

De acuerdo a Rodríguez y Ayala (1990), el coeficiente de rugosidad de Manning, obedece a la naturaleza de la superficie en la cual se construye la estructura, además de las velocidades y las pendientes de diseño. En tabla IV.5, se muestran los valores típicos que se consideran para las velocidades.

Tabla IV.5: Velocidades máximas para canales en función de las pendientes de la superficie

Tipo de fondo	Velocidad máxima (m/s)	Inclinación
Arcillo-arenoso	0,75	0,5%
Arcillo-limoso	0,90	1,0%
Arcilloso	1,20	2,0%
Mezcla de arcilla y pedrisco	1,50	2,5%
Roca	2,40	4,0%

Fuente: Rodríguez y Ayala (1990)

Por otro lado, antes de utilizar la ecuación de Manning, se debe tener muy en cuenta, que ésta determina la velocidad media del fluido, en función de un radio hidráulico y pendiente de la superficie, a la vez de considerar un factor que depende del nivel de rugosidad de la superficie, el cual es conocido como coeficiente de

rugosidad de Manning. En la tabla IV.6, se muestran los distintos valores que adopta este coeficiente, de acuerdo al tipo de superficie con la cual se construirá la estructura.

Tabla IV.6: Coeficiente de rugosidad de Manning

Tipo de superficie	Coeficiente de rugosidad
Hormigón de fino espesor	0,015
Hormigón de grueso espesor	0,013
Suelo excavado recto	0,022
sin vegetación	
Suelo excavado recto	0,030
con vegetación	
Suelo excavado sección	0,030
uniforme irregular	
Canal natural recto	0,030
sin vegetación	
Canal natural irregular	0,035
sin vegetación	
Canal natural irregular	0,100
con vegetación	

Fuente: Rodríguez y Ayala, 1990

4.2.7.4.2.- Cuencas de sedimentación

Según Sánchez (1995), las cuencas de sedimentación, son estructuras que promueven la sedimentación de las partículas transportadas por las aguas hacia éstas antes de verterlas a un cuerpo de agua natural. Las partículas más gruesas decantarán más rápido que las finas, de forma que la cuenca se dimensiona en función de la granulometría del material transportado. La velocidad de decantación de una partícula en el agua se determina mediante los principios de la mecánica de los fluidos y se expresa por la Ley de Stokes:

$$V_{sed} = \frac{g \cdot (s - 1) \cdot D^2}{18 \cdot \mu}$$

Donde,

V_{sed} : velocidad de sedimentación (cm/seg)

g : aceleración de la gravedad (981 cm/seg^2)

μ : viscosidad del fluido (cm^2/seg)

s : densidad de la partícula (2,65 para el cuarzo)

D : diámetro de la partícula, supuesta esférica (cm)

Dado que la viscosidad de un fluido es una propiedad puntual del mismo, pues depende de la temperatura del medio en el que se encuentra. Ésta a su vez posee valores tabulados en la tabla IV.7.

Tabla IV.7: Viscosidad cinemática del agua en función de su temperatura

Temperatura (°C)	Viscosidad (cm^2/seg)
0	0,01792
5	0,01519
10	0,01308
15	0,01141
20	0,01007
25	0,00897
30	0,00804

Fuente: Lyle (1987)

Por otro lado en la tabla IV.8, se muestra los intervalos granulométricos para diversas partículas.

Tabla IV.8: Intervalos granulométricos para diversas partículas

Granulometría	Diámetro (cm)
Arena gruesa	0,02-0,2
Arena fina	0,002-0,02
Limo	0,0002-0,002
Arcilla	<0,0002

Fuente: Lyle (1987)

Se producirá sedimentación en la cuenca cuando el tiempo de residencia es el suficiente para permitirlo. El tiempo de residencia (t_r) es un parámetro que depende del caudal afluente (Q) (supuesto igual al efluente) y del volumen de la cuenca (vol):

$$t_r = vol / Q$$

Efectuando las respectivas sustituciones y asumiendo que no hay movimiento horizontal de las partículas en la cuenca condición propia de las de mayor extensión, se determina que el área de la misma viene dada por la expresión y no depende de la profundidad de ésta:

$$A_{cuenca} = \frac{Q}{V_{sed}}$$

4.2.7.5.- Taludes

4.2.7.5.1.- Construcción de taludes en estructuras de tierra y roca

Según Vallejo (2002), un talud representa una superficie plana artificial construida con una zona de pendiente, que alcanza una determinada profundidad por debajo de dicha superficie. Estos pueden poseer un carácter permanente para la construcción de obras de infraestructura o temporal, como los utilizados en la actividad minera. Los taludes pueden ser contruidos tanto en rocas como en suelos, obedeciendo a criterios económicos y de seguridad.

4.2.7.5.2.- Factor de seguridad

Constituye el criterio de seguridad, que se determina mediante el análisis de estabilidad del talud. El factor de seguridad establece la relación entre las fuerzas estabilizadoras y las fuerza deslizantes que actúan sobre el mismo, constituyendo de esta manera, en un indicador de la condición de estabilidad de éste. Si el cociente es mayor que la unidad, el talud es estable, en caso contrario se considera que no lo es.

4.2.7.5.3.- Método de Bishop simplificado

Existen diversos métodos para la determinación del factor de seguridad tanto en taludes en rocas como en suelos. Dado que el material estéril con el cual se construye

las escombreras, posee propiedades muy similares a los suelos, el método de Bishop simplificado, mejor conocido como método de las rebanadas, es el más adecuado para el análisis de estabilidad de éstos. Bishop desarrolló dicho método en 1955, el cual se basa en las siguientes hipótesis:

- Se supone una superficie de rotura circular.
- La masa deslizante se divide en n rebanadas o fajas verticales
- Se establece el equilibrio de momentos de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo, como se muestra en la figura 14.

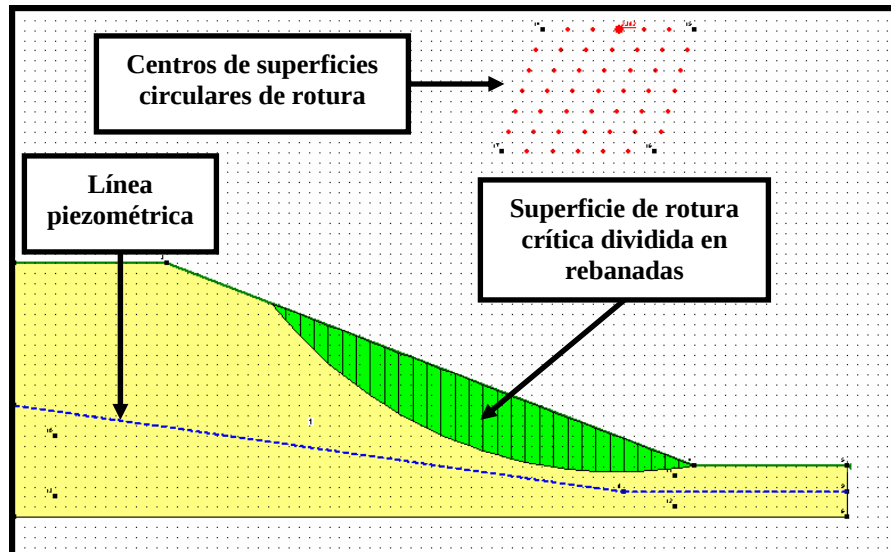


Fig. 14: Superficie de rotura circular analizado para un talud por el método de Bishop simplificado

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V
ESTUDIO DEL LUGAR DE EMPLAZAMIENTO
DE LAS ESCOMBRERAS

5.1.- Descripción de la zona Sur de la mina Paso Diablo

5.1.1.- Ubicación

La ubicación de la zona de emplazamiento de las escombreras corresponde al sector sur de la mina Paso Diablo, la cual posee un sistema hidrológico de ríos de crecida importante, como se muestra en la figura 15.

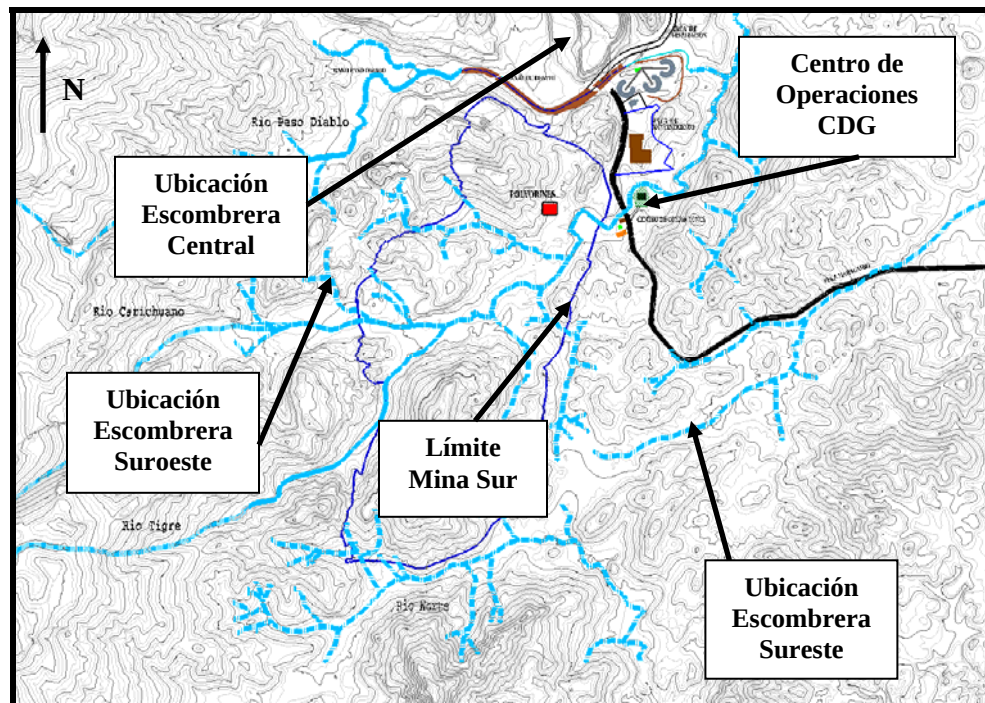


Fig. 15: Áreas correspondientes a la mina Paso Diablo Sur
Fuente: Superintendencia de Ingeniería y planificación, CDG, 2008

De acuerdo al plan inicial de la mina Paso Diablo Sur, se requiere establecer un sistema de tres escombreras externas donde se verterán los estériles provenientes del desarrollo de la Fosa Sur (ver figura 12):

- Escombrera Suroeste: su desarrollo comprende el borde Oeste del yacimiento, delimitándose el ancho por la fosa y el caño Paso Diablo al Oeste de ésta. Ocupa parte de la cuenca de los caños Carichuano y Tigre.

- Escombrera Sureste: presenta las distancias de acarreo en las zonas más al norte, por lo que su uso debe ser equilibrado con la escombrera Suroeste. La posición relativa del lugar de emplazamiento, respecto a la fosa, indicando las distancias de acarreo. Dicha ubicación no representa obstáculo alguno para el desarrollo de la extensión de la fosa en la zona sureste, por lo que su extensión en dirección Este- Oeste obedece a las restricciones de afectación de las cuencas cercanas (caño Norte), no así en la dirección noreste, lo que implica la necesidad de otra vía de acceso a la mina.
- Escombrera Central: su lugar de emplazamiento corresponde a la antigua fosa Paso Diablo localiza a 1,6 km respecto al centro de operaciones. En la actualidad posee un considerable volumen de agua producto de las precipitaciones, la cual debe ser drenada hacia la fosa de Transición, ubicada al norte de ésta, antes de efectuar el depósito de material estéril.

5.1.2.- Descripción de la composición florística de Paso Diablo Sur

Según el (Informe de renovación de la autorización de afectación de recursos en una superficie de 88 Ha, 2007), la vegetación del área de la mina Paso Diablo es la correspondencia a un bosque seco tropical. La vegetación original, ha sido intervenida con fines agropecuarios con algunos sectores semi-intervenidos, por encontrarse en zonas de alta pendiente, caracterizados por una masa de árboles y arbustos de especies deciduas con mediana viabilidad y altura media, típico de bosques intervenidos.

Las especies más abundantes y que se encuentran en los estratos del bosque son principalmente: Carreto (*aspidosperma polyneuron*), Guaimaro (*Brosimum alicastrum*), Canalete (*Cordia*), Gateado (*Astronium graveolens*).

Durante la inspección realizada, se determinó que la mayoría de las especies vegetales que conforman el bosque seco tropical, se encuentran presentes en los estratos inferiores de éste. Otras especies como el Jobo (*spondias Bombin*), se observa cercanos a los cursos de los cauces y en pendientes pronunciadas.

Por otro lado se observa una fuerte intervención asociada a tala para fines de extracción de madera. La tabla V.1, muestra la composición arbórea de la mina Paso Diablo.

Tabla V.1: Composición arbórea de la mina Paso Diablo

Nombre común	Nombre científico
Balautre	Centrolobium paraense
Cacahuito	Sterculia apetala
Canalete	Cordia sp.
Cañada	Tabebuia chryscea
Cañaguato	Tabebuia sp.
Caracara	Enterolobium cyclocarpum
Carreto	Aspidosperma polyneuron
Caracoli	Anacardium exelsum
Caujaro	Cordia alba
Cují	Acacia tortuosa
Curarire	Tabebuia serratifolia
Dividive	Caesalpinia corearia
Gateado	Astronium graveolens
Pardillo	Cordia alliodora
Guamo macho	Cupania americana
Majumba	Ceiba pentandra
Roble María	Tabebuia guayacán
Vera	Bulnesia arborea
Guaimaro	Brosimum alicanstrum

Fuente: “Informe de renovación de la autorización de afectación de recursos en una superficie de 88 Ha”, Coordinación de Ambiente, CDG, 2007

5.1.3.- Tipo del terreno de fundación

Los horizontes de suelo constituyentes del terreno de fundación, está conformado por la capa vegetal, cuyo espesor es en promedio de 1 m. El material subsiguiente está representado por un horizonte de un suelo residual de color rojizo. El mismo mantiene sus características principales hasta el límite con la roca del macizo hasta alcanzar una profundidad que oscila entre 1 y 2 m. Por su parte la granulometría es de forma general homogénea.

5.1.4.- Descripción del recubrimiento

Las condiciones principales que determinaron la formación de los suelos en el área de la concesión, dependieron de dos factores: pasivos y activos. Los pasivos están vinculados a la roca madre, la geomorfología, el tiempo de exposición, las actividades antrópicas entre otros. Mientras que los factores activos se encuentran relacionados a la vegetación y al clima.

En el área de estudio, la litología consiste principalmente de arenisca, lutitas, caliza y abundantes lechos de carbón. Los suelos derivados de la meteorización de areniscas son de poco espesor por ser estos de muy escasa susceptibilidad a la erosión y de poca fertilidad.

Los suelos asociados a la caliza poseen partículas de limo fino y arcilla, poseen textura fina, su estructura le confiere una alta permeabilidad y buen drenado, excepto en condiciones de saturación.

De forma general los suelos del área son de poco espesor porque son de fácil erosión por parte de los vientos y el agua. Los horizontes característicos de la Mina Paso Diablo son: ultisoles, inceptisoles y alfisoles.

- Ultisoles: horizonte argílico, saturación de base menor del 35% en temperaturas altas.
- Inceptisoles: se ubican en pendientes altas, depresiones y en superficies geomorfológicas jóvenes que limitan su desarrollo.
- Alfisoles: horizonte ocríco y argílico porcentaje de saturación de base de media a alta.

5.1.4.1.- Clasificación

El tipo de suelo de acuerdo a su granulometría que conforma el recubrimiento característico de la zona de emplazamiento, corresponde a un suelo tamaño arena, cuyo granulometría se encuentra entre 2 y 0,060 mm; los granos son visibles a simple vista. En medio acuoso estos precipitan fácilmente.

5.1.5.- Descripción del sustrato rocoso

5.1.5.1.- Toma de muestras de núcleos de perforación

Para obtener una descripción precisa de las características petrográficas del sustrato rocoso, se procedió a tomar ocho muestras pertenecientes a dos pozos (PDS-003A y PDS-004A), además de trece muestras pertenecientes a los anteriores y a los PDS-005B, PDS-017A y PDS-020P destinadas para ensayos de carga puntual, cuya ubicación relativa a la mina Paso Diablo Sur, se muestra en la figura 16.

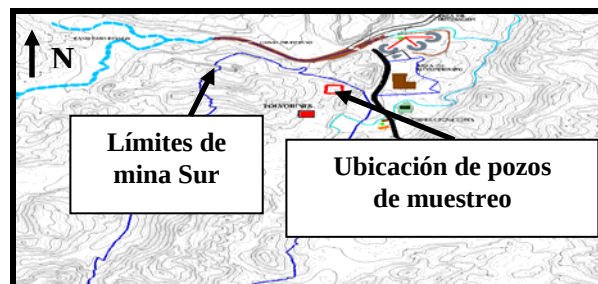


Fig. 16: Ubicación relativa de los pozos muestreados

Fuente: Superintendencia de Ingeniería y planificación, CDG, 2008

La localización relativa de los pozos es de unos 600 m al noroeste del centro de operaciones de CDG. Dichas muestras se distribuyeron en grupos de cuatro para los dos primeros pozos (Pozo PDS-003A y PDS-004A). La tabla V.2 y V.3, muestra la posición de en la perforación de las mismas en función de la profundidad a la cual se encontraban en el suelo.

a.- POZO PDS-003A

Tabla V.2: Profundidad de las muestras pertenecientes al pozo PDS-003A

Muestra No.	Profundidad (m)
1	25,40
2	51,19
3	71,92
4	92,73

b.- POZO PDS-004A

Tabla V.3: Profundidad de las muestras pertenecientes al pozo PDS-003A

Muestra No.	Profundidad (m)
1	42,67
2	69,70
3	76,40
4	105,52

5.1.5.2.- Propiedades y clasificación

Los resultados obtenidos del análisis petrográfico de las muestras, son mostradas a continuación.

a.- Pozo: PDS-003A

- Muestra 1

Las propiedades principales, se mencionan a continuación:

- Presenta intercalaciones de dos litologías predominantes (arenisca y lutita).

- Orientación isotrópica de los minerales constitutivos: Cuarzo (12%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (5%), fragmentos de roca (49%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro (10%) y cemento: óxido de hierro (2%).
- Presencia de materia orgánica.
- Nivel medio de compactación.
- Minerales con leve meteorización.
- Porosidad mayoritaria por disolución y fractura.

La tabla V.4, muestra la composición porcentual de la muestra 1.

Tabla V.4: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 1, Pozo PDS-003A

Arenisca	31%
Lutita	46%
Porosidad	20%
Materia orgánica	3%

- Muestra 2

Propiedades principales:

- Predominancia de lutita como litotipo principal
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (3%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (1%), fragmentos de roca (60%), minerales accesorios: muscovita (1%), matriz: óxido de hierro (10%) y cemento: óxido de hierro (2%).
- Presencia de materia orgánica.
- Nivel medio de compactación.
- Porosidad por disolución mayoritariamente.
- Litología predominante de lutita.

La tabla V.5, indica como se encuentra distribuida de forma porcentual la composición de la muestra.

Tabla V.5: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 2, Pozo PDS-003A

Arenisca	10%
Lutita	55%
Porosidad	30%
Materia orgánica	5%

- Muestra 3

Propiedades principales:

- Presencia de matriz compuesta por óxido de hierro y predominancia de dolomita.
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (33%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (5%), fragmentos de roca (10%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro: minerales de arcilla, óxido de hierro, dolomita (35%) y cemento: óxido de hierro, dolomita (2%).
- No existe presencia de materia orgánica.
- Nivel medio de compactación.
- Porosidad por disolución mayoritariamente.

La tabla V.6, indica como está distribuida la composición de la muestra.

Tabla V.6: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 3, Pozo PDS-003A

Arenisca	60%
Material carbonático	30%
Porosidad	10%
Materia orgánica	0%

- Muestra 4

Propiedades principales:

- Presencia de bandas alternadas de arenisca y lutitas..
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (35%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (8%), fragmentos de roca (35%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro (8%) y cemento: óxido de hierro (2%).
- Presencia de materia orgánica.
- Nivel medio a bajo de compactación.
- Porosidad por disolución mayoritariamente.

La tabla V.7, muestra la distribución porcentual de los principales componentes de la muestra.

Tabla V.7: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 4, Pozo PDS-003A

Arenisca	55%
Lutita	30%
Porosidad	10%
Materia orgánica	5%

b.- Pozo: PDS-004A

- Muestra 1

Propiedades principales:

- Presencia de fragmentos de roca con moderado grado de metamorfismo.
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (15%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (5%), fragmentos de roca: metamorfoico (3%), sedimentario (33%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro y

material carbonático (10%) y cemento: óxido de hierro, mineral calcáreo y minerales arcillosos (22%).

- Presencia de materia orgánica.
- Nivel medio a alto de compactación.
- Los fragmentos de roca no presentan indicios de intercalaciones.
- Presencia de minerales con cierto grado de alteración.

La tabla V.8, indica como se encuentra distribuida de forma porcentual la composición de la muestra.

Tabla V.8: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 1, Pozo PDS-004A

Arenisca	64%
Lutita	15%
Porosidad	10%
Materia orgánica	5%
Material carbonático	6%

- Muestra 2 y 3

Estas muestras poseen idénticas propiedades entre las que se mencionan:

- Presencia predominante de lutitas con intercalaciones de arenisca.
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (12%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (6%), fragmentos de roca: (45%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro (10%) y cemento: óxido de hierro (5%).
- Nivel medio de compactación.

La tabla V.9, indica como se encuentra distribuida de forma porcentual la composición de la muestra.

Tabla V.9: Resultados de análisis petrográfico de las muestras 2 y 3, Pozo PDS-004A

Arenisca	35%
Lutita	45%
Porosidad	15%
Materia orgánica	5%

- Muestra 4

Propiedades principales:

- Presencia de fragmentos de roca sedimentaria con moderado grado de metamorfismo y cemento variado.
- Orientación isotrópica de minerales constitutivos: Cuarzo (20%), feldespatos: plagioclasa, ortosa (5%), fragmentos de roca: (13%), minerales accesorios: muscovita (2%), matriz: óxido de hierro y material carbonático (15%) y cemento: cuarzo, óxido de hierro, mineral calcáreo y minerales arcillosos (25%).
- Presencia de materia orgánica.
- Nivel medio de compactación.

La tabla V.10, indica como se encuentra distribuida de forma porcentual la composición de la muestra.

Tabla V.10: Resultados de análisis petrográfico de la muestra 4, Pozo PDS-004A

Arenisca	61%
Lutita	5%
Porosidad	10%
Materia orgánica	3%
Material carbonático	18%
Limonita	3%

5.1.5.2.1.- Determinación de la resistencia a compresión mediante ensayo de carga puntual

Debido a que se requiere evaluar la posibilidad de asentamientos por parte de la fundación sobre la cual se construirán las escombreras, se seleccionó un grupo de muestras de núcleos para ensayos de carga puntual. La tabla V.11.1 indica las muestras en función del pozo de la cual se obtuvieron.

Tabla V.11: Profundidad y pozos correspondientes a las muestras ensayadas

Muestra No.	Pozo	Descripción	Profundidad (m)
1	PDS-003A	Limolita con intercalaciones de arenisca	25,40
2	PDS-003A	Lutita	50,19
3	PDS-004A	Limolita con intercalaciones de arenisca	69,70
4	PDS-004A	Limolita	76,40
5	PDS-005B	Arenisca limosa	38,36
6	PDS-005B	Lutita carbonácea	46,05
7	PDS-005B	Arenisca con intercalaciones de limolita	99,05
8	PDS-005B	Arenisca	180,21
9	PDS-005B	Arenisca limosa	190,55
10	PDS-017A	Limolita carbonácea	40,58
11	PDS-017A	Limolita carbonácea	64,58
12	PDS-020P	Limolita	21,86
13	PDS-020P	Arenisca limosa	23,60

Fuente: Elaboración propia

Las mismas se ensayaron de acuerdo a los criterios establecidos en la norma ASTM (D 5731-02). En la tabla V.12, se muestran los resultados obtenidos:

Tabla V.12: Resultados del ensayo de carga puntual de las muestras

Muestra No.	Pozo	Resistencia (Mpa)	Resistencia (kg/cm ²)
1	PDS-003A	14,4	144
2	PDS-003A	18,69	186,9
3	PDS-004A	15,96	159,6
4	PDS-004A	19,11	191,1
5	PDS-005B	12,89	128,9
6	PDS-005B	3,66	36,6
7	PDS-005B	33,46	334,6
8	PDS-005B	56,49	564,9
9	PDS-005B	58,30	583,0
10	PDS-017A	22,5	225
11	PDS-017A	26,01	260,1
12	PDS-020P	19,79	197,9
13	PDS-020P	25,38	253,8

Fuente: Elaboración propia

5.2.- Descripción del sistema hidrológico

El área correspondiente al Sur de la mina Paso Diablo, posee cuatro ríos principales que lo atraviesan, conformadas por igual número de cuencas que tienen el mismo nombre: Paso Diablo, Carichuano, Tigre y Norte. Las cuencas Paso Diablo Carichuano y Tigre constituyen un factor limitante de suma importancia para la ejecución del desarrollo de la mina, debido a que los cauces de sus ríos principales convergen en dirección Este-Oeste hacia el área de explotación (449 Ha) y la zona destinadas para la construcción de la escombrera Suroeste. Por su parte la cuenca del río Norte drena sus aguas al Sur de la mina, por lo que no representa un elemento que influya en las labores de desarrollo de la misma. A continuación se describen las características más resaltantes de las cuatro cuencas mencionadas previamente.

1. Cuenca del río Paso Diablo: posee una extensión de 1.853 hectáreas (18,53 km²). Su río principal es uno de los cuerpos de agua de mayor caudal, el cual según el informe de estudio hidráulico de obras en los ríos Paso Diablo y Baqueta efectuado en 2002, alcanza una magnitud máxima de 215 m³/seg. Su curso superior o punto de nacimiento se ubica en las coordenadas 1218702 N, 790988 E (555 msnm). La longitud de su cauce es de 7,5 km, definiendo su trayecto en dirección Noreste, con una pendiente promedio de 66 m/km, para drenar sus aguas en su curso superior localizados en la posición 1220022 N, 798869 E (60 msnm)
2. Cuenca del río Carichuano: es la cuenca de mayor superficie: 1.947 hectáreas (19,47 km²), lo que supone que su río principal posee el caudal más alto (no determinado). Su punto de nacimiento o curso superior, se ubica en las

coordenadas 1213809 N, 789610 E (615 msnm); la longitud de cauce es de unos 10,9 km, con una pendiente promedio de 51 m/km y dirección casi paralela al río Paso Diablo, pero con ubicación más al Sur, por lo que atraviesa la zona de emplazamiento de la escombrera Suroeste y toda el área de la mina en sentido Oeste-Este. Finalmente, su cauce inferior o punto de desembocadura corresponde a las coordenadas 1219503 N, 798795 E (60 msnm).

3. Cuenca del río Tigre: constituye la menor de las cuencas en cuanto a su extensión: 301 hectáreas (0,30 km²). El río Tigre, tiene su curso superior en las coordenadas 1215214 N, 793010 E (375 msnm). Su cauce posee la dirección Noreste, atravesando tanto el área de explotación como la dispuesta para la construcción de la escombrera Suroeste, a medida que su cauce se adentra en la zona de explotación (448,6 Ha), éste varía su dirección hacia el norte. La longitud de su cauce se encuentra por el orden de 5,8 km y una pendiente promedio de 54 m/km, para finalizar en su curso inferior con la posición 1217593 N, 796633 E (60 msnm).
4. Cuenca del río Norte: es después de la cuenca del río Tigre, una de las de menor extensión (328 Ha). Tiene su cauce superior en las coordenadas 1215620 N, 795171 E (140 msnm). La dirección de su cauce es Oeste-Este, con longitud aproximada de 4,4 km, para finalizar drenar sus aguas en el punto de coordenadas 1215000 N, 798133 E (80 msnm). Tiene un pendiente promedio de 13,6 m/km, lo que lo supone que la velocidad media de sus aguas es una de las menores y por consiguiente su caudal también.

La tabla V.12, muestra de forma sintetizada las características principales de las cuencas antes descritas, incluyendo los tiempos de concentración de cada una de estas.

Tabla V.13: Características principales de las cuencas del área de la mina Paso Diablo Sur

Nombre del Rio	Area (km ²)	Pendiente (m/Km.)	Tiempo concentración (horas)	Tiempo concentración (min.)
Rio Paso Diablo	18,53	66	0,58	34,8
Rio Carichuano	19,47	51	0,65	38,7
Rio Tigre	0,30	54	0,05	3,2
Rio Norte	0,32	13,6	0,08	3,5

Fuente: Elaboración propia

La figura 17, muestra los cauces de los ríos principales de las cuencas Paso Diablo, Carichuano, Tigre y Norte.

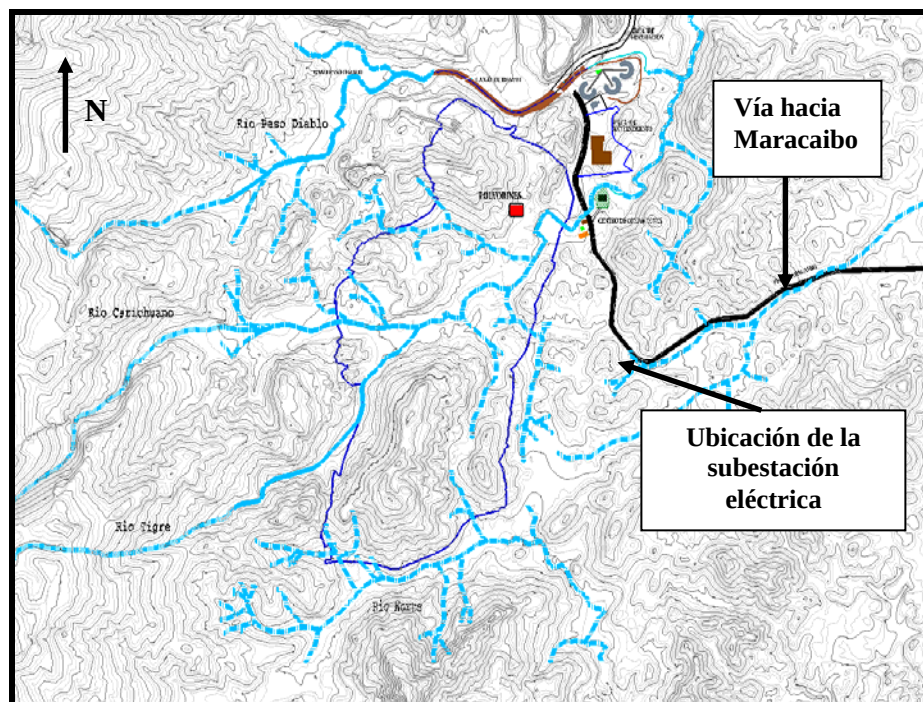


Fig. 17: Sistema hidrológico del área Sur de la mina Paso Diablo

Fuente: Superintendencia de Ingeniería y Planificación, CDG, 2008

5.2.2.- Modificación del sistema hidrológico

Las condiciones que establece el sistema hidrológico actual, imposibilita los desarrollos de la mina, por lo que se plantea el desvío de los ríos que drenan sus

aguas hacia la zona de explotación y los lugares destinados para el emplazamiento de las escombreras adyacentes a dicha zona. El planteamiento para solventar dicha situación, propone desviar el río Carichuano hacia el río Paso Diablo y el río Tigre hacia el río Norte. Además, se establece la modificación de la carretera que comunica la mina con las poblaciones externas, como se muestra en la figura 18, con lo que se alcanza las condiciones mínimas necesarias para el desarrollo del proyecto.

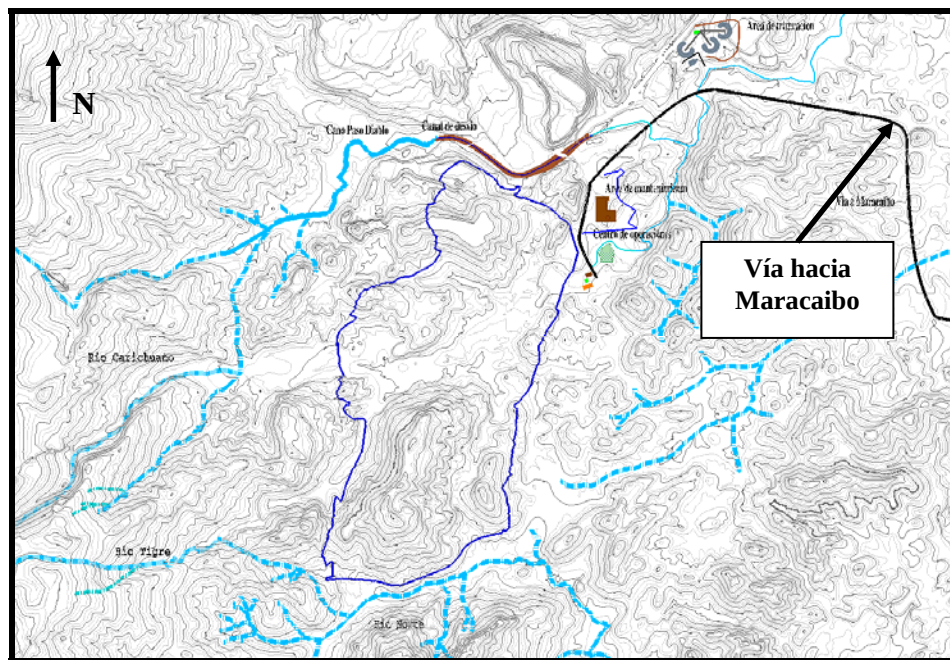


Fig.18: Sistema hidrológico modificado del área Sur de la mina Paso Diablo
Fuente: Elaboración propia

5.3.- Descripción y evaluación del régimen pluviométrico de la mina

En la mina Paso Diablo se registran los datos pluviométricos por medio de cuatro estaciones: estación Carichuano, estación Manuelote, estación El Carbón y estación Dispatch. Esta última solo posee dos años de registro, lo cual sirve de referencia para tormentas máximas ocurridas en las estaciones adyacentes.

Según un estudio hidrológico sobre microcuencas de los ríos Paso Diablo, Carichuano y Baqueta realizado por la Empresa Rental de la Facultad de Agronomía

de la Universidad del Zulia (RENTAGRO) en 2005, el área en estudio forma parte del pié de monte de la Sierra de Perijá, que aunado a otras serranías, bordean El Lago de Maracaibo provocando de esta manera que los vientos circulen en sentido antihorario en la depresión del lago. Este fenómeno del tipo ciclónico produce corrientes de aire desde el Lago hacia la sierra obligando a ascender, enfriándose y produciendo intensas lluvias por la condensación de las masas de aire caliente. Este tipo de precipitación se conoce como *precipitación orográfica* y se producen en regiones montañosas de áreas relativamente extensas y sus lluvias tienden a ser homogéneas.

De acuerdo a resultados obtenidos por parte de RENTAGRO (2005), se determina que existe una distribución temporal de lluvia homogénea de doble onda bimodal, donde el mayor registro de las máximas tasas de precipitación ocurre entre agosto y noviembre y el menor de las máximas se suscita entre abril y junio. Sólo el 3% de las lluvias significativas se producen fuera de los ciclos máximos, pero éstas no evidencian una variedad temporal del ciclo de distribución pluvial y no modifican el fenómeno de tendencia, por corresponder a eventos puntuales fuera del rango, por lo que no se consideran en los registros.

La información que se considera para la evaluación del régimen pluviométrico característico de la mina Paso Diablo Sur, corresponde a la proporcionada por las estaciones Carichuano (coordenadas 1217963 N, 798104 E), El Carbón (coordenadas 1225479 N, 799615 E) y Manuelote (coordenadas 1210760 N, 804095 E) según el informe antes mencionado y de acuerdo a información suministrada por el Instituto de Conservación del Lago de Maracaibo (ICLAM) especificada en el mismo, se

calculó el promedio mensual y anual para cada estación con los registros hasta el año 2005, los cuales se muestran en las figuras 19 y 20 respectivamente.

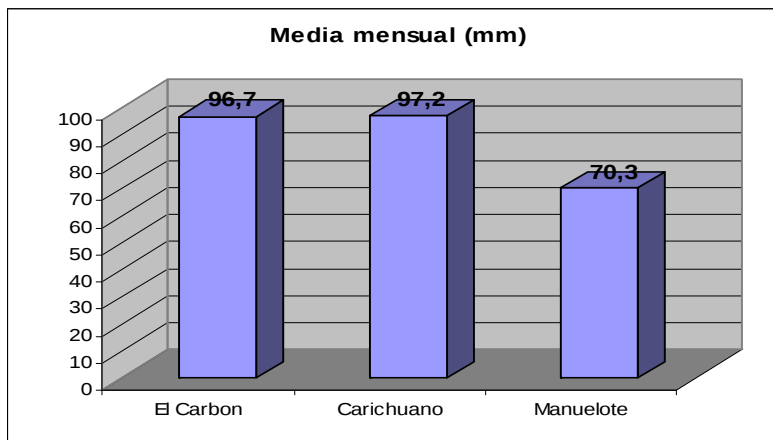


Fig. 19: Lluvias promedio mensual para cada estación
Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

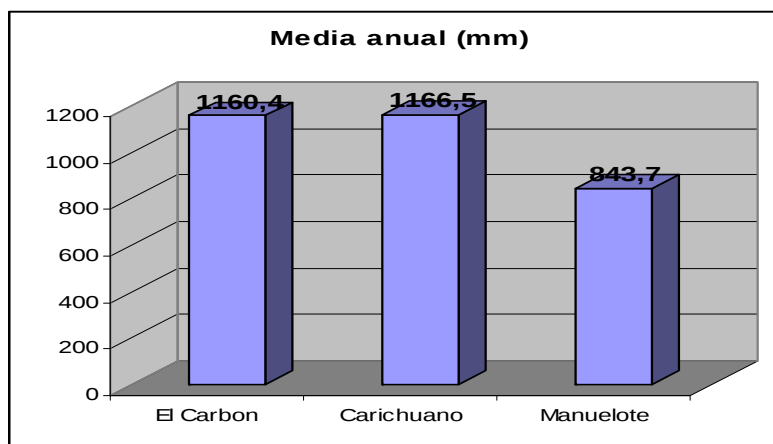


Fig.20: Lluvias promedio anual para cada estación
Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Para la elaboración de las curvas intensidad-frecuencia-duración, se dispone de datos pluviométricos desde 1963 hasta 1998 correspondiente la estación El Carbón, condición no existente en las otras dos estaciones, por lo que para hacer homogénea la data a evaluar, se consideró los registros para el período de 1988 hasta 1998. Las tablas V.13, V.14 y V.15, muestran los registros de lluvias máximas en mm para distintas duraciones registradas por estas estaciones

Tabla V.14: Registro de lluvias máximas, Estación El Carbón

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	16,00	20,70	31,10	62,10	94,00	102,00	104,00	108,00	108,00	108,00	108,00
1989	15,90	31,70	37,90	54,90	74,00	104,00	121,00	125,00	128,00	128,00	128,00
1990	20,00	36,10	41,00	54,10	94,00	143,00	144,00	161,00	161,00	161,00	161,00
1991	13,20	17,90	30,30	43,90	57,00	83,00	86,00	102,00	107,00	107,00	118,00
1992	13,40	20,40	30,60	45,40	68,00	95,00	108,00	117,00	120,00	120,00	138,00
1993	10,20	17,70	24,30	34,50	52,00	63,00	71,00	122,00	122,00	122,00	127,00
1994	13,00	25,40	34,70	61,20	84,00	92,00	93,00	99,00	102,00	102,00	102,00
1995	11,90	19,90	25,00	36,20	59,00	68,00	75,00	79,00	81,00	111,00	115,00
1996	11,20	17,30	26,30	40,60	61,00	86,00	123,00	168,00	169,00	169,00	175,00
1997	14,10	26,10	40,20	65,10	86,00	92,00	118,00	165,00	170,00	170,00	199,00
1998	9,90	16,80	23,20	35,90	61,00	79,00	92,00	93,00	93,00	93,00	100,00

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Tabla V.15: Registro de lluvias máximas, Estación Manuelote

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	28,20	40,20	57,20	68,30	70,00	101,00	127,00	128,00	128,00	128,00	128,00
1989	14,10	20,70	30,20	43,70	46,00	65,00	68,00	86,00	90,00	90,00	90,00
1990	9,90	18,00	25,30	32,50	40,00	61,00	69,00	79,00	80,00	80,00	80,00
1991	12,80	13,60	19,90	30,50	33,00	36,00	33,00	36,00	44,00	44,00	50,00
1992	10,10	20,20	22,80	43,60	48,00	71,00	91,00	95,00	95,00	95,00	95,00
1993	10,10	14,10	18,60	30,10	40,00	60,00	68,00	78,00	78,00	81,00	134,00
1994	31,70	42,20	63,30	81,90	114,00	125,00	126,00	132,00	134,00	134,00	134,00
1995	11,00	15,80	21,90	28,60	39,00	43,00	48,00	67,00	71,00	71,00	71,00
1996	10,40	13,80	17,30	26,80	33,00	39,00	44,00	65,00	66,00	66,00	74,00
1997	15,20	21,30	25,60	38,00	43,00	47,00	55,00	62,00	62,00	62,00	88,00
1998	7,20	11,60	15,30	24,60	31,00	31,00	39,00	55,00	59,00	64,00	66,00

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Tabla V.16: Registro de lluvias máximas, Estación Carichuano

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	15,80	21,70	32,40	44,40	61,00	78,00	83,00	100,00	103,00	114,00	115,00
1989	10,70	21,00	31,40	41,80	58,00	82,00	83,00	84,00	86,00	88,00	92,00
1990	10,60	21,00	25,30	38,70	80,00	80,00	80,00	97,00	103,00	103,00	103,00
1991	10,40	20,10	29,80	42,00	63,00	64,00	66,00	66,00	66,00	66,00	70,00
1992	9,90	18,80	19,70	29,50	50,00	88,00	106,00	106,00	106,00	106,00	116,00
1993	19,40	20,40	26,50	37,70	49,00	70,00	80,00	88,00	89,00	89,00	120,00
1994	10,50	26,40	29,00	38,90	75,00	131,00	131,00	138,00	138,00	138,00	138,00
1995	11,80	25,80	26,40	43,90	56,00	66,00	70,00	71,00	71,00	81,00	88,00
1996	14,40	20,20	23,00	24,50	41,00	62,00	67,00	109,00	109,00	109,00	110,00
1997	13,10	28,80	30,10	40,80	71,00	112,00	131,00	167,00	167,00	167,00	202,00
1998	11,00	22,00	30,60	42,90	61,00	85,00	94,00	112,00	112,00	124,00	132,00

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Mostradas las láminas de lluvia en mm, se procede con conversión de estas a intensidades de lluvia (mm/h). Para efectuar dicha conversión se multiplican los registros con duración menores a una hora por el factor $60/\Delta t$; para los datos restantes, el factor considerado es $1/\Delta t$. A continuación, son mostradas en las tablas V.15, V.16 y V.17, las intensidades en mm/hora para cada una de las estaciones.

Tabla V.17: Registro de intensidades de lluvia, Estación El Carbón

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	192,00	124,20	124,40	124,20	94,00	51,00	34,67	18,00	12,00	9,00	4,50
1989	190,80	190,20	151,60	109,80	74,00	52,00	40,33	20,83	14,22	10,67	5,33
1990	240,00	216,60	164,00	108,20	94,00	71,50	48,00	26,83	17,89	13,42	6,71
1991	158,40	107,40	121,20	87,80	57,00	41,50	28,67	17,00	11,89	8,92	4,92
1992	160,80	122,40	122,40	90,80	68,00	47,50	36,00	19,50	13,33	10,00	5,75
1993	122,40	106,20	97,20	69,00	52,00	31,50	23,67	20,33	13,56	10,17	5,29
1994	156,00	152,40	138,80	122,40	84,00	46,00	31,00	16,50	11,33	8,50	4,25
1995	142,80	119,40	100,00	72,40	59,00	34,00	25,00	13,17	9,00	9,25	4,79
1996	134,40	103,80	105,20	81,20	61,00	43,00	41,00	28,00	18,78	14,08	7,29
1997	169,20	156,60	160,80	130,20	86,00	46,00	39,33	27,50	18,89	14,17	8,29
1998	118,80	100,80	92,80	71,80	61,00	39,50	30,67	15,50	10,33	7,75	4,17

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Tabla V.18: Registro de intensidades de lluvia, Estación Manuelote

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	338,40	241,20	228,80	136,60	70,00	50,50	42,33	21,33	14,22	10,67	5,33
1989	169,20	124,20	120,80	87,40	46,00	32,50	22,67	14,33	10,00	7,50	3,75
1990	118,80	108,00	101,20	65,00	40,00	30,50	23,00	13,17	8,89	6,67	3,33
1991	153,60	81,60	79,60	61,00	33,00	18,00	11,00	6,00	4,89	3,67	2,08
1992	121,20	121,20	91,20	87,20	48,00	35,50	30,33	15,83	10,56	7,92	3,96
1993	121,20	84,60	74,40	60,20	40,00	30,00	22,67	13,00	8,67	6,75	5,58
1994	380,40	253,20	253,20	163,80	114,00	62,50	42,00	22,00	14,89	11,17	5,58
1995	132,00	94,80	87,60	57,20	39,00	21,50	16,00	11,17	7,89	5,92	2,96
1996	124,80	82,80	69,20	53,60	33,00	19,50	14,67	10,83	7,33	5,50	3,08
1997	182,40	127,80	102,40	76,00	43,00	23,50	18,33	10,33	6,89	5,17	3,67
1998	86,40	69,60	61,20	49,20	31,00	15,50	13,00	9,17	6,56	5,33	2,75

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Tabla V.19: Registro de intensidades de lluvia, Estación Carichuano

Año	Duración										
	5'	10'	15'	30'	1 h	2 h	3 h	6 h	9 h	12 h	24 h
1988	189,60	130,20	129,60	88,80	61,00	39,00	27,67	16,67	11,44	9,50	4,79
1989	128,40	126,00	125,60	83,60	58,00	41,00	27,67	14,00	86,00	7,33	3,83
1990	127,20	126,00	101,20	77,40	80,00	40,00	26,67	16,17	103,00	8,58	4,29
1991	124,80	120,60	119,20	84,00	63,00	32,00	22,00	11,00	66,00	5,50	2,92
1992	118,80	112,80	78,80	59,00	50,00	44,00	35,33	17,67	106,00	8,83	4,83
1993	232,80	122,40	106,00	75,40	49,00	35,00	26,67	14,67	89,00	7,42	5,00
1994	126,00	158,40	116,00	77,80	75,00	65,50	43,67	23,00	138,00	11,50	5,75
1995	141,60	154,80	105,60	87,80	56,00	33,00	23,33	11,83	71,00	6,75	3,67
1996	172,80	121,20	92,00	49,00	41,00	31,00	22,33	18,17	109,00	9,08	4,58
1997	157,20	172,80	120,40	81,60	71,00	56,00	43,67	27,83	167,00	13,92	8,42
1998	132,00	132,00	122,40	85,80	61,00	42,50	31,33	18,67	112,00	10,33	5,50

Fuente: Informe de estudio sobre microcuencas , RENTAGRO, 2005

Una vez efectuada la conversión de las láminas de lluvias a intensidades de lluvia para las distintas duraciones, se procede con la construcción de las curvas intensidad-frecuencia-duración correspondiente a cada estación.

Para la elaboración de dichas curvas, es necesario ordenar los registros de intensidades de forma decreciente y determinar los tiempos de retorno o frecuencia de ocurrencia de estos, más relevantes en función de la vida operativa establecida para el proyecto. Para que la evaluación obtenga el mayor grado de precisión, se consideran los registros de intensidades con sus respectivas duraciones para una frecuencia de 11 años, el cual es el más cercano a los 12 años establecidos como vida operativa del proyecto. En las figuras 21, 22 y 23, se muestran las curvas intensidad-frecuencia-duración para las estaciones El Carbón, Manuelote y Carichuano, respectivamente, para una frecuencia o tiempo de retorno de 11 años.

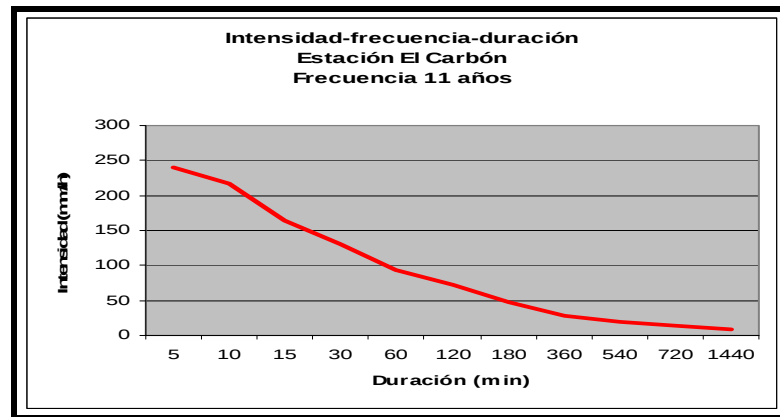


Fig. 21: Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno de 11 años, Estación El Carbón

Fuente: Elaboración propia

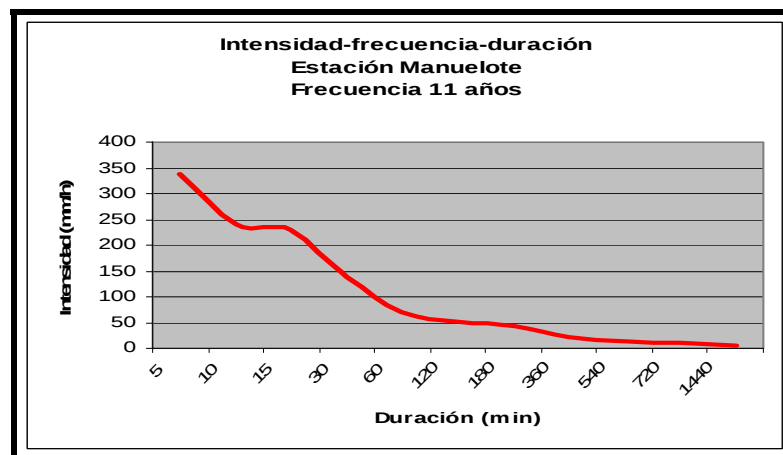


Fig. 22: Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno 11 años, Estación Manuelote

Fuente: Elaboración propia

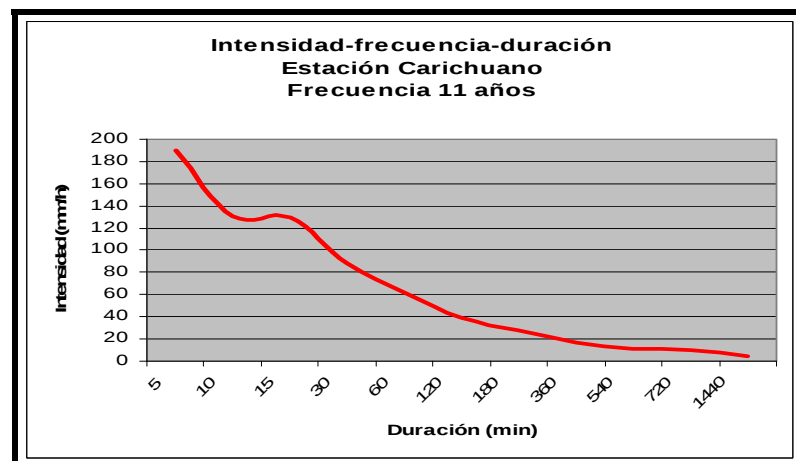


Fig. 23: Curva intensidad-frecuencia- duración para un tiempo de retorno 11 años, Estación Carichuano

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI

PARÁMETROS CONSIDERADOS EN EL MÉTODO CONSTRUCTIVO DE

LAS ESCOMBRERAS

6.1.- Método constructivo considerado

El método constructivo establecido por la Gerencia de Planificación de CDG corresponde al de fases ascendentes superpuestas (escombreras externas) y vertido libre (escombreras internas). Dichos métodos brindan aceptables condiciones de estabilidad en función de las características geomecánicas de los estériles generados en la mina.

6.1.1.- Descripción de los parámetros de diseño de las escombreras

Los resultados obtenidos en estudios geotécnicos de los estériles tipos asociados al yacimiento por parte de la Golder Associates en su informe de 1997, establece los parámetros de diseño sugeridos para la construcción de las escombreras interiores (*retrollenados*) y exteriores, siendo éstas últimas el objeto de estudio principal de esta investigación. En la tabla VI.1 y VI.2, se muestran los elementos geométricos considerados para las escombreras exteriores e internas, según lo sugerido por la consultora mencionada.

Tabla VI.1: Parámetros de diseño de las escombreras externas según informe geotécnico de la Golder Associates, 1997

Altura de Talud (m)	Angulo de Talud	Ancho de terraza (m)	Angulo general
20	36°	52	17°

Fuente: Informe geotécnico sobre escombreras, Golder Associates (1997)

Tabla VI.2: Parámetros de diseño de las escombreras internas según informe geotécnico de la Golder Associates, 1997

Altura de Talud (m)	Angulo de Talud	Ancho de terraza (m)	Angulo general
20	36°	60	17°

Fuente: Informe geotécnico sobre escombreras, Golder Associates (1997)

6.1.2.- Propiedades físicas de los estériles

El material estéril tipo, posee un conjunto de propiedades geomecánicas de suma importancia para la definición de los lineamientos que se consideran en el

diseño y plan de desarrollo de las escombreras externas e internas, obedeciendo a las características operativas de los equipos de carga y acarreo disponibles. Dichas propiedades se determinaron a partir de estudios efectuados sobre los estériles generados en los desarrollo del sector Norte de la mina Paso Diablo. En función de los criterios establecidos por la Gerencia de Ingeniería de Mina, a través de la Superintendencia de Geología, se considera que las propiedades del material estéril que será extraído en el sector sur no presentarán discrepancias importantes que requieren de la realización de nuevos estudios al respecto. La tabla VI.3, muestra las características geomecánicas del material estéril.

Tabla VI.3: Características geomecánicas del material estéril

Densidad banco (t/m ³)	Densidad suelto (t/m ³)	Factor de esponjamiento	Factor de compactación	Angulo de fricción	Cohesion (t/m ²)
2,40	1,66	1,45	1,30	36°	0,5

Fuente: Golder Associates (1997)

Por otro lado, los parámetros establecidos para el diseño de las escombreras externas mostrados en la tabla VI.1, son sugeridos, por lo que pueden ser ampliados de manera de alcanzar una configuración que permita incrementar la capacidad de estas. Las condiciones topográficas, de los sectores Suroeste y Sureste de la mina Paso Diablo Sur, destinados para el emplazamiento de las escombreras, son muy irregulares con ángulo de laderas muy pronunciados y variaciones de relieve considerables, lo que limita sus respectivas capacidades, aunado a los importantes volúmenes de estéril que se tiene previsto se generen del desarrollo de la mina. Fundamentado en este escenario, se considera mantener la altura de los taludes en 20m, reduciendo el ancho de las terrazas intermedias de 52m a 4m, condición que supone suficiente para la circulación de vehículos livianos y la construcción de

canales colectores para el control de la aguas de escorrentía. Se establece un ángulo de talud de 21° (2,5 H:1 V), alcanzando de esta manera un ángulo general de 20° . Para reforzar el criterio de seguridad en el cual se fundamenta la propuesta, como se muestra en la figura 24, se determina el factor de seguridad asociado al mismo por medio del método de Bishop simplificado, mediante la utilización del programa Geo-Slope, desarrollado por Geostudio, de acuerdo a las propiedades de cohesión, densidad o peso específico y ángulo de fricción de los estériles expuestos, en la tabla VI.3, se determina la superficie circular de rotura crítica, especificando su centro y la línea piezométrica a 30% de la altura del talud, como lo muestra la figura 25.

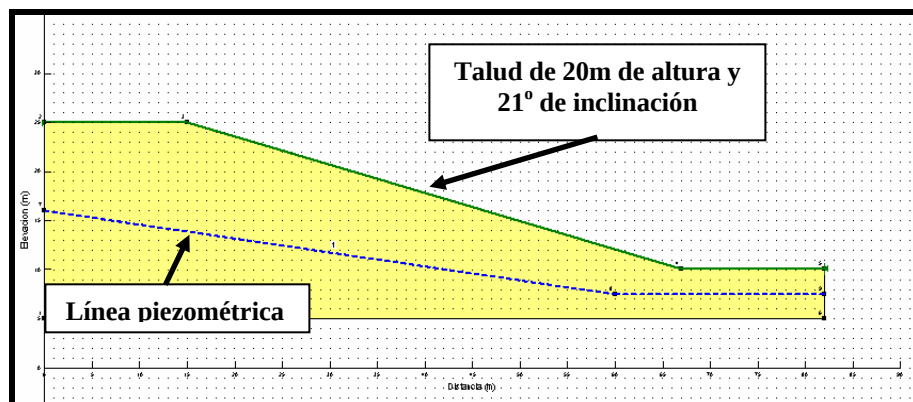


Fig.24: Geometría de diseño para un talud
Fuente: Elaboración propia

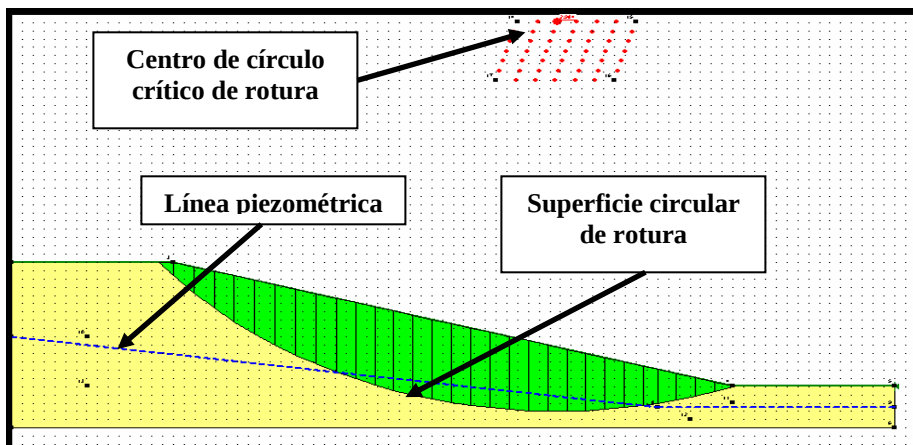


Fig.25: Análisis de estabilidad del talud por el método de Bishop simplificado
Fuente: Elaboración propia

Se determina la superficie circular de rotura para el cual se obtiene el factor de seguridad mínimo de 2,984. Dicho valor es aceptable para la conformación de los taludes en las escombreras externas.

Por otro lado se requiere verificar que la condición de estabilidad existente para las escombreras de manera global, para un ángulo general de 20°, el cual permite aumentar la capacidad de la misma, sin menoscabar el aspecto de seguridad.

Para comprobar dicha situación, se procede con la realización del procedimiento de análisis de estabilidad para un talud efectuado previamente, con la diferencia de que se considera una altura general de 100m (hasta 5 bancos, de 20m de altura), que representa las dimensiones máximas establecidas para las escombreras de mayor capacidad. La figura 26, muestra la configuración del perfil de una escombrera, con 5 cinco niveles de 20m de altura cada uno, anchos de terrazas de 4m y la línea piezométrica al 30% de la altura de la misma.

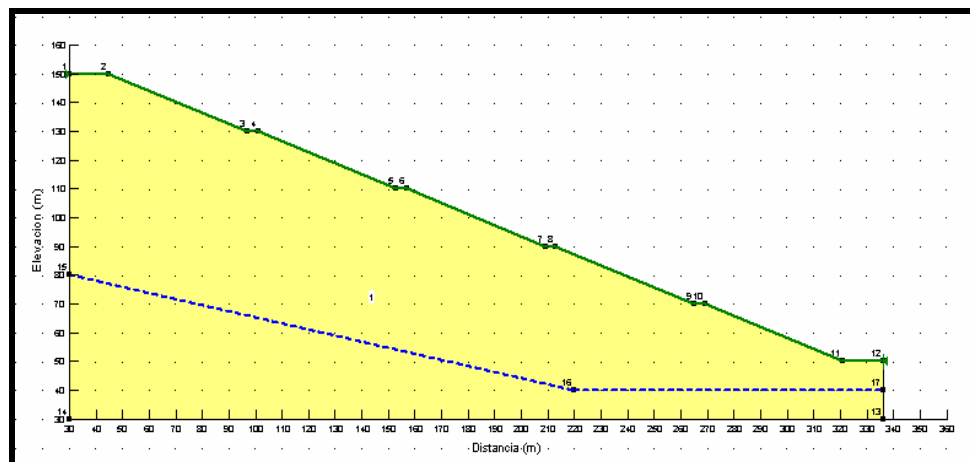


Fig. 26: Perfil de una escombrera externa de base plana

Fuente: Elaboración propia

La tabla VI.4, muestra la configuración establecida como definitiva para las escombreras externas

Tabla VI.4: Parámetros de diseño propuestos para las escombreras externas

Altura de Talud (m)	Angulo de Talud	Ancho de terraza (m)	Angulo general
20	21°	4	20°

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de estabilidad de la escombrera, se considera dos situaciones: una superficie de rotura afectando tres niveles y otra para cuatro niveles. En las figuras 27 y 28, se muestra los círculos de rotura simulados tanto para la primera como segunda situación.

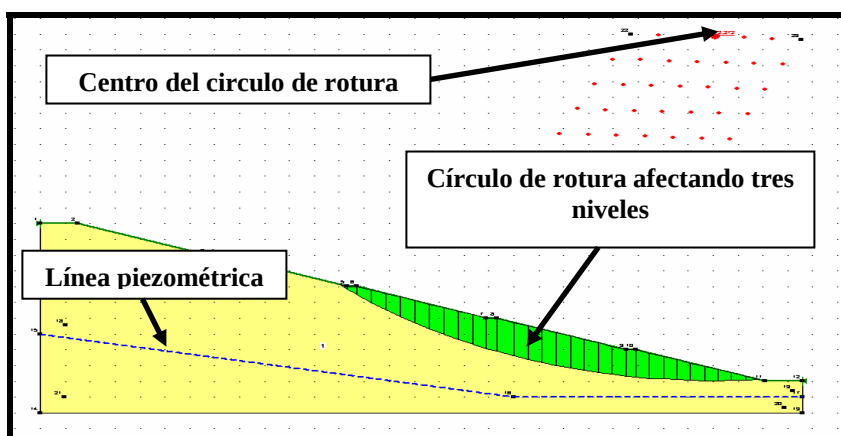


Fig.27: Análisis de estabilidad de la escombrera considerando la afectación de tres niveles

Fuente: Elaboración propia

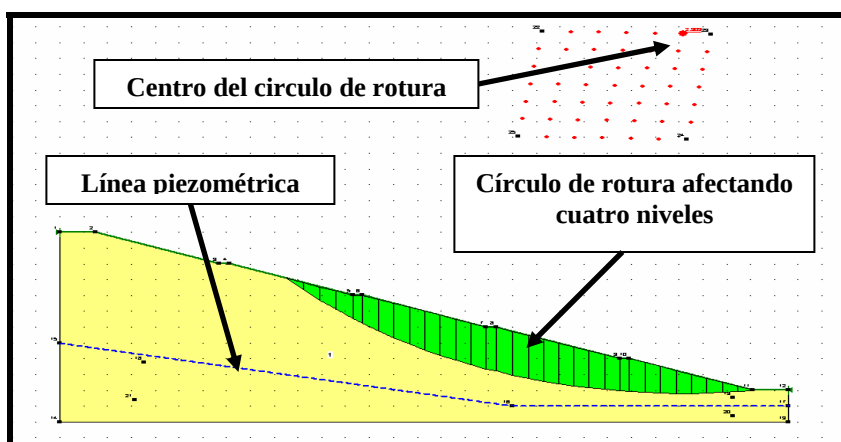


Fig. 28: Análisis de estabilidad de la escombrera considerando la afectación de cuatro niveles

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad, corresponden a factores de seguridad de 2,309 y 2,272 de forma respectiva.

6.1.3.- Evaluación de volúmenes de material estéril asociado a la explotación de la mina

La secuencia de explotación se define, mediante niveles establecidos en intervalos de 15m por encima de la cota 60 sobre el nivel medio del mar (snmm) e intervalos de 12m por debajo de ésta.

De acuerdo a lineamientos establecidos por la Gerencia de Ingeniería de Mina de CDG, se tiene establecido comenzar el depósito del 61,2% del estéril generado de la explotación (287,466 MM metros cúbicos banco), el cual se tiene contemplado sea distribuido en las tres escombreras externas.

En cuanto a la escombrera interna (retrollenado), la planificación tiene previsto iniciar su desarrollo en el sector norte de la mina aproximadamente, para el quinto año de las operaciones, para el cual se tiene considerado depositar el 38,8% (182,442 MM metros cúbicos banco), el cual representa el remanente del estéril.

Los valores de volúmenes previamente presentados, corresponden a la totalidad de las evaluaciones de reservas efectuada por la Gerencia de Ingeniería de Mina de CDG, mediante la utilización del módulo Stratmodel perteneciente al software desarrollado por la empresa australiana Mincom.

En la tabla VI.5, se muestra los volúmenes en metros cúbicos banco (mcb) del material estéril evaluado en bancos de 15m hasta alcanzar el nivel 60, continuando con bancos de 12m para finalizar en el nivel -132, de acuerdo a la configuración adoptada en el diseño de la fosa.

Tabla VI.5: Volúmenes de estéril por niveles de la mina Paso Diablo Sur

Nivel	Overburden	Interburden	Total por Nivel
	MM mcb	MM mcb	MM mcb
240	124	0	124
225	929	0	929
210	4112	11	4123
195	4345	11	4356
180	6609	144	6753
165	9636	562	10197
150	13726	1230	14956
135	17853	2386	20238
120	21145	4976	26121
105	26302	9426	35728
90	28317	15032	43349
75	26214	22219	48433
60	18405	29440	47845
48	7603	24869	32472
36	3805	25819	29624
24	1726	25018	26743
12	770	22647	23417
0	319	18724	19044
-12	160	16263	16424
-24	26	14084	14111
-36	2	12071	12073
-48	1	9398	9398
-60	0	7803	7803
-72	0	6246	6246
-84	0	4788	4788
-96	0	2624	2624
-108	0	1319	1319
-120	0	613	613
-132	0	59	59
Total	192,128	277,780	469,908

Fuente: Gerencia de Ingeniería de Mina, CDG (2008)

6.2.- Descripción de los parámetros de diseño de las vías principales y secundarias de acceso a las escombreras

Los parámetros geométricos establecidos para las vías principales y secundarias en cortes son mostrados en la figura 29.

- Ancho de berma de seguridad: 4m.

- Ancho de hombrillo : 3m.
- Ancho de calzada: 19,34m
- Ancho de explanada: 25,34m.
- Ancho total de vía: 35,14m

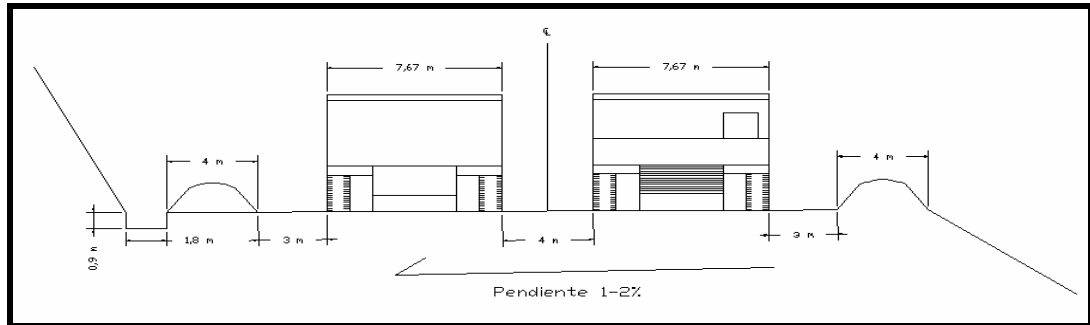


Fig. 29: Geometría de las vías principales y secundarias construidas en cortes
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado las dimensiones para vías en rellenos son mostrados en la figura

30.

- Ancho de berma de seguridad: 4m.
- Ancho de hombrillo: 3,0m.
- Ancho de calzada: 19,34m
- Ancho de explanada: 25,34m
- Ancho total de vía: 35,14m

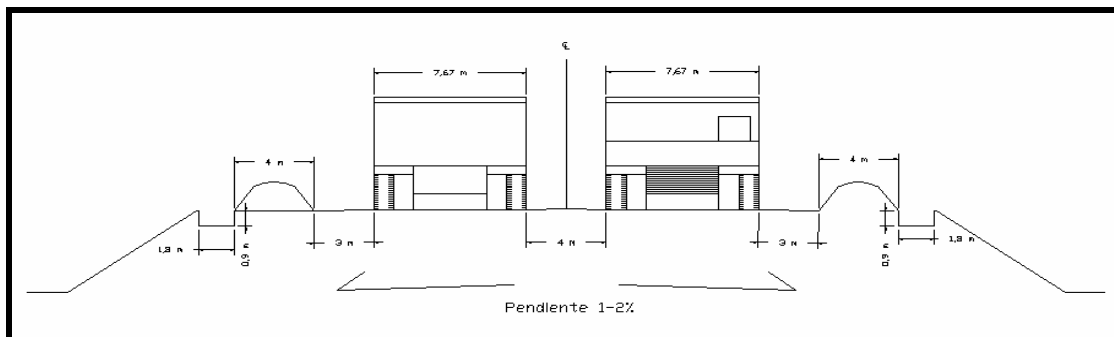


Fig. 30: Geometría de las vías principales y secundarias construidas en rellenos
Fuente: Elaboración propia

6.3.- Descripción de las operaciones de vertido

6.3.1.-Ritmos de descarga

De acuerdo a las evaluaciones de volúmenes de estéril asociados a polígonos definidos por nivel, desde el predesarrollo al desarrollo de la fosa., la secuencia de explotación considera el inicio del mismo a nivel 240 hasta alcanzar el nivel -132, estableciendo como límite de avance vertical el piso del manto 4O, mientras que la limitante para la expansión del tajo en la horizontal, obedece a una relación de remoción no superior a 5,7:1.

Para realizar el acarreo del material estéril desde los frentes de explotación hasta las distintas escombreras, tanto externas como internas, se requiere de un flota de camiones de capacidad suficiente, para que los niveles de producción con los cuales se fundamentan los planes de mina actuales, se conserven una vez se inicien las operaciones en la mina Paso Diablo Sur.

La flota de camiones a utilizar en las labores de acarreo, corresponden a equipos Caterpillar 793C. Las características técnicas principales, son mostradas en la tabla VI.6

Tabla VI.6: Característica técnicas principales de los camiones Caterpillar 793C

Capacidad Camión (tm)	Capacidad tolva (m ³)	Largo (m)	Ancho (m)	Radio de giro mínimo (m)
240	96	8,94	7,41	32,4

Fuente: Manual de equipos Caterpillar (2001)

La Gerencia de Ingeniería de CDG, establece de acuerdo un factor de llenado del camión de 92,8 m³, el cual considera las condiciones de diversidad granulométrica del material estéril, después de ejecutada la fragmentación con explosivos.

La secuencia de vertido que se establece para alcanzar la geometría de los taludes especificados en la tabla VI.4, considera cuatro fases descritas a continuación:

- Avance por vertido libre con taludes de 10m: se efectúa el avance con material estéril gris (*interburden*) hasta 6m antes del límite considerado, para completar con estéril rojizo (*overburden*), como se muestra en la figura 31.

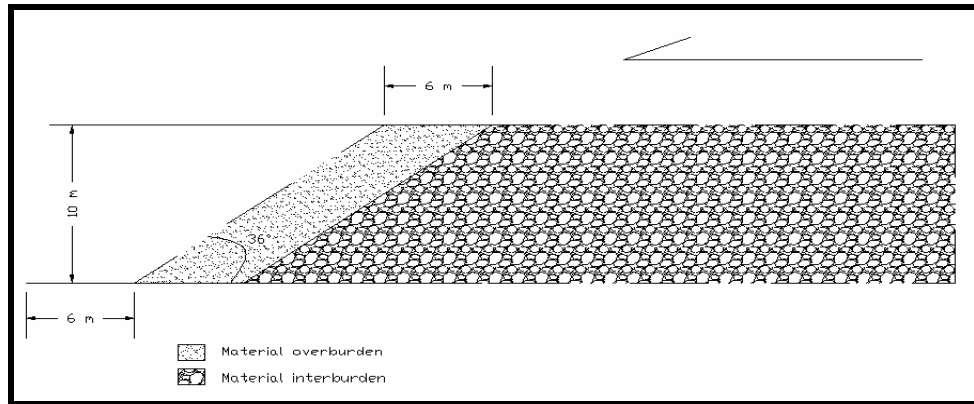


Fig. 31: Avance inicial por vertido libre para taludes de 10m de altura

Fuente: Elaboración propia

- Ejecución del corte a seis metros a partir de la cresta, con lo cual se alcanza un ángulo de talud de 21° (corte 2,5 H:1 V) y se procede con el mismo avance, deteniéndolo a seis metros de la cresta del banco inferior, como se indica en la figura 32.

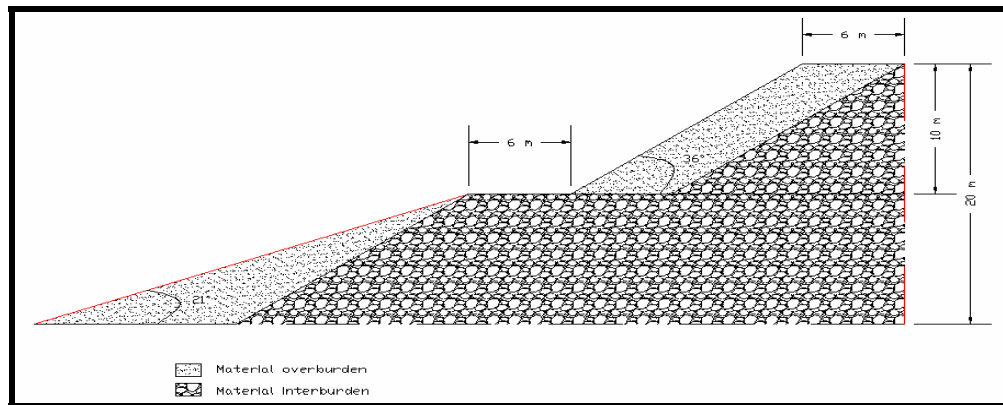


Fig.32: Ejecución del corte en el primer subnivel y avance del segundo por vertido libre

Fuente: Elaboración propia

- Se efectúa el mismo procedimiento para realizar el corte, como se muestra en la figura 33.

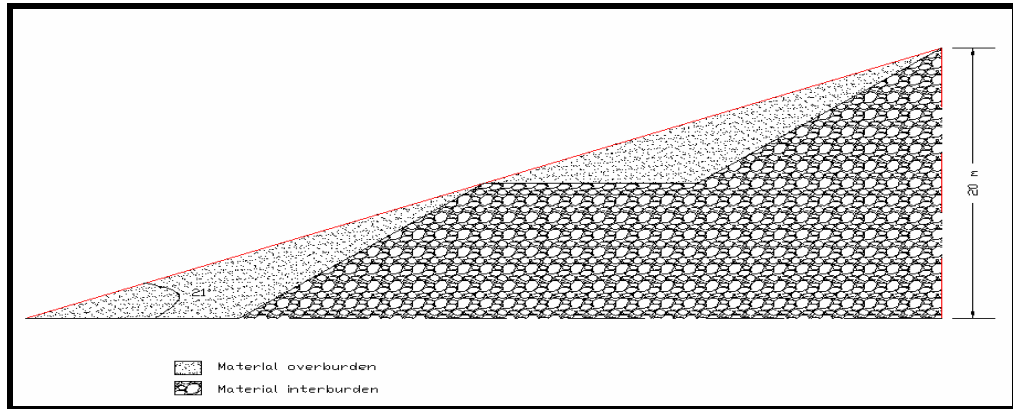


Fig. 33: Realización del corte en el segundo subnivel para completar el talud final

Fuente: Elaboración propia

- Se procede con la colocación de la capa vegetal, con un espesor de al menos 30cm, como se indica en la figura 34, con lo que se concluye el proceso de intervención con equipo pesado, antes de las labores de reforestación.

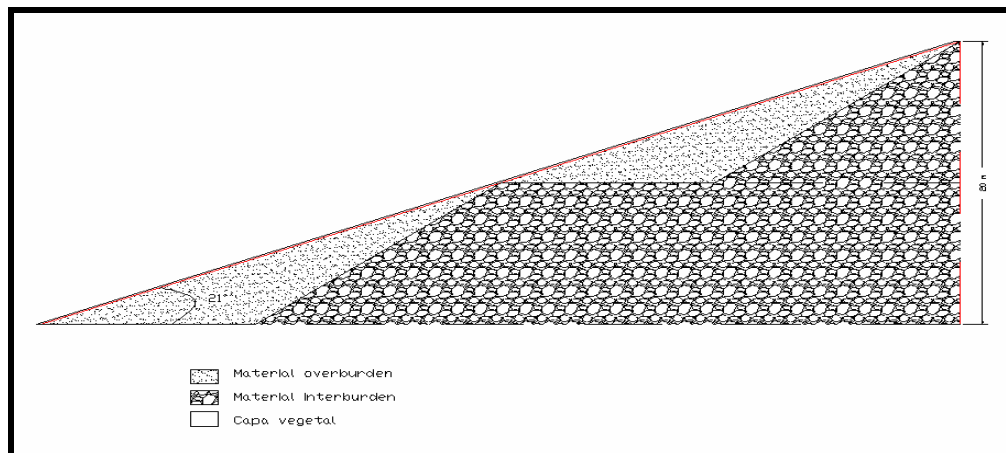


Fig. 34: Colocación de la capa vegetal

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado se establece una ecuación empírica para la determinación del tiempo total de ciclo de acarreo para cada camión, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$T_c = 0,004 \cdot L_p + 0,026 \cdot \Delta c + T_v + T_f$$

Donde,

T_c: tiempo del ciclo (min)

L_p: longitud del trayecto (m)

Δc: diferencia entre la cota de carga y la cota de descarga en la escombrera (m)

T_v: tiempo de vertido en la escombrera (1,25 min)

T_f: tiempo fuera de las condiciones estándar (0,67 min)

La ecuación mostrada, ha tenido gran aceptación debido a la excelente aproximación en los tiempos en comparación con los obtenidos con programas informáticos especializados. La productividad de los camiones está estrechamente relacionada con las establecidas para los equipos de carga, de los cuales se disponen actualmente en los desarrollos del Norte de la mina Paso Diablo. CDG, dispone para las labores de carga del estéril de tres (3) palas eléctricas y cuatro hidráulicas, cuyas características operativas principales, se muestran en la tabla VI.7.

Tabla VI.7: Características operativas principales de los equipos de carga

Pala	Capacidad balde (m ³)	Productividad estimada (m ³ /hora)
P&H	36	1550
O&K	26	1050

Fuente: Gerencia de Ingeniería, CDG, 2008

6.3.2.- Plan de desarrollo adoptado para cada escombrera

6.3.2.1.- Escombrera Suroeste

Las condiciones existentes dentro de los límites de mina, determinan que los volúmenes de material estéril proveniente de las labores de predesarrollo desde el nivel 240 hasta 165, serán depositados en la escombrera Suroeste. Se evaluaron distintas alternativas para la definición de las vías de comunicación entre los sectores

Norte y Sur de la mina, considerando pendientes entre -8% y 8%, las cuales obedecen a las especificaciones de funcionamiento de los camiones por parte de la empresa fabricante.

Se sectorizó el lugar de emplazamiento de la escombrera Suroeste en tres grandes zonas: sur, centro y norte. Las condiciones topográficas determinaron la forma y tamaño final de la escombrera como se muestra en la figura 35, teniendo muy en cuenta la hidrología existente y los perfiles de acarreo más idóneos. La escombrera alcanza en el sector norte el nivel 140, debido a que su expansión está limitada por el río Paso Diablo al oeste. Para los sectores centro y sur, ésta se diseñó hasta el nivel 180.

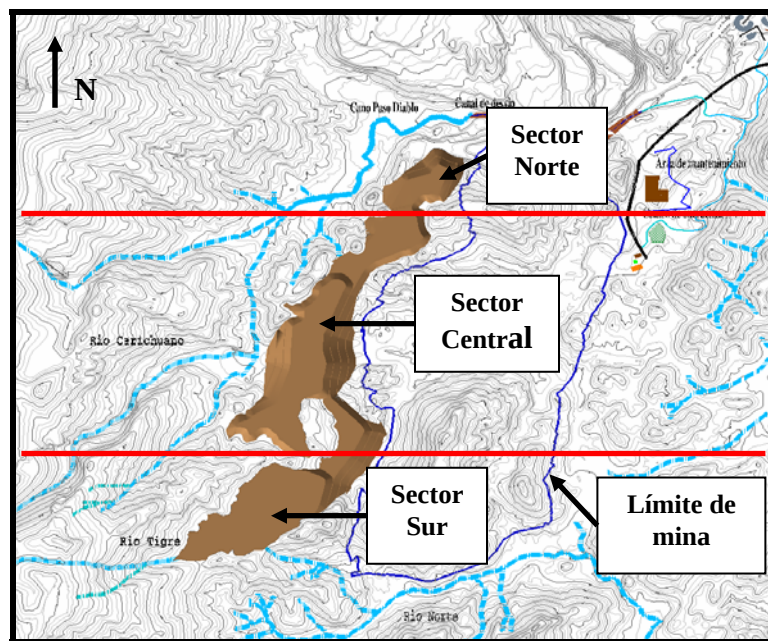


Fig. 35: Diseño y emplazamiento final de la escombrera Suroeste
Fuente: Elaboración propia

En la tabla VI.8, se muestran las capacidades por sector y nivel de la escombrera en metros cúbicos banco (mcb), sólo basta con multiplicar por el factor 1,3, para conocer el equivalente en metros cúbicos sueltos de la escombrera.

Tabla VI.8: Capacidad por sectores y niveles de la escombrera Suroeste

Volumen por nivel	120 MMmcb	140 MMmcb	160 MMmcb	180 MMmcb	Total por sector MMmcb
Zona Sur	0,528	1,352	3,155	4,857	9,892
Zona Centro	2,031	4,956	8,417	4,224	19,628
Zona Norte	0	1,448	0	0	1,448
Total por nivel	2,559	7,757	11,572	9,081	30,969

Fuente: Elaboración propia

Para comenzar las labores se establece una vía que comunica los niveles 240, 225, 210, 195, correspondiente a una colina localizada en el sector centro-sur del área a desarrollar, además de otra en el sector norte cuando se alcance el nivel 180, a partir del cual se definen dos sectores de arranque, como se muestra en la figura 36.

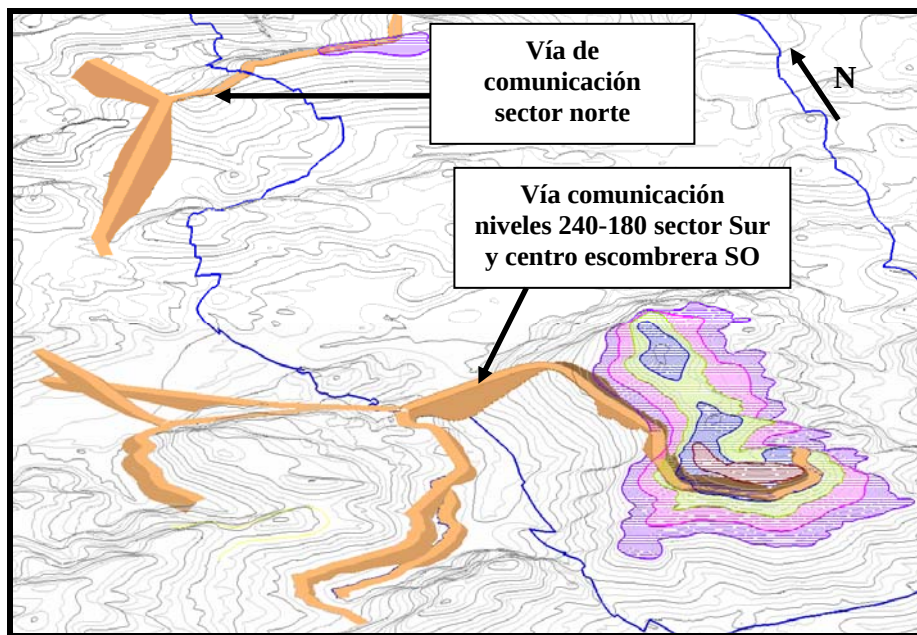


Fig. 36: Vías de comunicación iniciales de los niveles en mina norte y sur con el lugar de emplazamiento de la escombrera Suroeste

Fuente: Elaboración propia

Los volúmenes provenientes de los niveles 240 y 225 de mina, se depositarán en los sectores 120 y 140 al Sur de la escombrera respectivamente, como se muestra en la figura 37, por medio de una rampa hasta el nivel 120 y para posteriormente construir otra hasta el 140.

El material proveniente de los niveles de mina 210 y 195, será distribuido en el sector central de la escombrera, por medio de rampa hasta el nivel 120 y otra hasta el nivel 140 bordeando una colina localizada en esta zona, como se muestra en la figura 38. De esta manera, se completa los niveles 120 y 140 en el sector central de la escombrera Suroeste, como se indica en la figura 39.

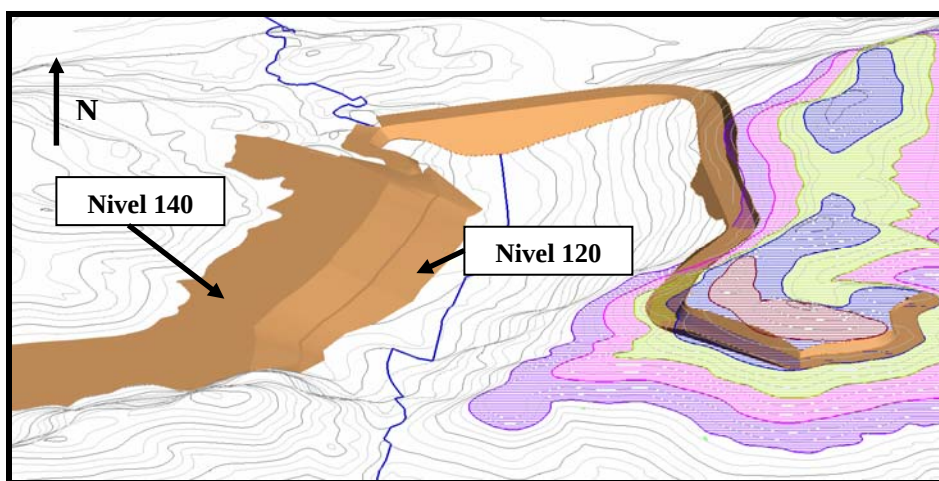


Fig. 37: Comunicación de los niveles 240 y 225 en mina con los sectores 120 y 140 al sur de la escombrera SO

Fuente: Elaboración propia

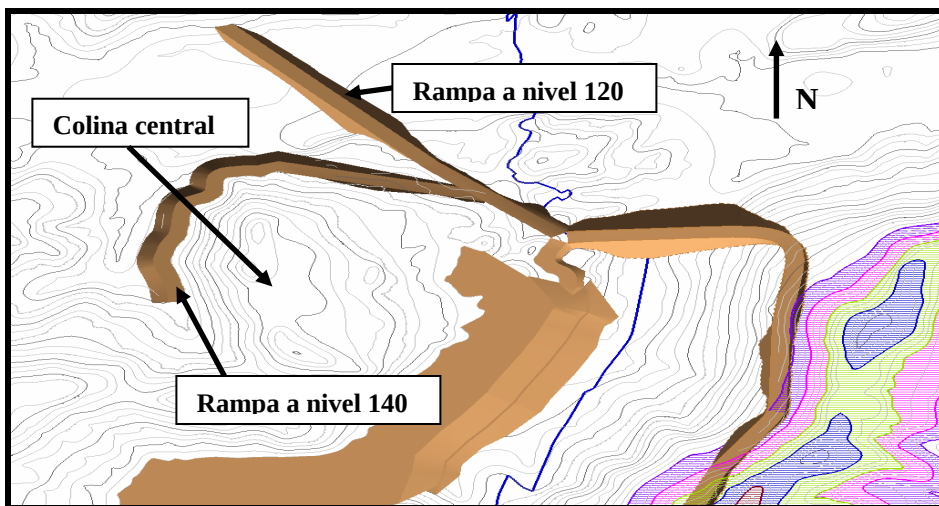


Figura 38: Comunicación de los niveles 210 y 195 en mina con los niveles 120 y 140 del sector central de la escombrera SO

Fuente: Elaboración propia

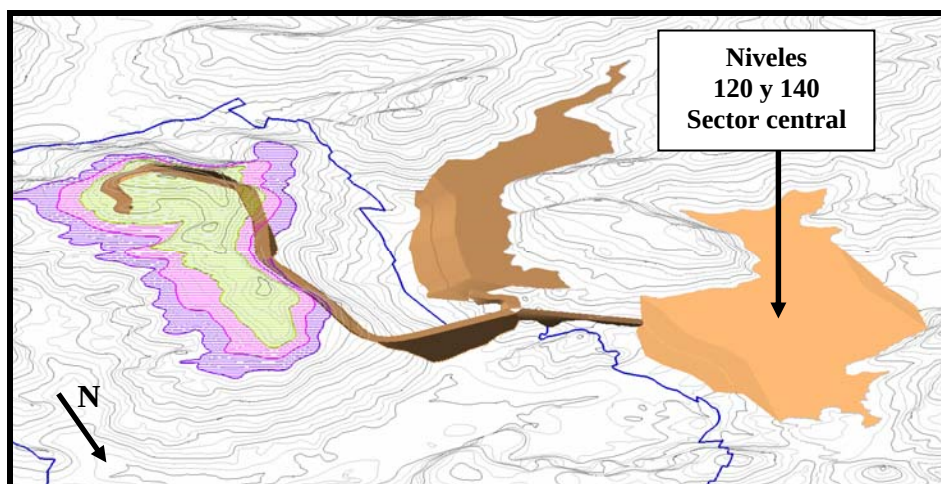


Fig.39: Configuración final de los sectores centro y sur en los niveles 120 y 140 de la escombrera SO

Fuente: Elaboración propia

Culminada el vertido de los estériles y alcanzada las capacidades de los sectores 120 y 140 en las zonas sur y centro de la escombrera, se procede con el desarrollo del nivel 180 en mina, el cual constituye punto de partida para la conformación de un nuevo frente de arranque y carga, con lo que se incorpora la vía de comunicación norte, como se indica en la figura 40, para descender a través de una rampa hasta el nivel 140 del sector norte para depositar parte de los estériles.

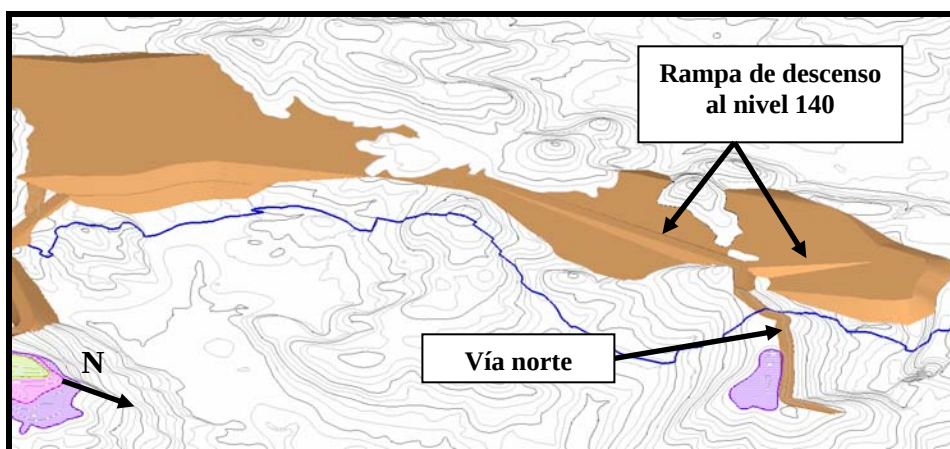


Fig. 40: Desarrollo del sector norte a nivel 140 de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

Abarcada en su totalidad el nivel 140 norte, se procede con la construcción de un terraplén en ascenso hasta el nivel 160 en el sector central en sentido norte-sur y

sur-norte, como se muestra en la figura 41 y 42, de manera que garantice la disponibilidad de áreas de vertido a medida que avance el desarrollo en el nivel 180 y establezca la comunicación entre el sector norte y central de la escombrera hasta que sea completado el nivel 160 en los mencionados sectores.

Finalizado el desarrollo en mina a nivel 180, se procede con el nivel 165, para el cual se tiene establecido una nueva rampa en ascenso hasta alcanzar el nivel 180 en el área central de la escombrera, como se indica en la figura 43.

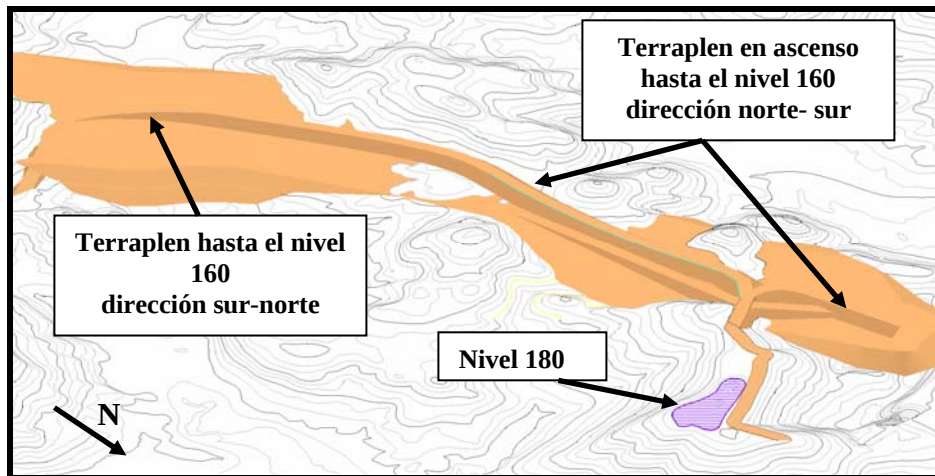


Fig. 41: Construcción del terraplen para el desarrollo del nivel 160 en los sectores norte y centro de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

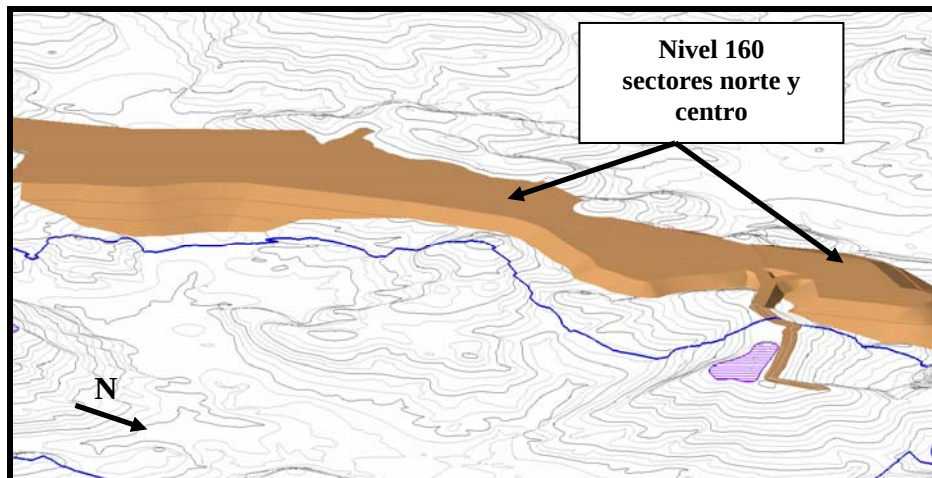


Fig. 42: Condición final de los sectores norte y centro de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

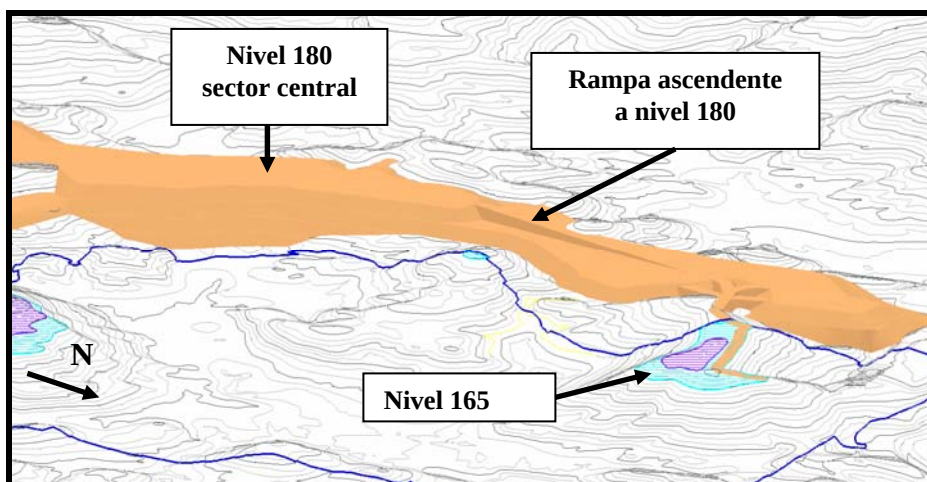


Fig. 43: Desarrollo del nivel 180 del sector central de la escombrera

Fuente: Elaboración Propia

Dado que el mayor aporte del nivel 165, se suscita en el área Sur de la mina, es necesario la habilitación de los sectores 160 y 180 Sur de la escombrera. En vista de este escenario, se establece una vía de comunicación, como se muestra en la figura 44, mediante la construcción un terraplén en descenso al nivel 160 y su posterior ascenso al nivel 180

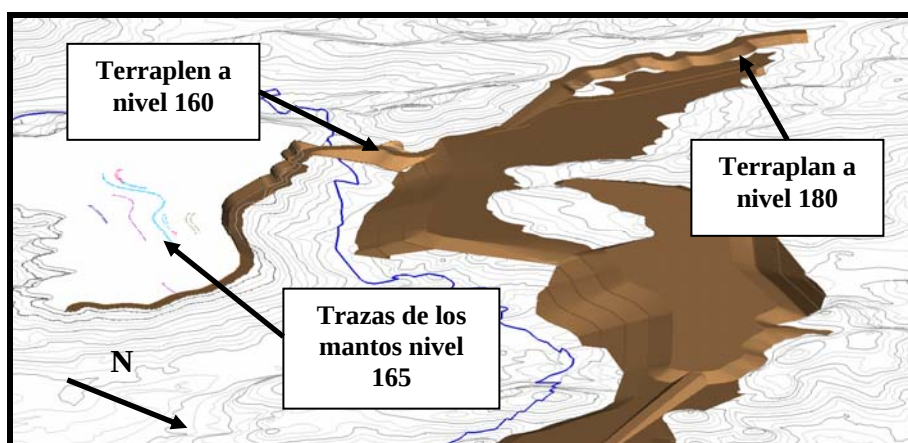


Fig. 44: Construcción de la rampa de acceso a los niveles 160 y 180 de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

El terraplen en ascenso hacia los niveles 160 y 180 en los sectores sur de la escombrera, alcanza una extensión medida desde su base de 183 Ha, con lo que se completa el llenado en cada uno de sus espacios como lo indica la figura 45.

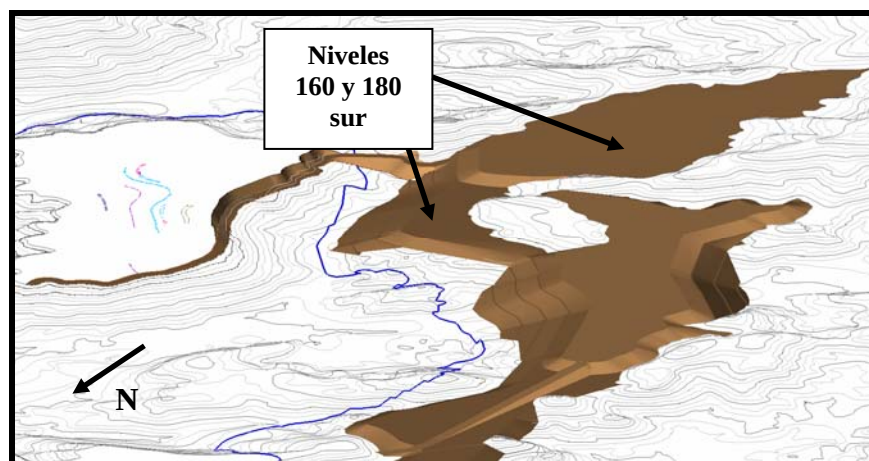


Fig. 45: Configuración final de la escombrera SO
Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la descripción del plan de desarrollo de la escombrera Suroeste, se plantea como requerimiento inherente, la determinación de los niveles de producción estimados de forma individual para los equipos de acarreo (camiones Caterpillar 793C), mediante la utilización de la ecuación empírica para la determinación de los tiempos de ciclo, presentada previamente.

Para la determinación de los tiempos de ciclo en minutos de cada camión, se considera un tiempo de vertido en las escombreras por parte del camión de 1,25 minutos y 0,67 minutos, asociado a reducciones en la velocidad por intersecciones y obstáculos en las vías.

Se procede con el cálculo del número de ciclos realizados en una hora, dividiendo 60 este último tiempo, para finalmente estimar la producción del equipo multiplicando los ciclos efectuados por un 96% de la capacidad nominal de la tolva ($92,8 \text{ m}^3$). En la tabla VI.9, se muestra de forma sintetizada los niveles en mina, la localización en la escombrera en cuestión y las productividades calculadas en mcb/hora individual del camión

Tabla VI.9: Ritmo y distribución de descarga de estéril para la escombrera Suroeste

Nivel de Carga	Nivel de descarga Escombrera SO	Perfil de acarreo promedio (m)	Productividad mcb/hora
240	120 sur	2994	345
225	140 sur	3270	342
210	120 - 140 centro	1935	472
195	140 - 160 centro	2000	495
180	140 norte y 160 centro	2128	500
165	160 - 180 centro y sur	3007	404
150	180 sur	3213	374

Fuente: Elaboración propia

6.3.2.2.- Escombrera Sureste

El lugar de emplazamiento de la escombrera, presenta variaciones en el relieve importantes en las áreas norte y sur, siendo el área central la más adecuada para el depósito mayoritario de los estériles. Para ello se dispondrá de parte de la zona donde se ubica la carretera que comunica la mina con la población de Carrasquero, además de la subestación eléctrica que proporciona energía a la infraestructura de CDG. Como medida de solución a este escenario se propone la construcción del tramo que comunicaría la mina con las poblaciones externas en la zona norte de la escombrera y con ello la habilitación de la subestación eléctrica (ver figura 16). Los resultados de la evaluación de las capacidades de recepción de material estéril de la escombrera por nivel en metros cúbicos banco (*mcb*) son mostrados en la tabla VI.10. Para convertir los metros cúbicos a metros cúbicos sueltos, se multiplica por 1,3.

Tabla VI.10: Capacidad por niveles de la Escombrera Sureste

Nivel en mina	100	120	140	160	180	200	Total
	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb
mcb por nivel	9,263	35,763	48,383	47,987	41,864	35,298	218,558

Fuente: Elaboración propia

Debido a las condiciones topográficas predominantes dentro del área de explotación, se tiene planteado inicialmente definir un conjunto de vías de

comunicación en los sectores norte y sur desde el nivel 150 hasta el 120 dentro del área de explotación, las cuales convergen hacia dos vías principales de acceso (norte y centro) y una de comunicación norte-sur hacia las áreas de vertido. Para facilitar la elaboración de un plan de desarrollo lo más eficientemente posible, la escombrera se divide en dos sectores: norte y sur, como se muestra en la figura 46.

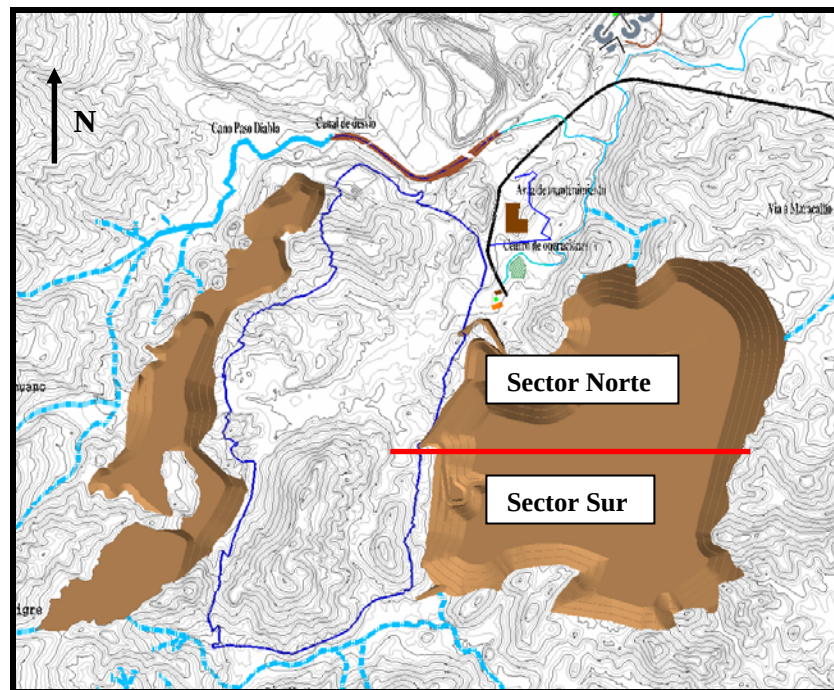


Fig. 46: Diseño y emplazamiento final de la escombrera Sureste
Fuente: Elaboración propia

El desarrollo de la Escombrera Sureste tiene establecido comenzar con el vertido del material estéril proveniente del desarrollo a nivel 150, del cual 0,504 MMmcb (3,4%), se destinará a la escombrera Suroeste y el remanente 14,452 MMmcb (96,6%), se depositará en los niveles 100 (sólo sector norte) y 120 de la escombrera en cuestión. Para el estéril proveniente del nivel 135, se establece como destino el nivel 120 de forma exclusiva, como se muestra en la figura 47.

Culminado el desarrollo en los niveles 150 y 135, se procede con las labores extractivas en el nivel 120, de la cual se tiene estimado se generen 26,121 MMmcb de estéril, el cual será vertido entre los nivel 120 y 140 de la escombrera, para lo que se construirán dos rampas de comunicación entre dichos niveles (sector norte y sur), como si indica en la figura 48.

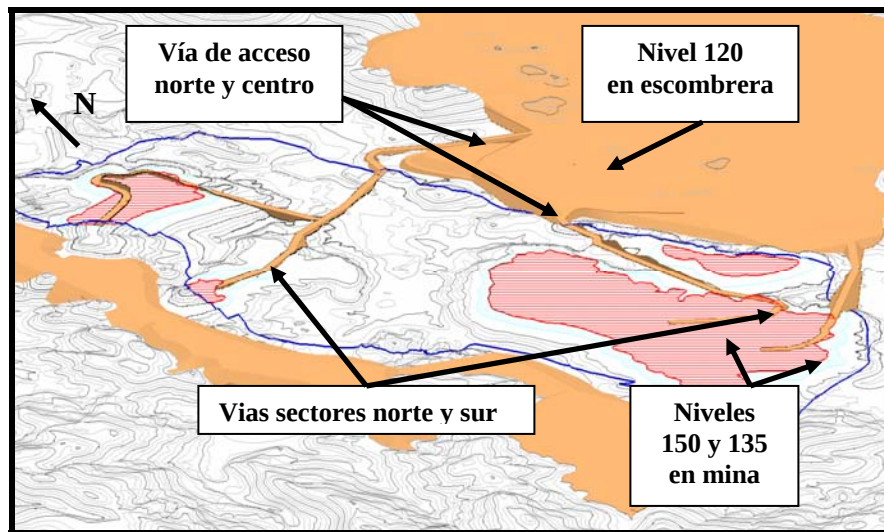


Fig. 47: Desarrollo del nivel 120 de la escombrera SE

Fuente: Elaboración propia

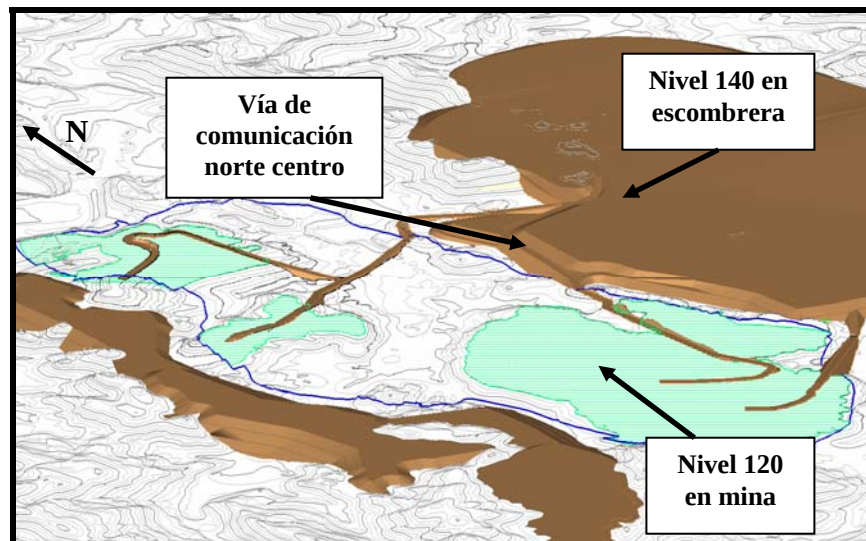


Fig.48: Construcción de las vías de acceso e inicio de las labores desarrollo del nivel 140 de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

A medida que el desarrollo de mina avanza, progresivamente se alcanza la uniformidad en la topografía, por lo se plantea la construcción de una rampa de salida a través del muro que limita el área de explotación al este hasta el nivel 105, la cual comunicará los sectores norte y centro de la mina. El material estéril proveniente del mismo, será depositado inicialmente en el nivel 140 y el remanente en el nivel 160, como se muestra en la figura 49, para lo cual se tiene considerado la habilitación de las rampas en los sectores norte y sur de la escombrera.

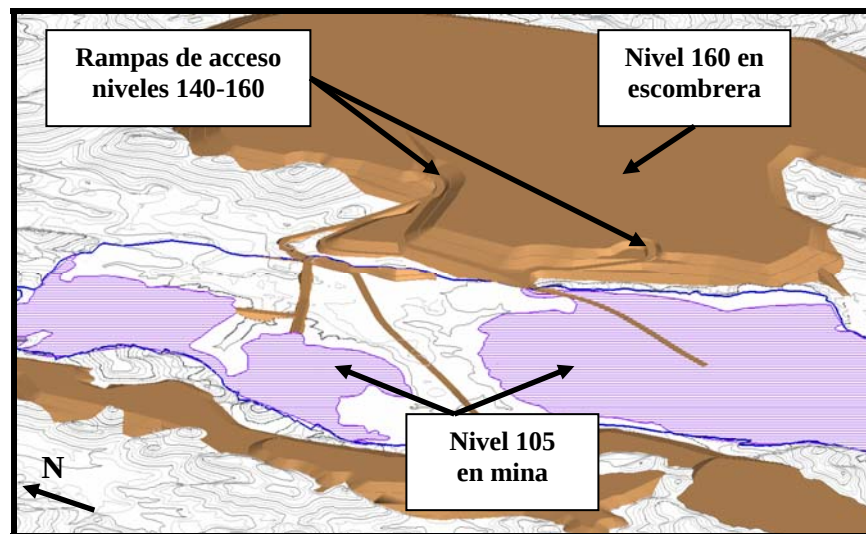


Fig. 49: Construcción de las vías de acceso e inicio de la labores desarrollo del nivel 160 de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

Cuando el nivel 105 de la mina haya culminado, se establece que las vías internas tendrán sólo dos salidas (Norte y Sur). El estéril generado del desarrollo extractivo a nivel 90, será vertido en el nivel 160 en la escombrera de forma exclusiva, como se muestra en la figura 50.

En cuanto al nivel 75 correspondiente al área de explotación, el estéril tendrá como destino el nivel 160 y 180 de la escombrera Sureste. Para establecer la

comunicación entre dichos niveles, es necesario la habilitación de las rampas en los sectores norte y sur, tal y como se muestra en la figura 51.

Una vez culminado el desarrollo a nivel 75, se procede con el desarrollo a nivel 60 en la mina, del cual sólo el 73% (sector centro y sur de la mina), será vertido en el nivel 200 de la escombrera Sureste, por razones de capacidad, a través de la rampa que comunica los niveles 180 y 200, como lo muestra la figura 52, para finalmente alcanzar su configuración final.

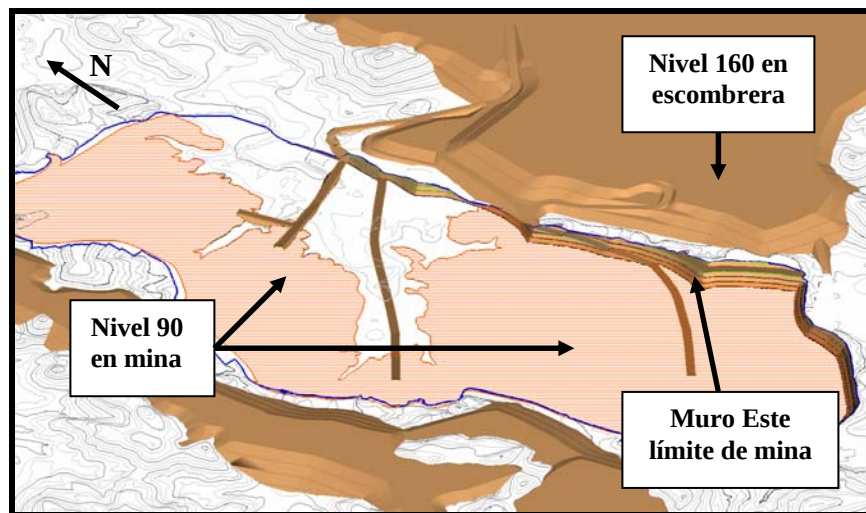


Fig. 50: Configuración final del nivel 160 de la escombrera

Fuente: Elaboración propia

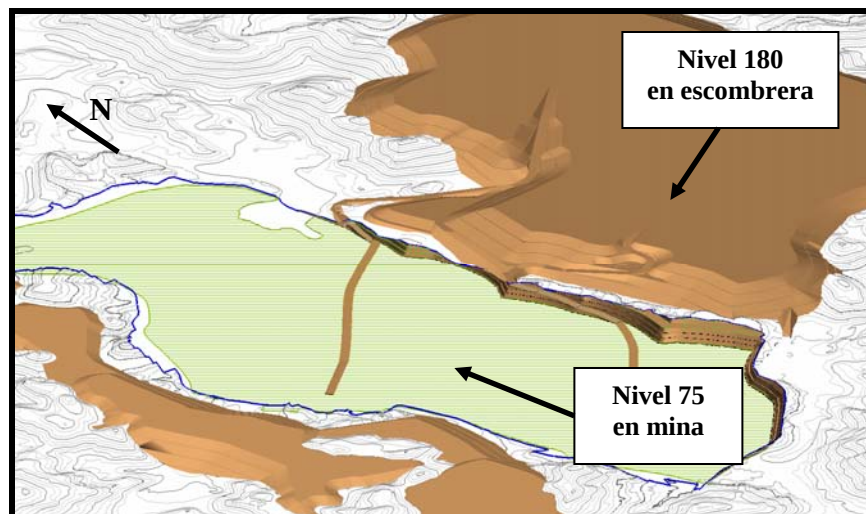


Fig. 51: Construcción de las vías de acceso e inicio de la labores desarrollo del nivel 180

Fuente: Elaboración propia

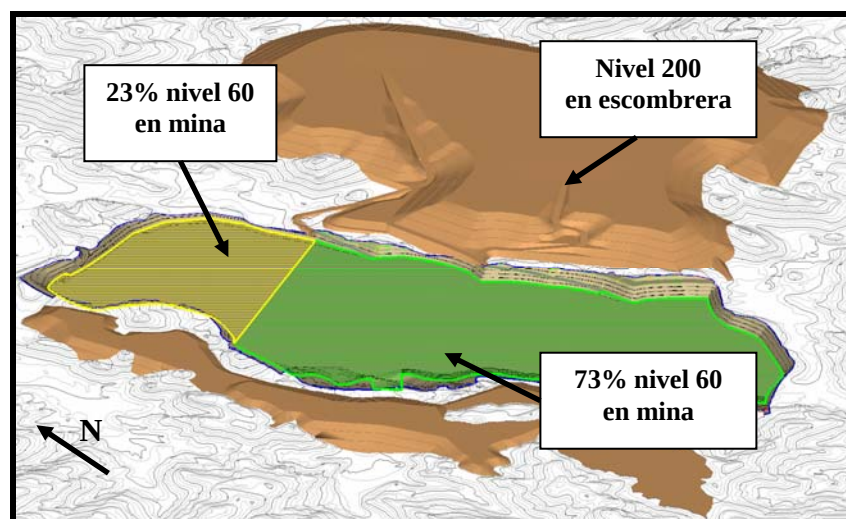


Fig. 52: Construcción de las vías de acceso y desarrollo del nivel 200 de la escombrera
Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de sintetizar el plan desarrollo de la escombrera Sureste, previamente presentado, a continuación en la tabla VI.11, se muestran la distribución del material estéril, especificando el nivel en la mina, el nivel en la escombrera correspondiente, además, de la longitud del perfil asociado y la productividad calculada individual de cada camión.

Tabla VI.11: Ritmo y distribución de descarga de estéril para la escombrera Sureste

Nivel de Carga	Nivel de descarga Escombrera SE	Perfil de acarreo promedio (m)	Productividad mcb/hora
150	100 - 120	3423	293
135	120	3221	306
120	120 - 140	3224	316
105	140 - 160	3205	300
90	160	3506	273
75	160 - 180	3346	273
60	200	3854	235

Fuente: Elaboración propia

6.3.2.3.- Escombrera Central

Con la culminación de la construcción de la escombrera Sureste, el desarrollo de la mina sólo habrá alcanzado el nivel 60. Por lo que para iniciar las labores de

vertido en el retrolleado (*backfill*), el piso del último explotable (40) de haber sido destapado, condición que sólo se alcanza a nivel 48 y 36 en el sector norte del área de explotación.

Por otro lado el volumen que en conjunto se tiene establecido, depositar en las escombreras Suroeste y Sureste asciende a 249,527 MMmcb, lo que representa el 53,1% del total evaluado (469,908 MMmcb). El volumen remante (220,378 MMmcb), representa el (46,9%), el cual es alto para ser depositado en la escombrera en cuestión. En tal sentido, es necesario habilitar otra área para el depósito de material estéril que solventa dicho escenario.

La mejor alternativa para la construcción de una escombrera externa, la constituye la Fosa Paso Diablo, la cual se encuentra ubicada a 1,6 km del centro de operaciones de CDG, con un diseño que contempla alcanzar el nivel 160, como condición final. La tabla VI.12, muestra las capacidades de dicha escombrera por niveles en metros cúbicos banco (mcb). Para conocer el equivalente del volumen en metros cúbicos banco a metros cúbicos suelto, sólo basta con multiplicar por el factor 1,3.

Tabla VI.12: Capacidad por niveles de la Escombrera Central

Nivel	Fosa	100	120	140	160	Total
	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb	MMmcb
mcb por nivel	4,461	4,380	9,423	9,971	9,704	37,939

Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se tiene previsto depositar en esta escombrera 12,918 MMmcb, el cual constituye el 27% del volumen restante proveniente del desarrollo a nivel 60 en la mina (sector norte), como lo indica en la figura 53.

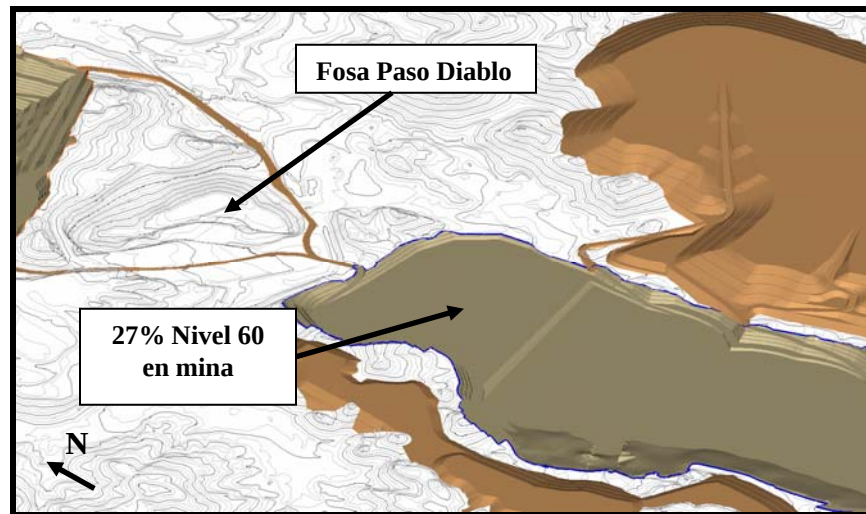


Fig.53: Bloque correspondiente al 27% del estéril a nivel 60 en la mina

Fuente: Elaboración propia

Con el depósito de dicho material en la fosa, se tiene previsto haber alcanzado el nivel 100 y 120 en la escombrera, como se muestra en la figura 54. Para conseguir el destape del piso del manto 4O, es necesario el desarrollo de los nivel 48 y 36 en el sector norte en un volumen cercano al 40% del total de ambos, es decir 24,838 MMmcb, con lo cual se consigue elevar la escombrera al nivel 140 y 160, como es mostrado en la figura 55, lo que constituye la totalidad de su capacidad.

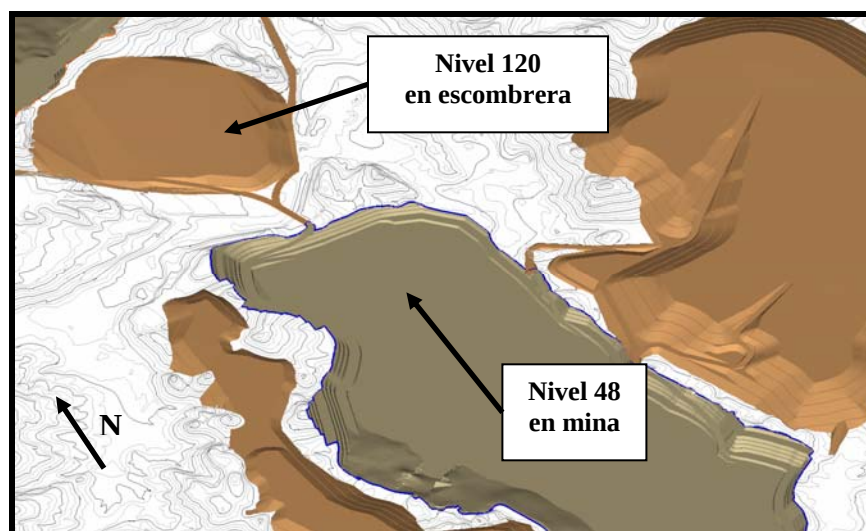


Fig. 54: Desarrollo de los niveles 100 y 120 de la Escombrera Central

Fuente: Elaboración propia

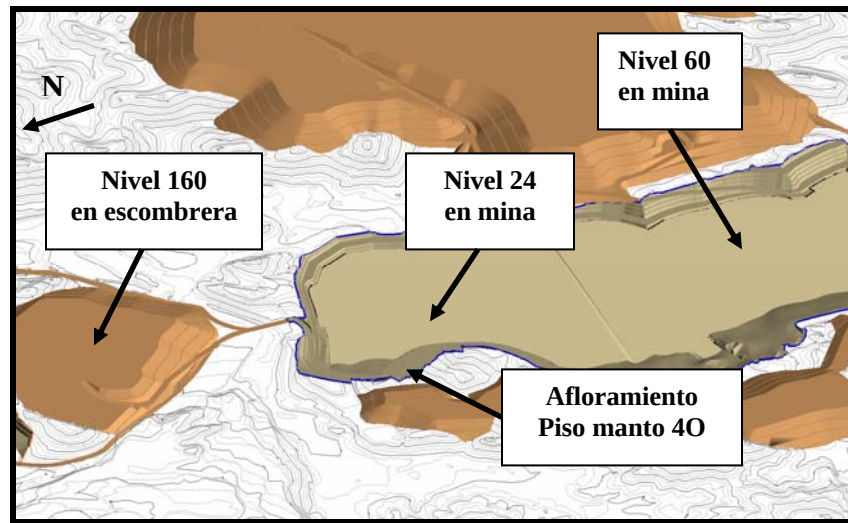


Fig. 55: Configuración final de la escombrera Central
Fuente: Elaboración propia

Finalizada el desarrollo de la Escombrera Central, la extensión de la misma será de 98 Ha y se habrá depositado en las escombreras externas 287,466 MMmcb, lo que representa el 61,2% del total. El material remanente, es decir 182,442 MMmcb (38,8%), se tiene previsto depositar en el retrolleado. La configuración final de las tres escombreras externas, es mostrada en la figura 56.

En la tabla VI.13, se muestra de forma sintetizada los niveles de carga en mina, niveles de vertido en la escombrera, perfiles de acarreo promedio asociados y las productividades individuales de los camiones.

Tabla VI.13: Ritmo y distribución de descarga de estéril para la escombrera Central

Nivel de Carga	Nivel de descarga Escombrera Central	Perfil de acarreo promedio (m)	Productividad mcb/hora
60	100 – 120	2512	351
48	120	2870	307
36	120 – 140	3145	277

Fuente: Elaboración propia

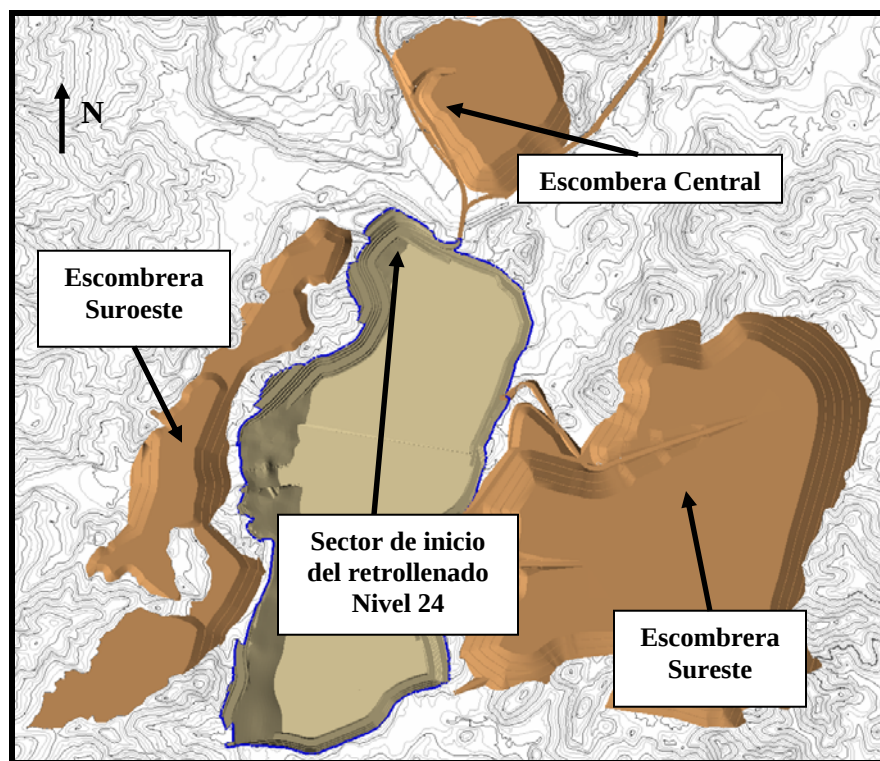


Fig. 56: Configuración final del sistema de escombreras externas del área Sur de la mina Paso Diablo
Fuente: Elaboración propia

6.4.- Sistema para el control de aguas superficiales

6.4.1.- Cunetas en las terrazas y base de las escombreras

6.4.1.1.-Parámetros geométricos de diseño

Se establece para el control de las aguas de escorrentía en las escombreras externas, a medida que estas incrementan sus dimensiones, un mecanismo que se fundamenta en la construcción de terrazas intermedias con pendientes hacia el pié del talud entre 1% y 2%. Debido a que el aporte de sedimentos hacia las terrazas por parte de las aguas que escurren a lo largo talud es considerable, se plantea la construcción de una cuneta de sección rectangular con relación profundidad-ancho igual a 1/2. Para determinar las dimensiones adecuadas, se considera una intensidad de lluvia de 8,42 mm/hora para una duración de 24 horas y un tiempo de retorno de

11 años, correspondiente a la estación Carichuano (ver figura 23). En función del diseño final de la escombrera Sureste, la cual es la de mayor extensión y capacidad, se considera la superficie de talud a drenar más amplia (0,37 km²).

Mediante la utilización de la ecuación racional, se calcula el caudal a drenar en 0,43 m³/seg, para un factor de escorrentía de 0,50 asociado a una superficie permeable, sin vegetación y para una pendiente de hasta el 50% (ver tabla IV.3). A través de la ecuación de continuidad considerando una velocidad máxima admisible para el canal de 1,5 m/seg, correspondiente a una pendiente de 2,5% (ver tabla IV.5), se determina un área de sección mínima de 0,29 m². En base a dichos resultados el ancho efectivo de la cuneta resultante es 0,8 m y una profundidad de 0,4m. Para facilitar las labores constructivas de la misma, se estable un ancho de 1m con una profundidad de 0,5m, como se muestra en la figura 57.

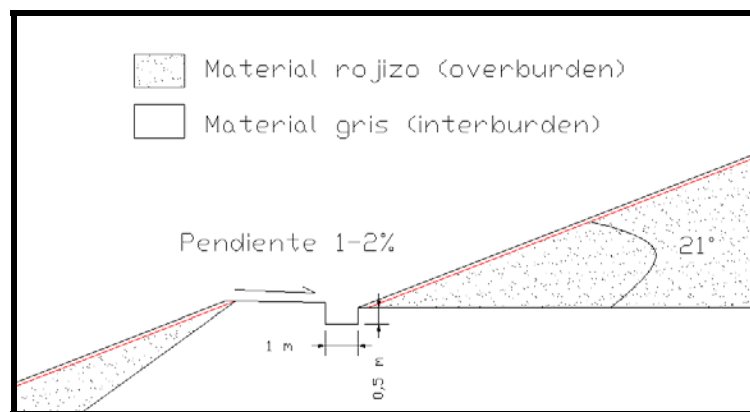


Fig.57: Cuneta para drenaje de aguas de escorrentía para las terrazas y base de las escombreras

Fuente: Elaboración propia

6.4.2.- Cunetas laterales en vías permanentes y temporales

6.4.2.1.- Estimación de los caudales de diseño

Las dimensiones de las canales colectores en las vías de acceso hacia las áreas de vertido, se fundamentan en los parámetros establecidos por la Gerencia de

Ingeniería de Mina de CDG y especificados en las figuras 29 y 30 correspondientes a vías en corte y relleno respectivamente. Las mismas deben poseer una pendiente de bombeo entre 1% y 2% hacia las bermas de seguridad, las cuales se construyen con ventanas para el drenaje final de las aguas hacia las cunetas de sección rectangular sin cobertura con 1,8m de ancho y 0,90 m de profundidad como se muestra en la figura 58, para una caudal máximo de $2,6 \text{ m}^3/\text{seg}$ determinado mediante la ecuación de Manning y de continuidad, a razón de una velocidad de las aguas de esorrentía de 1,5 m/seg correspondiente a mezcla de arcilla y pedrisco, para un coeficiente de rugosidad de 0,022 (ver tabla IV.5 y IV.6), pero considerando una pendiente máxima del 8%, para lo cual se garantiza que no habrá erosión en la base.

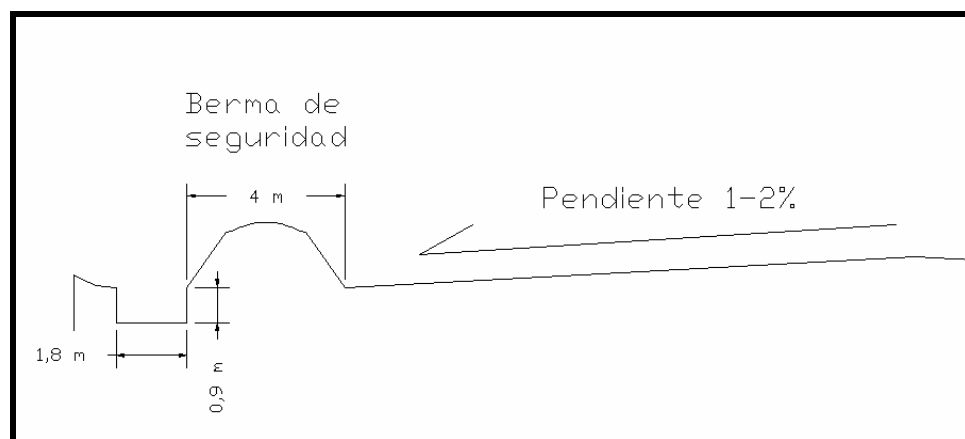


Fig. 58: Geometría de una cuneta lateral en una vía tipo

Fuente: Elaboración propia

6.4.3.- Cuencas de sedimentación

6.4.3.1.- Estimación de los caudales de diseño de los canales colectores

Para estimar los caudales de diseño, se considera una intensidad de lluvia de 8,42 mm/hora para una duración de 24 horas y un tiempo de retorno de 11 años (ver figura 23), correspondiente a la curva intensidad-frecuencia-duración de la estación Carichuano para dicho intervalo de recurrencia, cuyos registros son los más

representativos por su cercanía a las áreas de emplazamiento de las escombreras externas. Se determina que las superficies expuestas a precipitaciones por nivel, correspondientes a la escombrera Suroeste, Sureste y Central, son mostradas en las tablas VI.14, VI.15 y VI.16, respectivamente.

Tabla VI.14: Superficie por niveles de la escombrera Suroeste

Nivel	Superficie expuesta (km²)
120	2,74
140	2,76
160	2,76
180	2,78
Total	11,03

Fuente: Elaboración propia

Tabla VI.15: Superficie por niveles de la escombrera Sureste

Nivel	Superficie expuesta (km²)
100	7,82
120	7,85
140	7,83
160	7,81
180	7,80
200	7,81
Total	46,92

Fuente: Elaboración propia

Tabla VI.16: Superficie por niveles de la escombrera Central

Nivel	Superficie expuesta (km²)
100	1,47
120	1,48
140	1,48
160	1,48
Total	5,91

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las evaluaciones previamente expuestas, se estima el caudal que será drenado a través de los canales colectores, considerando un factor de escorrentía de 0,50 para una superficie permeable y sin vegetación (ver tabla IV.3) y la superficie total en cada escombrera mostradas en las tablas anteriores, mediante la utilización de

la ecuación racional. La tabla VI.17, muestra los caudales de aporte de las escombreras hacia sus respectivas cuencas de sedimentación.

Tabla VI.17: Caudales de aporte de las escombreras hacia las cuencas de sedimentación

Escombrera	Caudal calculado (m ³ /seg)
Suroeste	12,9
Sureste	54,9
Central	6,9

Fuente: Elaboración propia

Como medida para facilitar las operaciones constructivas de los canales, se establece una relación profundidad-ancho igual $2/3$ y una velocidad máxima admisible de 1,5 m/seg para una pendiente de 2,5% (ver tabla IV.5). Por medio de la ecuación de continuidad, se determina un área de sección efectiva de los canales de alimentación a las cuencas respectivas, cuyas dimensiones son mostrados en la tabla VI.18.

Tabla VI.18: Dimensiones de los canales colectores

Cuenca	Ancho (m)	Profundidad (m)
Suroeste	3,6	2,4
Sureste	7,4	4,9
Paso Central	2,6	1,8

Fuente: Elaboración propia

6.4.3.2.- Ubicación y dimensiones de las cuencas de sedimentación por escombrera

Se efectuó la determinación de las dimensiones de las cuencas, que garantizan las condiciones mínimas para que los sedimentos transportados por las aguas de escorrentía, provenientes de las distintas escombreras externas decanten en ellas y no de manera directa en los cuerpos de agua naturales. Para la estimación de las dimensiones de cada cuenca, se procede con la determinación de la velocidad de sedimentación (0,005 cm/seg), para una viscosidad cinemática en cm²/seg del agua de

0,0711 para una temperatura de 35° mediante extrapolación (ver tabla IV.7), correspondiente a partículas de arena fina de 0,02 mm (0,002 cm) (ver tabla IV.8) y densidad de 2,65 gr/cm³ para partículas de cuarzo, según Rodríguez y Ayala (1990).

Una vez determinada la velocidad de sedimentación, se determina la profundidad de las cuencas, multiplicando dicha velocidad y el tiempo de residencia de 24 horas considerado, para obtener finalmente una profundidad de 432 cm (4,3 m). Posteriormente, se procede con el cálculo del área de cada cuenca, dividiendo el caudal de entrada entre la velocidad de sedimentación previamente determinada. Los resultados de los cálculos, se muestran en la tabla VI.19.

Tabla VI.19: Dimensiones calculadas de las cuencas de sedimentación

Cuenca	Area (m ²)	Area (Ha)
Suroeste	257.979	25,8
Sureste	1.097.407	109,7

Fuente: Elaboración propia

En la figura 59, se muestra la cuenca correspondiente a la escombrera Suroeste, cuya extensión final alcanza las 25,5 Ha y una profundidad de 5m, lo que se traduce en una capacidad volumétrica de 992.000 m³.

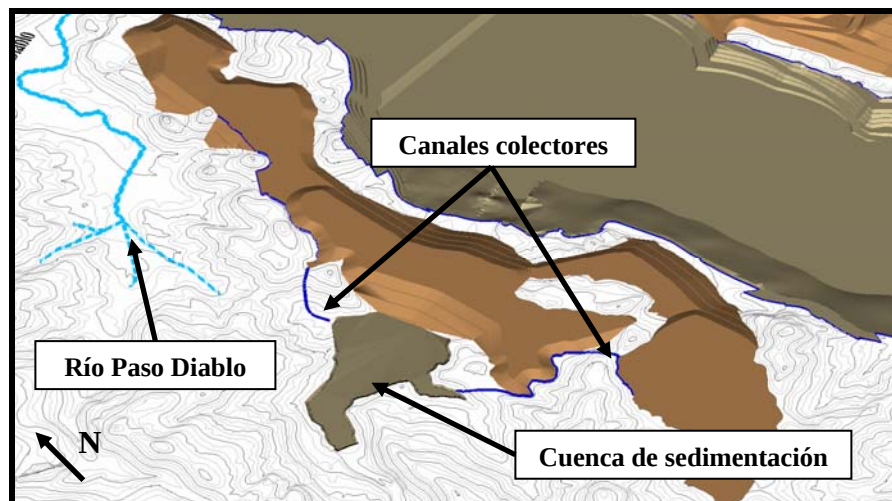


Fig.59: Cuenca de sedimentación de la Escombrera Suroeste

Fuente: Elaboración propia

Las labores constructivas de la escombrera procuran que las aguas drenen hacia el Oeste de ésta, con pendientes que no exceden el 2%, con lo que las aguas de escorrentías sean drenadas a través de los canales colectores.

Como consecuencia de las condiciones topográficas del área Sur de la mina Paso Diablo y la considerable dimensión de la escombrera Sureste, se ha optado por la construcción de tres cuencas de menor extensión y mayor profundidad, lo que compensa su capacidad volumétrica en función del caudal estimado a drenar. Una de estas tres cuencas se ubicará en la zona norte de la escombrera, con extensión de 2,9 Ha, profundidad de 5m y una capacidad de 18.540 m³. Tiene la función de captar las aguas de escorrentía provenientes de los canales establecidos en las vías de acceso a la escombrera y en las terrazas intermedias de ésta, como se muestra en la figura 60, para finalmente conectarse por medio de un canal colector, cuya dimensión es especificada en la tabla VI.18, para finalizar en otro canal se desemboca al Norte en el río Paso Diablo.

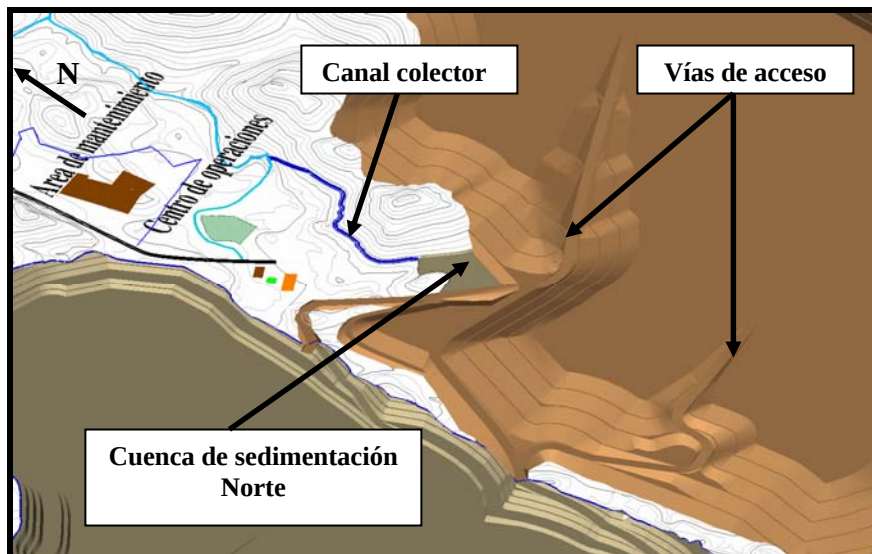


Fig. 60: Cuenca de sedimentación norte de la Escombrera Sureste

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, las otras dos cuencas de sedimentación se ubicarán en el extremo Este de la escombrera en cuestión, diseñadas sobre drenajes naturales que convergen hacia depresiones definidos por la topografía, como lo indica la figura 61. Estas recibirán las aguas provenientes de las áreas Noroeste y Sur drenadas a través de los canales colectores establecidos en las terrazas intermedias. Dichas cuencas poseen 15,3 Ha y 14,2 Ha, con una profundidad de hasta 30m, lo que se traduce en 1.301.000 m³ y 1.927.000 m³, respectivamente, las cuales son aceptables por la factibilidad de su construcción.

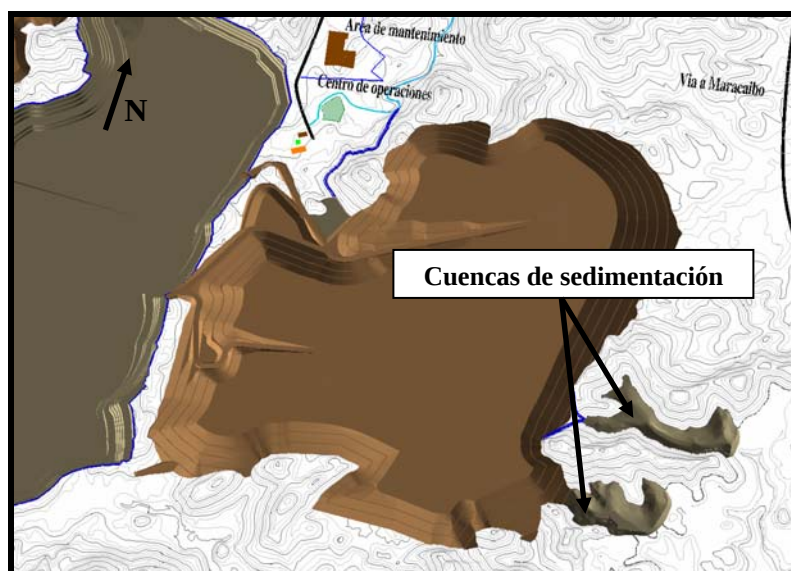


Figura 61: Cuencas de sedimentación localizadas en el extremo Este de la escombrera Sureste

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la Escombrera Central, no se tiene prevista la construcción de una cuenca de sedimentación, debido a la no disponibilidad de área adecuada. Por esta razón, se establece un canal colector para las aguas de escorrentía, el cual drenará el fluido a la fosa del área de Transición, localizada al Norte de dicha escombrera, como se muestra en la figura 62.

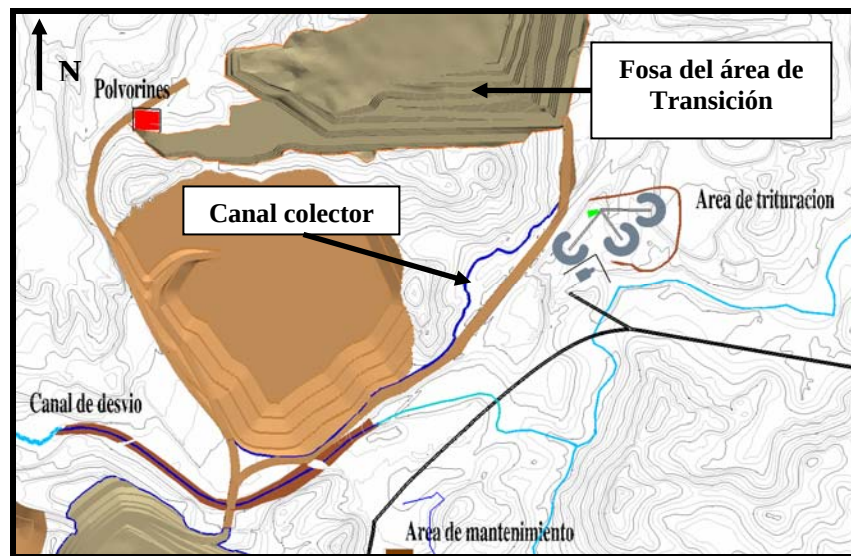


Fig. 62: Sistema de drenaje establecido para la escombrera Central
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VII
MEDIDAS DE CONTROL SOBRE LOS ESTÉRILES CARBONOSOS

A medida que las área de vertido de material estéril ha cesado en determinadas zonas en las escombreras externas, es necesario revertir el efecto causado con la deforestación de dichas áreas, destinadas al depósito de este material, mediante labores de reacondicionamiento de la superficie para proseguir con la ejecución de la actividades de reforestación.

Según Donaire Márquez (2000), el método que se seleccione para el tratamiento de los estériles carbonosos, obedece a los siguientes factores:

- Tipo de estéril a depositar en las escombreras.
- Tamaño y naturaleza de la escombrera.
- Localización.
- Proximidad a zonas pobladas.
- Disponibilidad de recurso para la extinción del fuego en caso de ignición.
- Maquinaria disponible

7.1.- Factores determinantes considerados en el método de tratamiento

Existen diversos factores a considerar en la selección del método de tratamiento para el material estéril carbonoso. En la mina Paso Diablo Sur el factor de mayor ponderación está enmarcado en la naturaleza de material estéril, de la cual se generarán tres tipos de materiales estériles: capa vegetal, estéril superficial (*overburden*) y estéril del subsuelo (*interburden*), de los cuales este último es el que posee capacidad de combustión de forma espontánea, como consecuencia de su alto contenido de partículas de carbón.

7.2.- Excavación y remoción de estériles en combustión

Por motivo de las características físico-químicas de los estériles que se generarán en la mina Paso Diablo Sur, además del alto poder calorífico del carbón, es importante que cuando se detecten puntos en combustión tanto en los frentes de extracción como en las escombreras, se adopten la estrategia más adecuada para el manejo de los mismos, la cual se fundamenta en la disminución del nivel térmico mediante la utilización de monitores hidráulicos, como se muestra en la figura 63. Posteriormente se procede con la remoción del estéril en combustión y su deposición en frentes de vertido en desarrollo, de manera que lo recubra, privándolo del oxígeno, mitigando así la combustión.



Fig. 63: Material estéril combustionado posterior a mitigación con monitor hidráulico

Fuente: Superintendencia de Ingeniería de CDG

7.3.- Recubrimiento de la superficie de escombrera

Dado que los factores necesarios para el inicio de la reacción de oxidación, es decir, la combustión del material lo son el oxígeno, el calor y el material a combustionar, se ejecuta el recubrimiento en las escombreras del material estéril del subsuelo (*interburden*) con material estéril superficial (*overburden*), el cual es inerte

debido a su condición de alto nivel de oxidación. De esta manera se priva al material combustionante del oxígeno necesario para el inicio de la reacción.

7.4.- Compactación superficial

Además de realizar el recubrimiento de los estériles carbonosos con material no reactivo, se ejecuta labores de compactación de manera indirecta por medio del tránsito de los camiones, producto de su peso tanto cargado como vacío. En la figura 64, se muestran los equipos de acarreo que son y serán utilizados en las labores constructivas de las escombreras.



Fig. 64: Equipos de acarreo disponibles

Fuente: Superintendencia de Ingeniería de CDG

7.5.- Evaluación del riesgo de combustión espontánea

En CDG, existen diversos mecanismos para evaluar el nivel de riesgo de combustión de los estériles, entre los más importantes se encuentran los indicadores de temperatura y de superficie.

7.5.1.- Indicadores de temperatura

Para la determinación e identificación de áreas en las cuales se presentan situaciones de autocombustión, las emanaciones de gases y de humo resulta la forma más sencilla para el diagnóstico, como se muestra en la figura 65. Efectuado la

identificación del punto o zona de ignición, se procede con la medición del nivel de temperatura por medio de dispositivos especiales para dicha función. Cuando la temperatura excede los 1000° C, se procede con la disminución de la temperatura mediante descarga con agua con monitores o aspersores, remoción del material y su deposición en fosas diseñadas para este fin. En el caso de que el nivel de temperatura no exceda dicho valor, se ejecuta sólo la mitigación por medio de descargas con agua.



Fig. 65: Material estéril en estado de combustión espontánea

Fuente: Superintendencia de Ingeniería de CDG

7.5.2.-. Indicadores de superficie

Otro de los indicadores para la evaluación del nivel de riesgo de combustión espontánea, lo constituye la presencia de material estéril carbonoso en taludes finales, como se muestra en la figura 66. Dicha condición representa una condición de alta probabilidad de ocurrencia para la ignición, por lo que amerita su remoción hacia el pie del talud y su posterior recubriendo con material estéril superficial.



Fig. 66: Exposición de estéril carbonoso en taludes finales
Fuente: Superintendencia de Ingeniería de CDG

CAPÍTULO VIII
PLAN DE RESTAURACIÓN Y REFORESTACIÓN

8.1.-Especies arbóreas seleccionadas

Para la recuperación de las áreas ocupadas para las actividades extractivas del carbón, se considera la reinserción de las especies arbóreas características de dichas áreas como se muestra en la tabla V.1 del capítulo V de esta investigación. Además, se emplean un conjunto de gramíneas, las cuales son mostradas en la tabla VIII.1

Tabla VIII.1

Nombre Común	Nombre científico
Pasto bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>
Pasto bracharia	<i>Brachiaria</i> sp.
Capin melao	<i>Melinis minutiflora</i>
Pasto estrella	<i>Cynodon nenfluensys</i>
Kudzu trópical	<i>Pueraria phaseloides</i>

Fuente: Coordinación de gestión ambiental de CDG (2008)

8.2.-Método de recuperación de las áreas para reforestación

8.2.1.- Densidad de siembra

Se establece una densidad de siembra de 205 árboles por hectárea, a razón de 7m de separación entre plantas, mediante cuadrículas en zonas de terrazas o llanas, como se muestra en la figura 67, mientras que en los taludes se sembrarán de forma aleatoria semillas de diversas especies de leguminosas y gramíneas de rápido crecimiento (leucena, clavenilla, kudzu trópical, brachiaria, bermuda, pasto estrella entre otras).

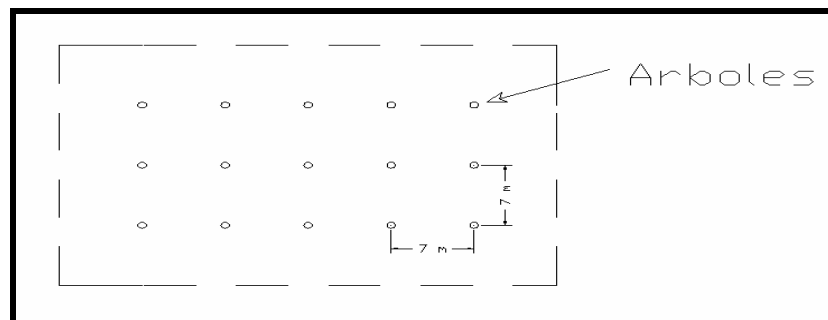


Fig. 67: Patrón de siembra de árboles

Fuente: Coordinación de gestión ambiental de CDG (2008)

8.2.2.- Conformación y acondicionamiento del terreno

El plan de recuperación se ejecutará en base a la configuración del terreno, una vez haya concluido las actividades de vertido en las escombreras, para posteriormente iniciar el proceso de recuperación que permita el establecimiento y desarrollo de diferentes especies vegetales.

8.2.3.- Estabilización de taludes

En todas las escombreras externas consideradas para el área de mina Sur, se establecen taludes finales de 21° inclinación (2,5 H:1 V), mediante la utilización de tractores, posterior a los 36° de inclinación que obtienen los mismos correspondientes al ángulo de fricción del material durante las labores de vertido. Dicha configuración permite la maximización de las capacidades de recepción de material estéril y facilita las actividades de reforestación. Para la escombrera interna (retrollenado), no se tiene considerado efectuar disminución de los ángulos de los taludes debido a que su geometría y condiciones de estabilidad lo impiden, por lo que las labores de reforestación deben hacerse sobre los taludes con el ángulo de 36°, característico del material estéril.

8.2.4.- Recuperación de terrazas y bermas

Una vez alcanzada la conformación final de los taludes, las terrazas y las bermas, se procederá con el vertido del material que servirá de soporte a las especies arbóreas (capa vegetal), el cual deberá ser extendido sobre la superficie con un espesor de al menos 30 cm.

8.3.- Medidas biológicas de conservación de suelos

8.3.1.- Marcación y apertura de hoyos en las terrazas

La marcación de los puntos de siembra se realizará mediante estacas con la colaboración del personal de topografía, procediendo con el trazado de las líneas paralelas.

Los hoyos se harán de 1m de diámetro por 0,9m de profundidad, como se muestra en la figura 68, teniendo muy en cuenta la separación de la capa superior del suelo que se utilizará como relleno y su mezcla con el abono orgánico y el fertilizante.

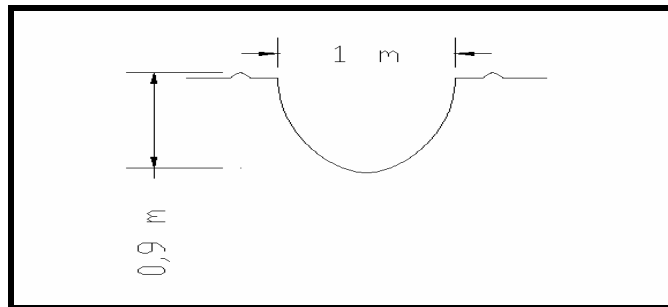


Fig. 68: Dimensiones de los hoyos para la siembra de los árboles
Fuente: Coordinación de gestión ambiental de CDG (2008)

8.3.2.- Plantación y construcción de los platones

Realizada la plantación, se deberá construir platos en cada una de las plantas que se establezcan; a estos se le brindará mantenimiento periódico cada cuatro meses mediante una fertilización a razón de 150 a 200 gramos de fertilizante por planta.

8.3.3.- Colocación de tutores

Para garantizar la protección de cada planta de las incidencias del viento, se colocará una vara de madera de aproximadamente 2m de longitud, elaborada con especies resistentes a los agentes patógenos del suelo.

8.4.- Medidas técnicas silviculturales

8.4.1.- Reposición del material muerto

Durante los primeros tres meses, después de realizada la plantación, se realizarán inspecciones periódicas para determinar el número de plantas que deben ser sustituidas por otras de igual especie, debidos a razones de mortalidad.

8.4.2.- Control fitosanitario de la plantación

Mediante las inspecciones periódicas de las áreas reforestadas, se determina la existencia o no de plantas afectadas por plagas y enfermedades, en caso de observarse dichas afecciones, deben ser rociadas con pesticidas específicos.

Para proporcionarle a la planta resistencia hasta la estabilización de la plantación, se realizan las siguientes actividades:

- Mantenimiento de los platones
- Control de malezas
- Suministro de fertilizantes
- Podas anuales.

8.4.3.- Fertilización

Se debe aplicar al menos dos veces al año, preferiblemente al comienzo de las precipitaciones, consistiendo dicha práctica en la limpieza del platón y su reacondicionamiento para mezclar parte de la capa superficial del suelo con el fertilizante a ser aplicado, empleando de éste una porción de 150 a 200 gramos por planta. Esta práctica se realizará con la finalidad de proveer al vegetal de nutrientes durante su período inicial de crecimiento, con la posible extensión de esta actividad hasta 3 años, posterior a la plantación.

8.4.4.- Riego

El proceso de plantación es recomendable realizarlo poco antes del inicio del período de lluvias, lo que garantiza un menor tiempo de evaporación y máxima humedad relativa; la mayoría de las plantas, requieren de abundante riego durante los primeros meses de siembra, por lo que debe establecerse un cronograma para la ejecución de esta actividad de forma periódica (2 o 3 veces por semana), es decir, se realizaran riegos interdiarios a todas las especies vegetales, plantadas en las diferentes áreas recuperadas a excepción de la temporada de lluvias.

CAPÍTULO IX
ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1.- Área Sur de la mina Paso Diablo

En función de los resultados obtenidos, en cuanto a los aspectos más resaltantes sobre las características que posee esta área para el desarrollo de un sistema de escombreras asociado a la actividad extractiva del carbón, se procede con el análisis de los mismos. Dicha zona se caracteriza por tener un horizonte de capa vegetal que se encuentra en el orden al metro de espesor, por debajo de éste se presenta un suelo residual de color rojizo cuyo espesor oscila entre dos y tres metros, el cual representa el resultado de la meteorización de la roca combustionada que le confiere esa coloración. Posterior al mencionado horizonte, se encuentra el sustrato rocoso, en el cual se observan de forma macroscópica dos tipos de roca: roca superficial (*overburden*) y roca del subsuelo (*interburden*). La diferencias entre ambos litotipos, se enmarca en la coloración, asociado al nivel de oxidación producto de la ignición espontánea del carbón y de la acción de los agentes meteorizantes. La roca superficial, la cual presenta el mayor grado de meteorización y oxidación como consecuencia del medio oxidante en el que se encuentra, posee un color rojizo; por su parte la roca del subsuelo, se caracteriza por su color gris oscuro que le confiere su alto contenido de intercalaciones de carbón no combustionado.

Desde el punto de vista petrográfico, las estructuras petrológicas que componen el sustrato rocoso característico del área Sur de la mina Paso Diablo, de acuerdo a los resultados obtenidos de las muestras analizadas. Se determinó la existencia predominante de minerales de cuarzo, feldespatos: plagiosclasas y ortosa, minerales accesorios como la moscovita, una matriz con cementación de óxido de hierro.

Por otro lado la composición litológica del sustrato, se compone principalmente por arenisca, lutita y limolita, con la presencia de estructuras con intercalaciones de arenisca y lutitas de forma predominante. También se determina la presencia materia orgánica y carbonática, con concentración que llegan alcanzar un 5% y 18%, respectivamente.

Para la evaluación de problemas de asentamientos por parte del sustrato rocoso, a medida que la carga litoestática aumenta con el desarrollo de las distintas escombreras, llegando a ascender a un máximo de $14,8 \text{ kg/cm}^2$ correspondiente a las escombreras Suroeste y Central, para una densidad de material estéril compactado de $1,85 \text{ t/m}^3$ y cuatro niveles, como se tiene establecido en sus respectivos diseños. Por su parte en la escombrera Sureste, este valor alcanza la magnitud de $18,5 \text{ kg/cm}^2$, para cinco niveles, como se tiene planteado. En las figuras 69 y 70, se muestra la comparación entre la carga litoestática ejercida por las escombreras Suroeste, Central y Sureste, respectivamente, además, de los resultados de resistencia a compresión determinados mediante ensayo a carga puntual, mostrados en la tabla V.12.

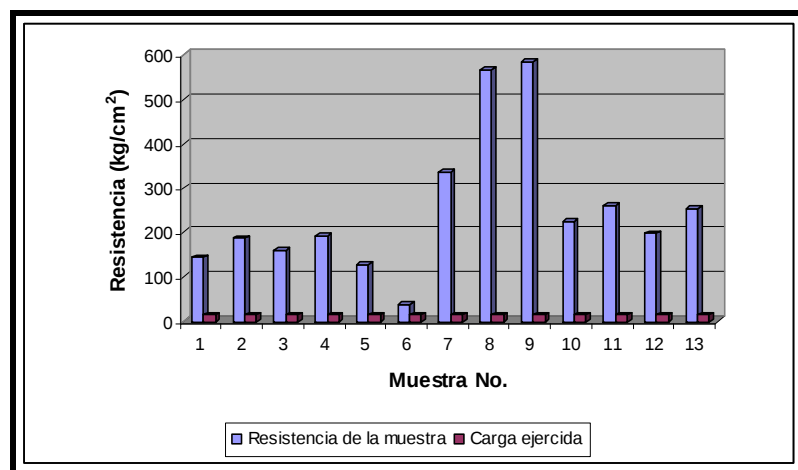


Fig.69: Comparación entre la resistencia a compresión de las muestras y la carga litoestática ejercida sobre la fundación por la escombrera Suroeste y Central
Fuente: Elaboración propia

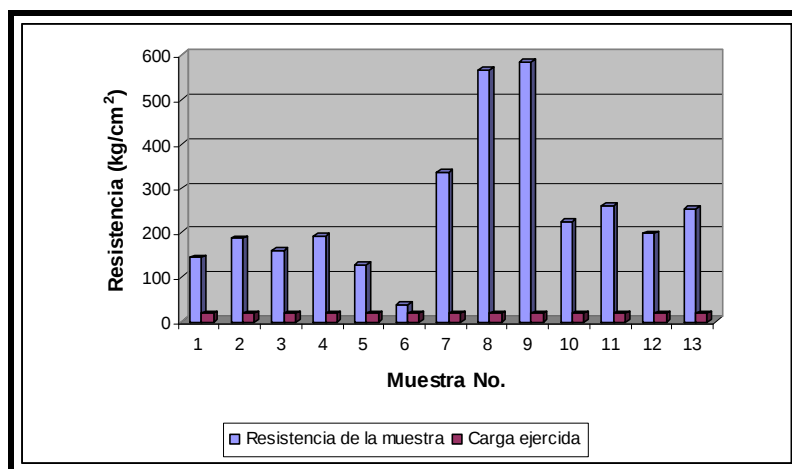


Fig. 70: Comparación entre la resistencia a compresión de las muestras y la carga litoestática ejercida sobre la fundación por la escombrera SE
Fuente: Elaboración propia

A través de los resultados comparativos mostrados en las figuras anteriores, se puede determinar fácilmente que las carga litoestáticas que han de ejercer las distintas escombreras sobre el sustrato rocoso, a medida que sean desarrolladas, se encuentran muy por debajo de la resistencia global del mismo, por lo que no deben presentarse problemas de asentamientos que incidan sobre la estabilidad de las mismas.

Las características actuales del sistema hidrológico, no promueven las condiciones necesarias para el desarrollo de las actividades extractivas del carbón en esta área, por lo que la modificación de éste, mediante el desvío de los ríos Carichuano y Tigre, hacia los ríos Paso Diablo y Norte, respectivamente, representa la alternativa más adecuada y factible.

9.2.- Régimen pluviométrico de la mina Paso Diablo

La mina Paso Diablo posee un régimen de lluvia definido por dos períodos en los cuales las precipitaciones son las más altas: un período comprendido entre agosto y noviembre, y otro entre los meses de abril y junio.

En función de los registros proporcionados por las estaciones meteorológicas consultadas, la lámina media mensual y anual de lluvia se encuentra en 80,1mm y 1056,9mm, las cuales poseen características homogéneas y uniforme, correspondiente a precipitaciones de tipo orográfica.

9.3.- Sistema de control de aguas superficiales

El sistema de control de aguas de escorrentía, establecido para el sistema de escombrera, se divide en tres subsistemas: canales colectores en las terrazas y bases de las escombreras, canales colectores en las vía de acceso principales y secundarias hacia éstas y cuencas para el control de sólidos.

Los canales colectores en las terrazas y bases de las escombreras, se dimensionaron en función de intensidades de lluvia para duraciones de veinticuatro horas e intervalos de recurrencia de once años, en función de los registros proporcionados por la estación Carichuano, correspondientes al período de 1988-1998, los cuales son representativos para el área Sur de la mina Paso Diablo, a pesar de no ser recientes. Estos canales poseen una relación profundidad-ancho de 1/2, para los que se considera la superficie más extensa para un talud de 0,37 km², medida en el nivel 140 de la escombrera Sureste, de manera de establecer un mismo diseño para las demás escombreras garantizando de esta manera la factibilidad operativa para su construcción.

Por su parte los canales previstos en las vías de acceso a las escombreras, poseen un diseño que obedece en mayor parte a las condiciones más exigentes bajo las cuales operan los equipos de acarreo (pendientes +/-8%), además de establecerse

dimensiones de 1,8m de ancho y 0,9m de profundidad, con las que se minimiza los efectos erosivos en la base de las estructuras por parte de las aguas esorrentía.

Como respuesta a las exigencias jurídicas de índole ambiental, tomadas en cuenta en el diseño del sistema de escombreras externas, se definió un mecanismo para el control de sedimentos. Este se fundamenta en cuatro cuencas de sedimentación: una en la escombrera Suroeste y tres para la Sureste, las cuales se dimensionaron en función de caudales correspondientes a intensidades de lluvia 8,42 mm/hora para duración de veinticuatro horas y un tiempo de retorno de once años, fundamentado en los registros pertenecientes a la estación Carichuano. Dichos caudales se manejan a través de una red de canales que drenarán sus aguas a las respectivas cuencas, cuyas dimensiones proponen una relación profundidad-ancho igual a 2/3.

Haciendo referencia a la escombrera Central, la cual no tiene contemplado la construcción de una cuenca para el manejo de sólidos, producto de la no disponibilidad de una zona aguas abajo que lo propiciara. Para la conducción de las aguas de esorrentía, sólo se contempla un canal que desembocará en la fosa del área de Transición, para lo que tiene previsto cesen las labores para cuando se inicie el desarrollo de la escombrera en cuestión.

Con la implementación del mencionado sistema para el control de sedimentos, se garantiza el cumplimiento de las premisas ambientales en la actividad extractiva del carbón, aspecto de suma importancia para la empresa operadora Carbones del Guasare S.A.

9.4.- Sistema de vías de acceso a las escombreras

El sistema de vías de acceso a las distintas escombreras, se fundamenta en las condiciones operativas bajo las cuales trabajan los equipos de acarreo, que serán utilizados durante el desarrollo de la mina Paso Diablo Sur, en las que se establecen anchos máximos de 35m, pendientes máximas de 8%, radios de curvatura mínimos de 33m y peraltes no mayores al 2,5%. Las vías propuestas dentro de los límites de mina para la comunicación de la zona de explotación con las distintas escombreras, se basan en la premisa de minimizar los volúmenes de relleno necesarios para alcanzar las características geométricas para su utilización, debido a que este material deberá posteriormente ser remanejado, lo se traduce en una carga operativa y de costo para las operaciones. Para el caso de las vías construidas mediante cortes, la condición fundamental, se enmarcó en la definición de alineamientos que no promuevan la afectación de los mantos de carbón.

Por otro lado el mecanismo mediante el cual se fundamentan las labores constructivas de las vías dentro de las áreas de emplazamientos de las escombreras, es la construcción de terraplenes que alcancen la tolerancia máxima para perfiles de acarreo que oscilen entre 3,2 y 3,9 km, para los cuales los niveles de productividad individual de los camiones son los mínimos aceptados.

9.5.- Parámetros de diseño y secuencia de desarrollo de las escombreras

Los parámetros geométricos establecidos en el diseño de las escombreras externas, corresponden a taludes de 20m de altura, con 21° de inclinación, anchos de terrazas de 4m y ángulo general de 20°. Esta geometría responde a las condiciones geológicas y operativas en las cuales se desarrollará la mina Paso Diablo Sur, que

persigue maximizar la capacidad de las mismas a la vez que se garantiza que los niveles de descarga favorezcan las operaciones extractivas del carbón.

Desde el punto de vista geotécnico, el análisis de estabilidad en las escombreras, se desglosó en tres casos: para un talud, para tres y cuatro niveles. Además de considerar las presiones sobre los taludes y escombreras asociadas a las aguas infiltradas retenidas.

Las características geomecánicas del material estéril, de acuerdo a la información recopilada en informes especializados, se determina que posee una cohesión nula cuando dicho material es depositado, adquiriendo un valor que alcanza un $0,5 \text{ t/m}^2$ a medida que experimenta el proceso de compactación debido al tránsito de los equipos de acarreo. Otro aspecto importante a tomar en cuenta, es que el estéril tipo de la mina Paso Diablo tiene un alto grado de permeabilidad debido a su heterogeneidad granulométrica que favorece la condición drenada de las escombreras y el nivel de estabilidad para una determinada geometría.

Los resultados del análisis determinaron que el factor de seguridad correspondiente a un talud es de 2,984, considerando un nivel piezométrico del 30% de la altura del mismo. Este valor indica que el nivel estabilidad es altamente favorable para esa geometría en función de las características intrínsecas de los estériles.

Por su parte en el análisis que corresponde a los dos últimos casos, el valor del indicador nivel de seguridad se ubica en 2,309 y 2,272 lo que establece que las condiciones de estabilidad están garantizadas para esa geometría, complementado a su vez con un efectivo sistema para el control aguas de escorrentía.

En cuanto a la secuencia de desarrollo de las escombreras, el plan contempla depositar el material que se generará de la mina en los niveles 240 hasta 165 con una parte del 150 en la escombrera Suroeste, el correspondiente a los niveles 150 hasta el 75, más un 73% del nivel 60 en la escombrera Sureste, el remanente 27% del nivel 60, junto al 40% de los niveles 48 y 36, se depositará en la escombrera Central. Finalmente el material restante de los niveles 48 y 36, hasta alcanzar el límite del piso del último manto explotable (4O) a nivel -132, se vertirá en el retrolleado.

9.6.- Condiciones finales de las escombreras

El desarrollo de las labores extractivas del carbón en la mina Paso Diablo Sur, tiene previsto generar 469,908 MMmcb, correspondientes a 610,880 MMm³ suelto, de los cuales el 6,6% estará destinado para la construcción de la escombrera Suroeste. Este depósito está limitado en cuanto a sus dimensiones y capacidad debido a las restricciones topográficas e hidrológicas existentes al Oeste del lugar de emplazamiento destinado para su construcción, lo que le confiere su forma alargada, por lo que su capacidad final asciende a 30,969 MMmcb (40,260 MMm³ suelto), alcanzando una altura máxima de 80m (nivel 120 a 180).

La escombrera Sureste tiene previsto recibir el 45,8% del material asociado a la explotación, es decir, 218,558 MMmcb (284,125 MMm³ suelto), por lo que su geometría contempla una altura de 100 m, medido desde el nivel 100 al 200.

La escombrera Central propone un atenuante de suma importante, por constituir una alternativa que garantiza la disminución de forma considerable en el volumen de estériles que se destine a la escombrera interna y las condiciones para el inicio de su desarrollo, en vista de que su capacidad es menguada por estar apoyada en una base

inclinada. Dicha escombrera tiene previsto alcanzar una altura máxima de 80m, desde el nivel 100 al 160, y recibir el 8,8% del total, que se traduce en 37,939 MMmcb (49,321 MMm³).

CAPÍTULO X
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1.- Conclusiones

El área Sur de la mina Paso Diablo posee un conjunto de características y condiciones geológicas, topográfica e hidrológicas actuales, que no propician la factibilidad operativa para el desarrollo de las labores extractivas del carbón, mediante el método de tajo abierto (*open pit*).

De acuerdo a los resultados obtenidos, los puntos concluyentes son los siguientes:

- El proyecto contempla el desarrollo de un sistema de escombreras externas: escombrera Suroeste, Sureste y Central, del cual el 61,2% (287,466 MMmcb) del material estéril proveniente de la mina será distribuido en estos depósitos, las cuales se construirán mediante el método de fases ascendentes superpuestas. El remanente 38,8% (182,446 MMmcb), está previsto ser colocado en la escombrera interna (retrollenado).
- Los parámetros de diseño del sistema de escombrera cumple con los requerimientos de factibilidad operativa y niveles de estabilidad respaldados en factores de seguridad superior a las dos unidades.
- Las dimensiones de las escombreras están restringidas en gran medida por las longitudes de los perfiles de acarreo, las cuales no deben sobrepasar los 3,8-3,9 kms que mantuviesen valores de productividad que garantizaran la recuperación del mineral de acuerdo a los lineamientos establecidos en los planes de mina, los cuales obedecen a exigencias de índole financiero.
- Los mecanismo para control de sedimentos y el plan de recuperación y reforestación, se encuentra adaptado a la naturaleza de los lugares de

emplazamientos, las características propias del material estéril y las normativas ambientales que regirán actividad las labores extractivas en el área Sur de la mina Paso Diablo, de manera de minimizar los efectos que la hará lo más sustentablemente posible.

10.2.- Recomendaciones

En el desarrollo de este trabajo de investigación, se determinaron algunos aspectos importantes que pueden contribuir en el adecuado desarrollo de las labores en la mina Paso Diablo Sur, una vez se de inicio a las mismas:

- Antes de iniciar el vertido del material estéril en las áreas previstas, debe garantizarse la remoción completa de materia orgánica (troncos) que puedan propiciar condiciones de deslizamiento en la base de las escombreras, sobre todo en la Suroeste, en donde el lugar dispuesto para su construcción presenta laderas y drenajes de pendientes muy pronunciadas.
- La modificación del sistema hidrológico mediante el desvío de los ríos Carichuano y Tigre hacia los ríos Paso Diablo y Norte, respectivamente, permitirá solventar el aspecto restrictivo asociado a la convergencia de dichos cuerpos de aguas hacia la zona prevista para la explotación.
- La programación a mediano y corto plazo de las labores de desarrollo de las escombreras en las áreas establecidas para tal fin, deben enmarcarse en la construcción de terraplenes que definan diversas alternativas para el vertido, de manera que varíen en la longitud los perfiles de acarreo, en función de las disponibilidades y utilizaciones de la flota de camiones.

- Efectuar de forma periódica la actualización de las vías por medio de levantamiento topográfico, con la finalidad de identificar en los puntos o tramos, según sea el caso, los factores que propicien retardos en los ciclos de acarreo, de manera de minimizar su incidencia en los niveles de productividad global de los equipos utilizados (palas y camiones).
- Realizar análisis regular de calidad de aguas mediante muestreos en las cuencas de sedimentación de manera garantizar con ello que las aguas provenientes de las mismas cumplan con los niveles de composición química establecidos en las normativas ambientales

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYALA CARCEDO, Francisco Javier y Fernández Vadillo, Lucas (1999) Manual de restauración de terrenos y evaluación de impacto ambiental en minería, 4ta ed. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España. 330 pag.

DONAIRE MÁRQUEZ, Manuel J (2000) Guía para el diseño y construcción de escombreras, 1ra ed. Madrid, España: Junta de Andalucía. 296 pag.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis (2002) Ingeniería Geológica, 1ra ed. Madrid, España. 715 pag.

INICIATIVA MEXICANA DE APRENDIZAJE PARA LA CONSERVACIÓN (2000) Cuencas hidrográficas. Disponible: www.imacmexico.org [Consulta: 2008, Febrero 20]

LÓPEZ M, Victor y Salsamendi, Mirem Koro (1976) El carbón mineral, 1ra ed. Caraca: Ministerio de Energía y Minas. 175 p.

CARCIENTE, Jacob (1980) Carreteras: Estudio y proyecto, 2da ed. Madrid, España. 589 p.

BOLETÍN CLIMATOLÓGICO (1995-2006). Ministerio del Ambiente y los recursos naturales M.A.R.N. Departamento de Hidrología y Meteorología. Región-Zulia.

SÁNCHEZ, Luis (1995) Drenaje mina a cielo abierto. Publicación “Aspectos geológicos de Protección ambiental”, Volumen I. Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para la América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay.

RENTAL AGRONÓMICA RENTAGRO (2005). Estudio sobre microcuencas de los ríos Paso Diablo, Carichuano y Baqueta. Universidad del Zulia

GOLDER ASOCIATES (1997). Informe de propuesta de diseño de escombreras externas, en la Mina Paso Diablo.

ANEXOS