

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**PLAN DE ADECUACIÓN DE ESCOMBRERA EN CANTERAS
TACARIGUA, C.A. SECTOR MAR AZUL, CARRETERA
NACIONAL GAÑANGO-PATANEMO, MUNICIPIO PUERTO
CABELLO, ESTADO CARABOBO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Alarcón N. Adrián A.,
Para optar al Título de Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PLAN DE ADECUACIÓN DE ESCOMBRERA EN CANTERAS TACARIGUA, C.A. SECTOR MAR AZUL, CARRETERA NACIONAL GAÑANGO-PATANEMO, MUNICIPIO PUERTO CABELLO, ESTADO CARABOBO

TUTORA ACADÉMICA: Profa. Aurora Piña

COTUTORA ACADÉMICA: Profa. Sasha Cazal

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Cristian Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Alarcón N. Adrián A.,
Para optar al Título de Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre 2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Ilustre Universidad Central de Venezuela por la calidad educativa que recibí en sus instalaciones durante mi tiempo de formación, a sus docentes y personal en general con quienes alguna vez entre en contacto, mil gracias por su contribución.

Al Ing. Cristian Sánchez, jefe de operaciones de Canteras Tacarigua, C.A., quien más que un tutor industrial fue un amigo y mentor que me guió, brindándome desinteresadamente algunos de sus vastos conocimientos, para contribuir a formarme no solamente un mejor perfil dentro de mi carrera sino como ser humano.

A las Profesoras Aurora Piña y Sasha Cazal, quienes en su papel de tutoras académicas, invirtieron gran parte de su tiempo en la revisión de este trabajo, aportando de sus valiosos conocimientos para que estuviese en condiciones ideales para ser presentado.

A la empresa Canteras Tacarigua, C.A., por permitirme realizar mi Trabajo Especial de Grado en sus instalaciones brindándome para ello todo su apoyo y paciencia. A su personal formado por el Ing. Leonidas Burgazzi, Lic. Danymar Becerra, Sr. Pedro Goncalves y Sr. Orlando Hernández, al departamento de operaciones, departamento de mecánica, departamento de recursos humanos, departamento de ventas y demás trabajadores por todo el apoyo prestado, orientaciones y atenciones.

A la Profa. Katherine Silva por su apoyo, amistad desinteresada e incondicional ante cualquier adversidad durante todo mi tiempo de permanencia en la universidad, un honor haber sido su preparador, eternamente agradecido y en deuda por sus consejos.

A la Gobernación del estado Carabobo, quienes a través de la Secretaría de Ordenación del Territorio, Ambiente y Recursos Naturales prestaron su apoyo.

A mis amigos, gracias por su tiempo, sus ayudas, sus palabras. Rezo porque en el futuro en mi camino haya más gente como ustedes.

A todos mis familiares, quienes sin saberlo y a la distancia siempre estuvieron presentes alentándome en cada paso durante todas las etapas de mi vida estando permanentemente pendiente de mi bienestar, gracias a todos por su comprensión y su cariño.

A mi padre, Juan Alarcón, quien aunque solo en los recuerdos de quienes lo mencionan vive, lo siento presente en cada momento de mi vida a pesar de que físicamente no pueda verle. Gracias.

A mi madre, Sandra Núñez, quien desde antes de mi nacimiento colocó mi vida siempre por delante de la suya, tomó mis necesidades como prioridades por delante de las propias y porque sin ella esta meta hubiese sido imposible. Todo en lo que he obrado mal es de mi autoría, lo bien obrado es de ella. Gracias por tu amor madre.

Finalmente a Dios y a todas aquellas personas que de una u otra forma son parte de este triunfo.

A TODOS MIS ETERNOS AGRADECIMIENTOS.

Alarcón N., Adrián A.

**PLAN DE ADECUACIÓN DE ESCOMBRERA EN CANTERAS
TACARIGUA, C.A. SECTOR MAR AZUL, CARRETERA
NACIONAL GAÑANGO-PATANEMO, MUNICIPIO PUERTO
CABELLO, ESTADO CARABOBO**

**Tutora Académica: Profa. Aurora Piña. Cotutora Académica: Profa. Sasha
Cazal. Tutor Industrial: Ing. Cristian Sánchez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Año 2015, 155 p.**

Palabras Claves: Escombrera, Canteras Tacarigua-Carabobo (Estado), Estabilidad de taludes, Macizo rocoso.

Resumen. El presente trabajo de investigación tiene por objeto el diseño y planificación de adecuación de una escombrera, la cual está ubicada en la cantera Tacarigua, Puerto Cabello-estado Carabobo. La mencionada empresa tiene en su zona concesionada un área ubicada hacia el Suroeste de la delimitación legal en la cual se desarrollan labores artesanales en esquisto con fines ornamentales, generando consigo una gran cantidad de residuos los cuales no son controlados bajo ningún criterio técnico, situación que con el transcurrir del tiempo, ha generado una condición peligrosa por la inestabilidad que presentan las pilas de desperdicio minero en dicha área, además, un impacto visual contrastante con la topografía.

Las consecuencias que podrían presentarse a mediano-corto plazo como resultado de no haber planificado la adecuación en la escombrera son de carácter crítico, debido que con el ritmo creciente y desproporcionado de las pilas de bote libre, se corre el riesgo de un deslizamiento, el cual pudiese costar horas máquina excesivas en la recuperación de los espacios afectados o inclusive vidas de trabajadores.

La mayoría de los datos se adquirieron a través de trabajo de campo, ensayos de laboratorio y observación en la zona de bote, siendo el área donde yace la escombrera un afloramiento de esquistos sin interés económico relevante para la empresa y estable según se infiere de la Clasificación Geomecánica de Romana realizada donde alcanza una puntuación de 62,5; mientras que los ensayos ejecutados, fueron dirigidos a estudiar las características del material considerado como estéril. Presenta además factores de seguridad según el método de Bishop simplificado de 2,174, según el método de Mogenstern-Price de 2,032 y Jambu simplificado de 2,032 para la configuración establecida de 2 bancos de 20 metros de altura cada uno, apreciándose finalmente que el material estéril presenta características físicas interesantes para ser considerado como un posible agregado para construcción.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I	13
GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.1 Planteamiento del problema.....	13
1.2 Objetivos de la investigación	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificación de la investigación	14
1.4 Alcance y limitaciones	15
CAPÍTULO II.....	17
ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA	17
2.1 Reseña histórica	17
2.2 Visión.....	18
2.3 Misión	19
2.4 Valores	19
2.5 Organigrama	19
2.6 Ciclo productivo.....	20
CAPÍTULO III.....	25
MARCO TEÓRICO.....	25
3.1 Antecedentes generales	25
3.2 Bases teóricas de la investigación.....	26
3.2.1 Conceptos básicos.....	26
3.2.2 Descripción de macizos rocosos	27
3.2.3 Generalidades de escombreras	37

3.2.4	Caracterización geomecánica para uso del estéril.....	52
3.2.5	Caracterización geomecánica para diseño de la escombrera	59
3.2.6	Características climáticas y diseño de drenaje	63
3.3	Generalidades de la ubicación.....	66
3.3.1	Características climáticas	66
3.3.2	Topografía.....	68
3.3.3	Geología.....	69
3.3.4	Productividad y equipos mineros	75
CAPÍTULO IV.....		80
MARCO METODOLÓGICO.....		80
4.1	Tipo de investigación	80
4.2	Diseño de la investigación	80
4.3	Técnicas e instrumentos	80
4.4	Análisis de datos	81
4.5	Procedimiento experimental	83
4.6	Cronograma de actividades.....	86
4.7	Presentación y análisis de los resultados.....	87
4.7.1	Análisis del emplazamiento	87
4.7.2	Análisis del estéril.....	102
4.7.3	Adecuación de escombrera	115
4.7.4	Recuperación y paisajismo.....	126
CAPÍTULO V.....		130
PROPUESTA DE EJECUCIÓN EN LA ADECUACIÓN DE LA ESOMBRERA.....		130
5.1	Propuesta de metodología de adecuación	130
5.2	Reflexiones finales.....	134
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		136
REFERENCIAS CONSULTADAS		139
ANEXO I.....		143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: “Localización relativa de la empresa Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).....	18
Figura 2: “Organigrama Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).	20
Figura 3: “Esquema productivo Canteras Tacarigua”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).	23
Figura 4: “Origen del residuo de lajas (estéril)”	24
Figura 5: “Representación rotura planar”. Tomado de González (2002).....	29
Figura 6: “Representación rotura tipo cuña”. Tomado de González (2002).	30
Figura 7: “Representación rotura por volcamiento”. Tomado de González (2002).....	31
Figura 8: “Esquema de vertido libre”. Tomado de Actis (2008).	39
Figura 9: “Esquema de vertido por fases adosadas”. Tomado de Actis (2008).	39
Figura 10: “Esquema de dique de retención en pie”. Tomado de Actis (2008).	40
Figura 11: “Esquema de fases ascendentes superpuestas”. Tomado de Actis (2008).....	41
Figura 12: “Esquema de círculo superficial de pie”. Modificado de Bañón (2000).	43
Figura 13: “Esquema de círculo profundo”. Modificado de Bañón (2000).	44
Figura 14: “Esquema de círculo profundo de pie”. Modificado de Bañón (2000).	44
Figura 15: “Cálculo de $Mi \alpha$ ”. Tomado de González (2002).	48
Figura 16: “Tambor de tamices”	53
Figura 17: “Proctor”	58
Figura 18: “Especificaciones exigidas para ensayos de fragmentos de forma irregular”. ASTM D5731 (2002).	62
Figura 21: “Precipitaciones estado Carabobo”. Tomado de INAMEH.	67
Figura 22: “Mapa Fase Antímano”. Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico.	69
Figura 23: “Dimensiones tractor CAT D8N”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).	77
Figura 24: “Dimensiones retroexcavadora CAT 330L”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).	78
Figura 25: “Dimensiones motoniveladora CAT 14G”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).	79
Figura 26: “Esquema metodológico”	84
Figura 27: “Cronograma”	86
Figura 28: “Procedimiento de análisis del emplazamiento”	87
Figura 29: “Contactos de la Unidad de Mármol”. Tomado de Gómez y Mayora (2006)	88
Figura 30: “Vista planta topografía actual”	90
Figura 31: “Vista en perspectiva Suroeste de la topografía actual”	91
Figura 32: “Vista actual área de botadero”	91
Figura 33: “Vista planta topografía modificado”	92
Figura 34: “Vista en perspectiva Suroeste de la topografía modificada”	93
Figura 35: “Área para determinación RQD”	94
Figura 36: “Determinación RQD”	94

Figura 37: “Muestras a ensayar”.....	95
Figura 38: “Levantamiento de discontinuidades”.....	97
Figura 39: “Representación general de discontinuidades en red de Wulf”.....	98
Figura 40: “Representación de discontinuidades en red de Wulf”.....	99
Figura 41: “Procedimiento de análisis del estéril”.....	102
Figura 42: “Gráfica de distribución granulométrica”.....	105
Figura 43: “Gráfica de curvas de compactación y saturación”.....	107
Figura 46: “Geometría para cálculo de factor de seguridad”.....	108
Figura 47: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Bishop simplificado”....	109
Figura 48: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Morgenstern-Price”.	110
Figura 49: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Jambu simplificado”....	111
Figura 50: “Análisis de estabilidad de escombrera con nivel freático (160 msnm)”.....	112
Figura 51: “Análisis de estabilidad de escombrera con sismo”.....	113
Figura 52: “Análisis de estabilidad de escombrera con sismo y nivel freático (160 msnm)”.....	113
Figura 53: “Procedimiento de adecuación de escombrera”.....	115
Figura 54: “ <i>Push dumping</i> ”. Tomado de Comité de escombreras de <i>British Columbia Mine Dump Committee</i> (1991).....	119
Figura 55: “Vista en perspectiva Norte-Sur de la topografía modificada”.....	121
Figura 56: “Sección de drenajes”.....	125
Figura 57: “Procedimiento de recuperación y paisajismo”.....	126
Figura 58: “Evaluación de factibilidad de escombreras”. Modificado de <i>British Columbia Mine Dump Committee</i> (1991).....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: “Criterios de diseño minero de Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).....	21
Tabla 2: “Calidad de roca según RQD”. Modificado de González (2002).	33
Tabla 3: “Clasificación <i>RMR</i> ”. Modificado de González (2002).....	34
Tabla 4: “Clasificación <i>RMR</i> ”. Modificado de González (2002).	35
Tabla 5: “Relación entre buzamientos para <i>SMR</i> ”. Modificado de Romana (2003).....	36
Tabla 6: “Método de excavación para <i>SMR</i> ”. Modificado de Romana (2003).	36
Tabla 7: “Clasificación <i>SMR</i> ”. Modificado de Romana (2003).....	37
Tabla 8: “Factores Desestabilizantes”. Modificado de González (2002).....	42
Tabla 9: “Tipos de Restauración Ambiental de Escombreras”. Modificado de COTUMAPTE La Rioja (2006).	51
Tabla 10: “Clasificación de materiales para subrasantes”. Modificado de Ruiz (1966).	56
Tabla 11: “Tipología de suelos S.U.C.S”. Modificado de Bañón (2000).	57
Tabla 12: “Características según S.U.C.S”. Modificado de Bañón (2000).....	57
Tabla 13: “Valor de <i>f</i> generalizado”. Modificado de ASTM D5731 (2002).....	62
Tabla 14: “Tabla de coeficientes de escorrentía”. Tomado de Aparicio (1996).	65
Tabla 15: “Tabla de coeficientes de rugosidad”. Modificado de Castillo (2003).	66
Tabla 16: “Pluviosidad máxima, Puerto Cabello”. Modificado de INAMEH.	68
Tabla 17: “Dimensiones tractor CAT D8N”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.).	77
Tabla 18: “Dimensiones retroexcavadora CAT D8N”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.) ..	78
Tabla 19: “Dimensiones motoniveladora CAT 14G”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.). ...	79
Tabla 20: “Relación esquema metodológico – objetivos específicos”.	84
Tabla 21: “Resultados ensayos de carga puntual”.	96
Tabla 22: “Relación carga puntual – compresión simple”.	96
Tabla 23: “Medidas de foliación”.	97
Tabla 24: “Medidas de diaclasas”.	98
Tabla 25: “Variables usadas en red estereográfica”.	99
Tabla 26: “Resultados clasificación de Bieniawski”.	101
Tabla 27: “Coeficientes para <i>SMR</i> ”.	101
Tabla 28: “Estabilidad según <i>SMR</i> ”.	101
Tabla 29: “Distribución granulométrica de la escombrera”.	104
Tabla 30: “Resultados ensayo de compactación”.	107
Tabla 34: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Bishop simplificado”.	110
Tabla 35: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Morgenstern-Price”.	110
Tabla 36: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Jambu simplificado”.	111

Tabla 37: “Relación de factores de seguridad”.....	114
Tabla 38: “Despacho lajas ornamentales 2013-2014”.....	116
Tabla 39: “Estimación generación de estériles 2015-2019”.....	117
Tabla 40: “Características escombrera”.....	117
Tabla 41: “Disponibilidad de equipos marzo-junio 2015. Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).	118
Tabla 42: “Distribución de volumen de estéril por terraza”.....	120
Tabla 43: “Capacidad hoja de tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”.....	121
Tabla 44: “Características CAT D8N y material estéril, Canteras Tacarigua, C.A.”.....	121
Tabla 45: “Resistencias al desplazamiento tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”..	122
Tabla 46: “Rendimiento tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”.....	122
Tabla 47: “Rendimiento retroexcavadora CAT 330L, Canteras Tacarigua, C.A.”.....	122
Tabla 48: “Horas máquina de trabajo en escombrera”.....	123
Tabla 49: “Estimación de caudal de cuencas”.....	124
Tabla 50: “Cálculo de drenajes”.....	125
Tabla 51: “Especies para revegetación”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).	127
Tabla 55: “Ensayo granulométrico 1”.....	143
Tabla 56: “Ensayo granulométrico 2”.....	144
Tabla 57: “Ensayo granulométrico 3”.....	145
Tabla 58: “Ensayo granulométrico 4”.....	146
Tabla 59: “Ensayo granulométrico 5”.....	147
Tabla 60: “Ensayo granulométrico 6”.....	148
Tabla 61: “Ensayo granulométrico 7”.....	149
Tabla 62: “Ensayo granulométrico 8”.....	150
Tabla 63: “Ensayo granulométrico 9”.....	151
Tabla 64: “Ensayo granulométrico 10”.....	152
Tabla 65: “Ensayo granulométrico 11”.....	153
Tabla 66: “Ensayo granulométrico 12”.....	154
Tabla 67: “Ensayo granulométrico 13”.....	155

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objetivo adecuar una escombrera que le permita a la empresa “Canteras Tacarigua, C.A.”, ubicada en el sector Mar Azul del municipio Gañango, estado Carabobo y a las cooperativas que laboran dentro de la compañía previamente mencionada, desarrollar sus labores mineras de una forma organizada, disponiendo de sus estériles de forma más segura, respetando los parámetros geomecánicos de estabilidad.

La investigación se realiza con la finalidad de proponer una metodología que le permita a la cantera, adecuar su escombrera a una geometría con una capacidad más óptima de almacenamiento de estéril en el espacio destinado para ello y estimar sus probabilidades de fallas a través del cálculo de su factor de seguridad.

Este trabajo de investigación se encuentra compuesto por cinco capítulos, siendo el primer capítulo integrado por las generalidades de la investigación, el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y sus posibles alcances; el segundo capítulo destaca algunos aspectos generales de la empresa donde se desarrolla el trabajo, su historia, organigrama y políticas administrativas; el tercer capítulo establece el marco teórico, para una mejor comprensión de lo expresado en el texto; el cuarto capítulo reseña el marco metodológico del trabajo, sus procedimientos experimentales, cronograma de ejecución de actividades y además indica los resultados alcanzados durante la investigación así como la interrelación existente entre los mismos, el quinto capítulo muestra un resumen de la propuesta de adecuación.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente sección se define el contexto de la investigación, las razones que la originaron y los objetivos que tienen por finalidad alcanzar una meta específica, la adecuación de una escombrera.

1.1 Planteamiento del problema

Por las características del yacimiento, las labores mineras han sido desarrolladas prácticamente sin la necesidad de establecer parámetros específicos para el manejo de estériles, ya que, tanto la metacaliza como la metadolomita se encuentran emplazados entre paquetes de esquisto y no se requiere realizar una remoción significativa de los mismos, sin embargo, por convenio de concesión, dentro de la empresa laboran tres (3) cooperativas, las cuales hacen uso de los equipos mineros de la cantera y aprovechan el esquisto con la finalidad de generar “lajas” de roca, las cuales son usadas como materiales ornamentales de construcción, siendo destinado el residuo producto de la separación de los planos del esquisto, a una ubicación dentro de la concesión que se encuentra cercana a una vía de acceso hacia el Frente 1 del yacimiento, donde es ubicada en forma aleatoria de “bote libre”. Dicho material de residuo posee una granulometría muy variada, que va desde finos menores a 0,1 mm y hasta rocas de más de un metro (1 m) de diámetro.

Hoy día, producto del pasar del tiempo, el bote libre ya representa un riesgo para los trabajadores y las operaciones diarias de la empresa, ya que, alcanza una altura de casi 10 metros con pendientes de unos 42° y está abarcando espacios dentro de los tramos de acarreo regulares de la cantera.

Con base en lo anteriormente expuesto, se propone la transición del sistema desordenado a uno de escombrera ordenada y planificada, el cual respete los parámetros básicos de geomecánica, lo que permitirá llevar un mejor manejo de los estériles y así labores mineras más eficientes y amigables para el ambiente, lo que claramente se traduce en una adecuación de escombrera.

1.2 Objetivos de la investigación

Por todo lo previamente plasmado y según la estructura convencional de los trabajos de grado, es obligatoria la disposición de objetivos generales y específicos, los primeros con la intención de fijar una meta a cumplir, los siguientes como una forma de sistematizar las tareas a realizarse que conduzcan a una solución de la problemática planteada.

1.2.1 Objetivo general

Elaborar un plan de adecuación de la escombrera en Canteras Tacarigua C.A., ubicada en el sector Mar Azul, carretera nacional Gañango-Patanemo, municipio Puerto Cabello, estado Carabobo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el volumen de estéril a generar durante la vida útil de la cantera.
- Analizar la ubicación actual de la escombrera considerando criterios técnicos y ambientales.
- Establecer un sistema de control de aguas superficiales considerando el sistema de drenajes naturales y las características pluviométricas de la zona.
- Calcular los parámetros del diseño final de la escombrera.
- Definir el plan de adecuación y secuencia de desarrollo de la escombrera.
- Determinar el plan de mantenimiento operativo de la escombrera.
- Elaborar un modelo computarizado del diseño final de la escombrera.

1.3 Justificación de la investigación

Por motivos de planificación minera y uso racional de los equipos de carga y acarreo, las empresas dedicadas a la minería deberían destinar de una zona para disponer de sus estériles, dicha ubicación debe estar (por motivos económicos) sobre un suelo que no posea interés económico, pero a su vez esté, lo más cerca del yacimiento que sea posible. Este espacio dispuesto para almacenar material, además, debe cumplir con una serie de características que garanticen un suave impacto a la

topografía, la mínima alteración posible de los drenajes naturales, almacenamiento de la mayor cantidad de material, en el menor espacio posible, siempre respetando los límites de los parámetros técnicos y la carga portante del suelo que lo soporta, entre otros.

La empresa Canteras Tacarigua, C.A., posee en su área de concesión un espacio establecido para verter residuos de procesos, sin embargo, la misma no cuenta con parámetros de diseño, seguridad ni mantenimiento. En base a lo anteriormente expuesto y con miras hacia el futuro, pensando en las necesidades de optimizar el espacio, la búsqueda de mejorar las condiciones de seguridad y las políticas ambientales de la nueva gerencia de la cantera, se ha tomado la decisión gerencial dentro de dicha empresa, de apoyar la realización de esta investigación para determinar la mejor manera en la cual pueda minimizarse este pasivo ambiental, llevando a cabo una mejor administración del residuo y a su vez, operaciones mineras más seguras.

En base a lo mencionado, esta investigación tiene como finalidad beneficiar a la empresa Canteras Tacarigua C.A., brindándoles una solución a una problemática que representa un peligro potencial, como lo es la estabilidad de sus montones de material remanente dispuesto en el área de residuos, a las cooperativas y sus trabajadores por generarles condiciones más seguras en sus labores diarias y a la comunidad de Gañango, en general, por darle una ubicación apropiada a los residuos de lajas lo que se traduce en una mitigación de un impacto ambiental.

1.4 Alcance y limitaciones

Brindar un plan de adecuación de escombreras, fundamentado en los parámetros geotécnico-mineros alcanzados posterior a la ejecución de los ensayos de laboratorio y el análisis de dichos resultados. Garantizando así la edificación de una escombrera que cuente con un factor de seguridad apropiado para actividades mineras, y que además, posea una geometría que garantice la circulación de las aguas y la revegetación de sus terrazas.

Cabe destacar, que el período de observación, por ser un trabajo de tipo académico y por tanto poseer un tiempo finito para su desarrollo, no permite llevar un seguimiento de los avances y las posibles complicaciones que puedan presentarse.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES DE LA EMPRESA

En la siguiente sección del trabajo se plantea desarrollar una breve reseña de los orígenes de la empresa, así como de las causas que la promueven a seguir laborando en el área de minería y los objetivos a lograr con ello. Toda la información recabada en esta sección es de exclusiva propiedad de Canteras Tacarigua, C.A., y por tanto fue extraído de sus archivos institucionales.

2.1 Reseña histórica

La empresa “Canteras Tacarigua, C.A.”, se encuentra localizada al Noreste del estado Carabobo (ver Figura 1), el área actual de explotación, originalmente denominada Concesión Minera “Los Viejos”, posee antecedentes de la extracción de minerales no metálicos en la zona desde el año 1955 y bajo esta modalidad otorgada por el entonces Ministerio de Energía y Minas desde 1969. Todo esto, ha generado una tradición de presencia y resguardo de un área en recuperación, altamente degradada en el pasado, especialmente, debido a la existencia de un antiguo basurero municipal que en oportunidades se ha visto sometido a una presión constante por las invasiones anárquicas.

Contrario a muchas de las industrias, las cuales pueden escoger su sitio de asentamiento, las empresas extractivas mineras, deben situarse justo en el sitio de localización del yacimiento.

Debido a las características de este yacimiento, entre las cuales resaltan el alto contenido de magnesio, carbonatos (96%) y bajo contenido en sílice (3%), ha contribuido que el mineral extraído sea una materia prima de excelente calidad para la elaboración de productos en las industrias de: construcción, siderúrgica, agricultura, plástico, farmacéutica, pinturas, vidrio, entre otras. Esto ha concebido el establecimiento de plantas procesadoras de dicho mineral, las cuales generan empleos e inversión de capital privado.

Durante el período de más de 45 años de extracción continua que se ha realizado, parte del material extraído ha sido empleado en la construcción de obras de infraestructura de relevancia regional como: Los muelles de La Refinería El Palito, Base de los Transformadores de Planta Centro, rehabilitación de las autopistas Puerto Cabello-Valencia, El Palito–Dist. El Cangrejo, El Palito-Morón, carretera Puerto Cabello-Patanemo, ampliación del Paseo Del Malecón, Marina Deportiva de Puerto Cabello, Puerto Pesquero y otras obras de infraestructura realizadas en DIANCA (Diques y Astilleros Nacionales Compañía Anonima), Destacamento Nro. 25 de La Guardia Nacional Bolivariana, CAVIM (Compañía Anonima Venezolana de Industrias Militares), PEQUIVEN (Corporación Petroquímica de Venezuela), empresas mixtas, IPAPC (Instituto Puerto Autónomo de Puerto Cabello), CEDIMAGUE (Centro de Distribución de Materiales de Guerra), Aviación Naval, Base Naval, resaltando los aportes continuos para el saneamiento de las comunidades de Patanemo, Gañango y Borburata, así como la materia prima para industrias procesadoras de minerales.

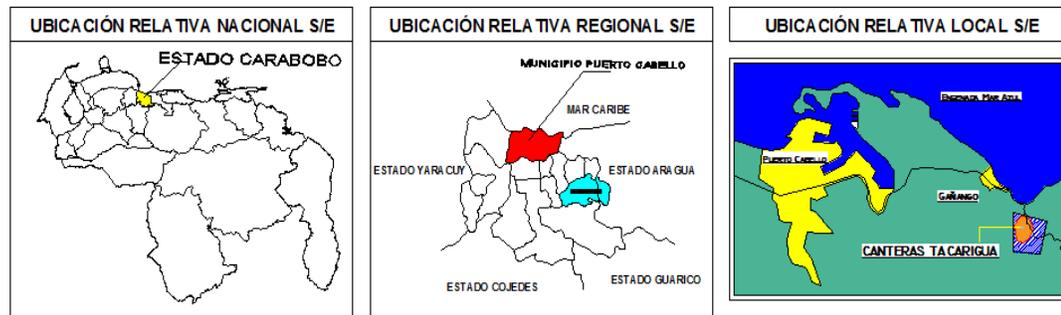


Figura 1: “Localización relativa de la empresa Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

2.2 Visión

Según Canteras Tacarigua, C.A. (2008), la misma es una empresa minera que opera con eficiencia en sus inversiones; cuenta con reservas de minerales de metacaliza y metadolomita dentro de su área de concesión que garantizan su

desarrollo sustentable en el mediano y largo plazo, siempre realizando las labores mineras con responsabilidad hacia el entorno urbanístico y el medio ambiente.

2.3 Misión

Indica Canteras Tacarigua, C.A. (2008), su misión es producir agregados para construcción, garantizando la creación de valor para la gerencia, asegurando la continuidad del proceso de explotación del mineral, brindando oportunidades de desarrollo para nuestros trabajadores y las comunidades vecinas. Mantener el compromiso de operar y desarrollar nuestros proyectos con eficacia, seguridad, responsabilidad social y ambiental.

2.4 Valores

Según Canteras Tacarigua, C.A. (2008), los empleados de la mencionada empresa mantienen que para la consecución de la Visión y Misión se vivirá y se difundirán los siguientes valores:

- Respeto a la vida de nuestros trabajadores.
- Trabajar en Canteras Tacarigua, C.A. es un orgullo y una responsabilidad.
- Reconocimiento a los trabajadores responsables que poseen valentía y liderazgo.
- Fomento del trabajo en equipo e interdisciplinario.
- Perseguir la excelencia.
- Apoyar la innovación para defender los principios de Canteras Tacarigua, C.A. como empresa creativa.
- Compromiso con el desarrollo sustentable en nuestras labores.

2.5 Organigrama

La empresa Canteras Tacarigua, C.A., posee un organigrama cuya estructura se muestra en la Figura 2, siendo el número indicado entre paréntesis la cantidad de trabajadores que labora por departamento.

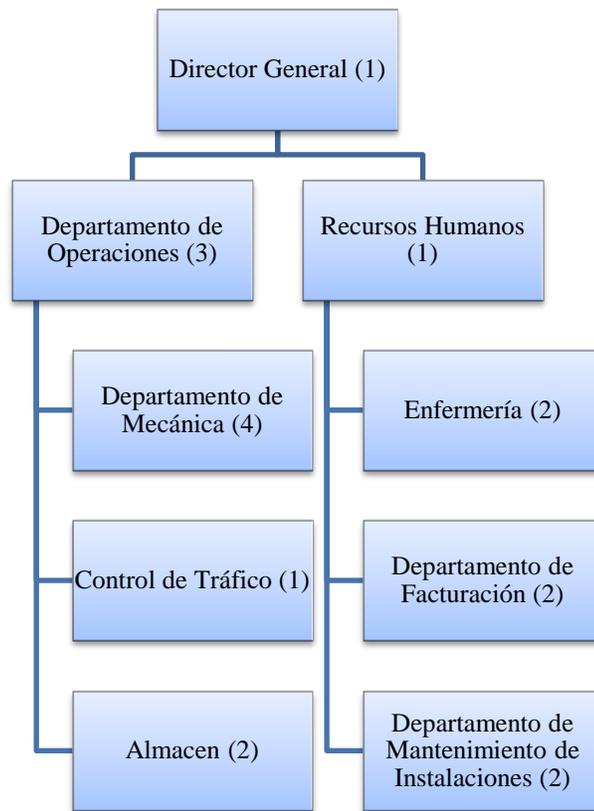


Figura 2: “Organigrama Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

2.6 Ciclo productivo

El sistema de explotación de “Cantera Tacarigua, C.A.” es el convencional de cantera a cielo abierto con bancos y terrazas, las cuales son hechas mediante perforaciones verticales para efectuar voladuras programadas con empleo de explosivos. Se generan bancos de entre 10 y 15 m de altura, diseñados acorde a los equipos de excavación adquiridos para la producción de agregados triturados. Esto permite bancos de altura suficiente para una óptima excavación y productividad, sin descuidar los parámetros básicos de seguridad, con inclinación de taludes de 85°, con alturas entre 10 y 15 m. Ya que, la geología local es altamente activa, ha generado zonas de alto diaclasamiento y fracturas de la roca mayormente en las zonas de afloramientos, notándose un comportamiento más homogéneo, en la medida que se profundiza en el yacimiento de la caliza.

El Plan de Explotación de Canteras Tacarigua, C.A., se realiza manteniendo los criterios para aprovechamiento a cielo abierto, tales como: ángulos de taludes, ángulo de *pit* final, ancho de las terrazas de seguridad para cada nivel de explotación y pérdida en la recuperación de caliza. En la explotación de la caliza, se continuará avanzando desde el tope hasta la base de los estratos, con la finalidad de recuperar la máxima cantidad de caliza posible; así como también, para mantener una minería organizada caracterizada por frentes de trabajos amplios y productivos que permitan un flujo de material homogéneo a lo largo del año.

El ángulo de *pit* final tendrá un ángulo general de 64° grados. Este ángulo permitirá mantener terrazas de seguridad por cada 15 metros de avance vertical, las cuales se distribuirán de la siguiente forma: una terraza de seguridad consecutiva de 6 metros, la cual tiene como objetivo, que el tractor pueda realizar mantenimiento a las terrazas de forma segura. Los criterios de diseño considerados para el desarrollo del Plan 2015 de Cantera Tacarigua, C.A. se dan a conocer en la Tabla 1.

Tabla 1: “Criterios de diseño minero de Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

N°	CRITERIOS MINEROS	
1	Altura de banco de explotación	15 m – 10 m
2	Ángulo de pared final	64°
3	Ángulo de taludes	85°
4	Pendientes de piso en terrazas y bancos	1%
5	Anchos mínimos de vías permanentes	8 m
6	Anchos mínimos de vías temporales	8 m
7	Ancho mínimo de banco de trabajo	6 m
8	Densidad de caliza en banco	2,4 t/m ³
9	Turnos por días	1 turno
10	Horas de trabajo por turno	8 horas

La disposición y diseño de una cantera están determinados por la potencia y profundidad del yacimiento. En la concesión de Canteras Tacarigua, C.A. la minería se realiza de manera superficial o a cielo abierto, con uso de explosivos para hacer el

arranque del material. Para ello se han dispuesto 5 terrazas bien identificadas por las cotas de nivel: 160, 200, 250, 260 y 270 msnm; estas terrazas serán aprovechadas para iniciar el plan de recuperación de mina y hacer de las operaciones mineras una actividad segura y sustentable.

El proceso de producción de la cantera comienza con la Etapa de Arranque que consiste en la conformación de pisos o área casi horizontales, para comenzar la etapa de perforación en cada sector programado en los diferentes bancos de caliza. El equipo utilizado para esta conformación de pisos y acceso es el tractor de orugas, dando paso para que los equipos de perforación ingresen al lugar.

Una vez efectuada la perforación con la cuadrícula programada, se procede a la ejecución de la voladura controlada para generar el menor ruido y sobre presión de la onda al ambiente utilizando explosivos y accesorios de punta en el mercado minero venezolano.

Luego que el banco es detonado, ingresan los equipos de carga y acarreo a los frentes de explotación, para los cuales se emplea una pala retroexcavadora marca Caterpillar modelo 330L. La función de estos equipos varía desde alimentar directamente a las plantas de trituración o en los bancos de producción en la cantera destinados para tal fin. Este material es transportado por camiones articulados marca Caterpillar modelo 730 de 13 m³ sueltos a la planta de trituración primaria. El material sobretamaño producto de las voladuras, no admisible directamente en la trituración es apartado y acumulado para la posterior fragmentación con los martillos hidráulicos.

Estos equipos de acarreo hacen el ciclo suficiente para mantener a capacidad total la planta de trituración y cuando se hace necesario algunos viajes de estos camiones, son descargados en un patio de acopio cerca de la planta, donde se mantiene cuando es necesario, un cargador frontal para alimentar en algún tiempo de vacío de la planta con este material apilado o cuando por alguna circunstancia se dificulte acarrear desde los frentes de la cantera por diversas causas como: lluvias, voladuras, falta de equipos de acarreo, entre otras.

Colocado el material en la tolva primaria a través de un alimentador, es transportado a la mandíbula o trituradora primaria, haciendo una pila “pulmón” que es descargada por unas bandas transportadoras superficial que alimentan un sistema de trituración secundaria para generar piedra N° 2, 1 arrocillo y polvillo.

Simultáneamente, durante la voladura también se cargan barrenos en el área de los esquistos, los cuales son colocados como perforaciones sub horizontales (30° aproximadamente) que tienen la finalidad de fragmentar parcialmente. Luego estas rocas, son las empleadas en el proceso de generación de lajas de las empresas cooperativas y posteriormente, el residuo de esta actividad se transforma en el material conformante del “bote libre”.

Finalmente el producto es despachado cargando los camiones externos o transportistas.

El ciclo productivo en la empresa Canteras Tacarigua cumple con la secuencia que se muestra en la Figura 3:

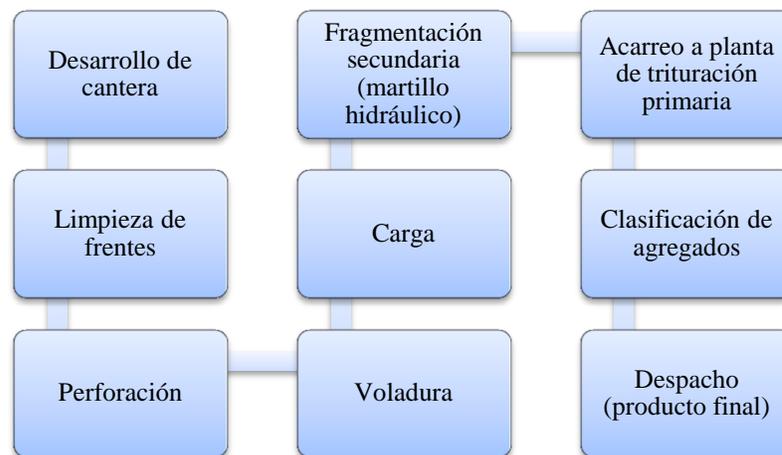


Figura 3: “Esquema productivo Canteras Tacarigua”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

El origen de la generación de estériles se ilustra en la siguiente representación (Figura 4), la cual parte de la operación de “Voladura” reflejada en la Figura 3:

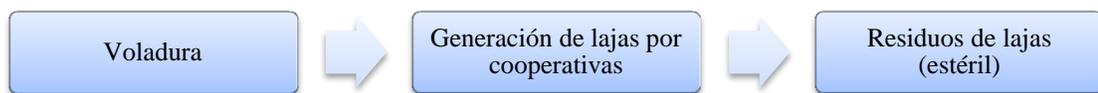


Figura 4: “Origen del residuo de lajas (estéril)”.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

En la siguiente parte del trabajo se pretende identificar todos aquellos aspectos de los cuales debe tenerse previo conocimiento antes de introducirse dentro de las especificaciones de la investigación.

3.1 Antecedentes generales

- CARREÑO, J. (2008). Diseño de escombreras de la mina de roca fosfática (Concesión Riecito), Cerro Riecito, municipio Jacura, estado Falcón.

Objetivo: Diseñar las distintas escombreras en la mina de roca fosfática Riecito, con la finalidad de depositar de forma ordenada los distintos tipos de estériles presentes en el yacimiento.

- ÁVILA, G. (2008). Diseño y plan de desarrollo de escombrera para el área Sur de la Mina Paso Diablo, municipio Mara, estado Zulia.

Objetivo: 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.

- AHMAD, S., *et al.* (2008). *Mine Waste Dumping and Corresponding Environmental Impacts at Chinh Bac Waste Dump in Vietnam.*

Objetivo: Describir la ubicación y problemas ambientales, con énfasis en los riesgos de estabilidad y desarrollo de la estabilización de taludes en la escombrera *Chinh Bac* en Vietnam.

- ACTIS, R. (2008) *Escombreras: Ubicación, Estabilidad y Contaminación Ambiental.*

Objetivo: Establecer consideraciones a tomar en cuenta a la hora de diseñar escombreras y criterios para la clasificación según tamaño, emplazamiento y método de vertido.

- *BRITISH COLUMBIA MINE DUMP COMMITTEE.* (1991). *Investigation and Design of Mine Dumps.*
Objetivo: Diseñar una guía referencial de consideraciones geotécnicas, ambientales y operativas para el desarrollo y planificación de escombreras mineras en la Columbia Británica.
- PASTOR, M. et al. (2002). *Modeling tailings and mine waste dumps failure.*
Objetivo: Representar los tipos de fallas más comunes en las escombreras de origen minero, las causas que las generan y las posibles técnicas para reducir las deficiencias en la estabilidad de las mismas.
- GÓMEZ, A. Y MAYORA, M. (2006). Caracterización geológica de la faja dolomítica de la zona ubicada entre Gañango y Patanemo, distrito Puerto Cabello, estado Carabobo.
Objetivo: Caracterizar geológicamente la faja dolomítica de la zona ubicada entre Gañango y Patanemo, distrito Puerto Cabello del estado Carabobo.

3.2 Bases teóricas de la investigación

3.2.1 Conceptos básicos

A continuación se definen algunos conceptos de necesario conocimiento para la comprensión del trabajo debido a que serán utilizados con relativa frecuencia, *loc. cit.* Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2003).

- a) Ángulo de reposo: Ángulo máximo que forma con la horizontal, al cual un material permanecerá en una superficie, sin deslizarse o rodarse.
- b) Drenaje natural: Vías naturales que toman los cuerpos de agua superficiales acorde con la topografía del terreno.
- c) Estabilidad de talud: Es la resistencia de una pendiente natural o artificial, o cualquiera otra superficie inclinada a fallar.
- d) Estéril: En minería, material asociado al mineral de interés pero que carece de interés económico al ser considerado como desecho.
- e) Laja: Roca plana, lisa y poco gruesa producto de un trabajo manual. Principalmente originaria de los esquistos.

- f) Talud: Resalte o inclinación de la topografía natural o artificial, cuya pendiente es generalmente más suave que la de los acantilados (desde plano inclinado hasta subvertical).

3.2.2 Descripción de macizos rocosos

González (2002) explica que la descripción y caracterización de los macizos rocosos es una labor necesaria en todos los estudios de ingeniería cuyo objetivo sea el reconocimiento de las propiedades y características geotécnicas de los materiales rocosos.

En general, el procedimiento a seguir parte de una descripción general de los aspectos y características observables a simple vista, en base a los cuales se establecen distintas zonas más o menos homogéneas considerando la litología, estructura tectónica, entre otros.; posteriormente, se describen y caracterizan con detalle los componentes de las diferentes zonas del macizo y sus propiedades; para finalmente, a partir de todos los datos obtenidos, se clasifica geomecánicamente el macizo rocoso. La caracterización de cada zona debe realizarse de forma objetiva e individualizada, lo cual incluye el estudio de la matriz rocosa, de las discontinuidades y del conjunto del macizo, describiendo tanto sus propiedades intrínsecas como los factores externos que condicionan su comportamiento.

La sistemática para la descripción de los afloramientos de macizos rocosos se puede resumir en las siguientes etapas:

- Descripción de las características generales del afloramiento: Debe incluir la identificación, condiciones y características generales del afloramiento así como aquella de cada uno de sus componentes: rocas, suelos, zonas con agua, discontinuidades singulares, entre otros.
- División en zonas y descripción general de cada una: Dichas zonas deben ser más o menos homogéneas, se realiza a partir de criterios fundamentalmente litológicos y estructurales. El número de zonas que se establezca y la extensión de las

mismas dependerá del grado de heterogeneidad de los materiales y estructuras que formen el macizo rocoso, de la extensión del afloramiento, del grado de detalle y finalidad de la investigación.

- Descripción detallada de cada zona (matriz rocosa y discontinuidades): Se lleva a cabo por separado y detalladamente, la cual deberá ser lo más objetiva y clara posible, utilizando terminología estandarizada, de manera que distintos observadores lleguen a la descripción más cercana posible, evitando que puedan aparecer diferencias muy contrastantes en la interpretación de las observaciones o medidas realizadas en una misma zona. A lo largo de esta fase se describen las características y propiedades físicas-mecánicas de la matriz rocosa y de las discontinuidades.
- Descripción de los parámetros del macizo rocoso: Se realiza a partir de los datos recogidos en cada estación previamente establecida; se establecerán los parámetros referentes al: número de familias de discontinuidades, orientación y características representativas de cada una de ellas, determinando su importancia relativa, tamaño y forma de los bloques que conforman el macizo, grado de fracturación, entre otros; así como otros factores que influyen en el comportamiento como: el grado de meteorización y las propiedades hidrogeológicas.
- Caracterización global y clasificación geomecánica del macizo rocoso: Constituye la fase final del proceso descriptivo y debe proporcionar las condiciones geológicas y geomecánicas del macizo en su conjunto. A partir de dichos resultados se realiza la clasificación geomecánica.

a) Análisis de estabilidad

González (2002) indica que en macizos rocosos duros o resistentes, las discontinuidades son los elementos que determinan como pueden ocurrir los planos

de rotura. En macizos formados por rocas blandas poco competentes, la matriz rocosa también tiene una importancia relevante sobre la generación de dichos planos y el mecanismo mediante el cual ocurre la rotura.

Resume el autor antes mencionado que los modelos de rotura que se presentan con mayor frecuencia en macizos competentes son: rotura planar, rotura tipo cuña y rotura por volcamiento, los cuales a continuación se desarrollarán en detalle.

- Rotura planar

Es la que se produce a favor de una superficie preexistente, ya sea esta una estratificación, foliación, una falla, junta tectónica, entre otras. Para que esta ocurra, es necesario que se presente alguna discontinuidad buzando en el mismo sentido del talud y con la misma dirección, cumpliéndose que el ángulo de buzamiento del talud (ψ) sea mayor que el ángulo de buzamiento de la discontinuidad (α). En la Figura 5 se muestra una representación de este tipo de rotura en un talud.

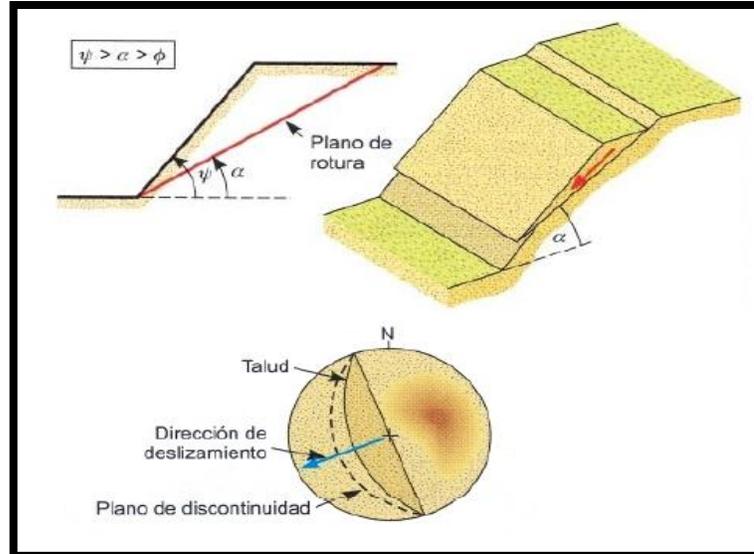


Figura 5: “Representación rotura planar”. Tomado de González (2002).

- Rotura tipo cuña

Corresponde al deslizamiento de un bloque en forma de cuña, el cual es generado por dos planos de discontinuidad, a favor de su línea de intersección. Para que suceda este tipo de rotura, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud, y se deben cumplir las mismas condiciones que para la rotura plana, por tanto el ángulo de buzamiento del talud (ψ) debe ser mayor que el ángulo de buzamiento que forma la línea de intersección de las discontinuidades (α). Se muestra una representación de lo mencionado en la Figura 6.

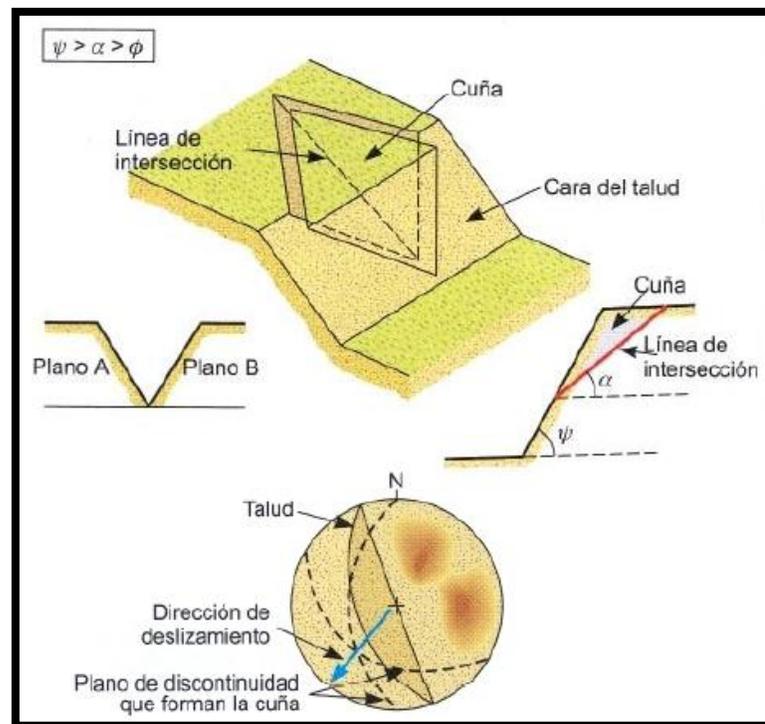


Figura 6: “Representación rotura tipo cuña”. Tomado de González (2002).

- Rotura por volcamiento

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan un buzamiento contrario a la inclinación normal del talud y además una dirección paralela o subparalela al mismo. Este tipo de rotura implica un movimiento de rotación de los bloques, y la estabilidad de los mismos no está únicamente condicionada por su resistencia al deslizamiento. A continuación se muestra una

ilustración de la mencionada rotura en un talud y su representación aproximada en red de Wulf (ver Figura 7).

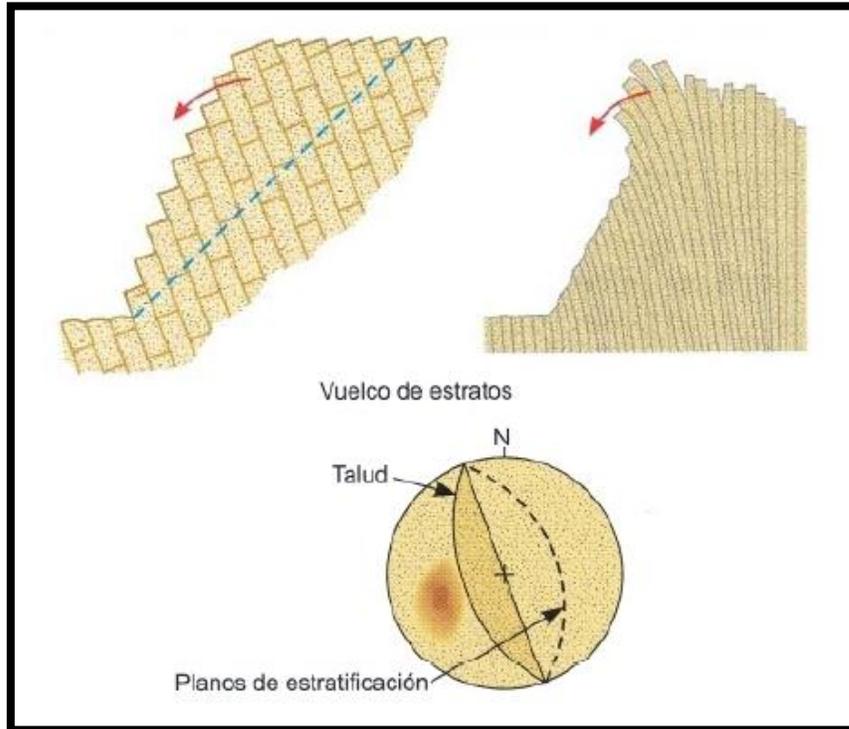


Figura 7: “Representación rotura por volcamiento”. Tomado de González (2002).

b) Índice RQD (*Rock Quality Designation*)

Método desarrollado por Deere entre 1963 y 1967, el cual consiste en calificar de forma cuantitativa la calidad del macizo rocoso en función de los testigos de perforación recuperados.

Indica González (2002), que a pesar de esta ser una herramienta importante para la descripción de la competitividad de un macizo rocoso, esta no considera variables tales como la orientación, separación, rellenos y demás condiciones de las discontinuidades, por lo que, por sí sola no permite describir las características de la fracturación de un macizo rocoso.

Por su parte Blandria y Bongiorno (2012) reflejan que este estudio se puede estimar por 3 métodos, los cuales se mencionan:

- Recuperación de testigos: Se calcula midiendo y sumando el largo de todos los trazos de testigo superiores a 10 cm en el intervalo de testigo de 1,5 m, a partir de los testigos obtenidos en la exploración. Estimándose así el RQD mediante lo mostrado en la ecuación 1:

$$RQD = \frac{\sum \text{testigos} > 10\text{cm}}{\text{total perforación}} \times 100\% \quad \text{Ecuación (1)}$$

- Estimación “in situ”: Comprende el cálculo del RQD en función del número de diaclasas o juntas existentes cada metro cúbico de macizo (J_v), dichas juntas serán identificadas a través de un levantamiento litológico-estructural en el área menos afectada por meteorización o voladuras en el macizo. Palmstrom (1975) *op. cit.* González (2002), postula una fórmula que permite aproximar el RQD y el recuento volumétrico de discontinuidades por metro cúbico según lo indicado en la ecuación 2:

Para $J_v > 4,5$:

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad \text{Ecuación (2)}$$

Para $J_v \leq 4,5$:

$$RQD = 100$$

Siendo el número de juntas (J_v), la relación de número de fisuras cada metro cúbico, estimado mediante la suma del número de fisuras que corten de manera independiente a cada uno de los 3 ejes de un cubo imaginario en el cuerpo rocoso materia de análisis. El número de juntas (J_v) puede estimarse mediante la ecuación 3 que se ilustra a continuación.

$$J_v = \frac{n^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{longitud medida (m)}} \quad \text{Ecuación (3)}$$

- Estimación teórica: Comprende el cálculo del RQD en función del número de fisuras existentes cada metro de macizo, dichas juntas serán identificadas a través

de un levantamiento litológico-estructural en el área menos afectada por meteorización o voladuras en el macizo. Puede estimarse mediante el empleo de la ecuación 4.

$$RQD = 100 e^{(0,1\lambda)}(0,1\lambda + 1) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde λ es la inversa del espaciado promedio entre las discontinuidades y se calcula según lo mostrado en la ecuación 5:

$$\lambda = \frac{1}{\text{espaciado medio de las discontinuidades (m)}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Una vez obtenido el RQD, se procede a comparar sus resultados para determinar su tipo de clasificación, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: “Calidad de roca según RQD”. Modificado de González (2002).

RQD (%)	Calidad
< 25	Muy Pobre
25 – 50	Pobre
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Muy Buena

c) Clasificación geomecánica de Bieniawski (*RMR*)

Existen diversos autores que proponen metodologías distintas para clasificar geomecánicamente los macizos rocosos, en el caso del presente trabajo de investigación se propone utilizar la clasificación geomecánica de Bieniawski (1989), quien postula una relación que maneja los siguientes factores:

- Resistencia a la compresión simple.
- Grado de fracturación (RQD).
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Estado de las discontinuidades.
- Presencia de agua.

Los factores antes mencionados son estimados en campo o laboratorio para posteriormente calcular el *RMR*, el cual oscilará entre 0 y 100, mientras más competente sea el macizo mayor será el valor del *RMR*. A su vez, según la puntuación que se obtenga en la estimación mencionada anteriormente, se procede a clasificar la calidad del macizo rocoso. Próximamente se presentan las Tablas utilizadas para la obtención del *RMR* (Tabla 3) y la clasificación del macizo rocoso según su calidad (Tabla 4).

Tabla 3: “Clasificación *RMR*”. Modificado de González (2002).

Parámetros		Escala de Valores						
Resistencia de la roca intacta (MPa)	Compresión simple	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
		VALOR	15	12	7	4	2	1
RQD (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
VALOR		20	17	13	8	3		
Espaciado de juntas (mm)		> 2000	600 - 2000	200 - 600	60 - 200	< 60		
VALOR		20	15	10	8	5		
CONDICIÓN DE JUNTAS	Abertura de discontinuidades (mm)	0	< 0,1	0,1 - 1	1 - 5	> 5		
	VALOR	6	5	4	1	0		
	Persistencia de discontinuidades (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20		
	VALOR	6	4	2	1	0		
	Rugosidad de discontinuidades	Muy rugosas	Rugosa	Ligeramente rugosa	Lisa	Plana (espejo falla)		
	VALOR	6	5	3	1	0		
	Relleno de discontinuidades (mm)	Ninguno	Duro < 5	Duro > 5	Blando < 5	Blando > 5		
	VALOR	6	4	2	2	0		
	Alteración de discontinuidades (mm)	Ninguno	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
	VALOR	6	5	3	1	0		
Aguas subterráneas		Totalmente seco	Apenas húmedo	Húmedo	Goteo	Flujo continuo		
VALOR		15	12	7	4	0		

Tabla 4: “Clasificación RMR”. Modificado de González (2002).

RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
Clase	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy buena	Buena	Mediana	Mala	Muy mala

d) Clasificación geomecánica de Romana (*SMR*)

Menciona Romana *et al.* (2003) que el *Slope Mass Rating (SMR)* se obtiene a través del *RMR* añadiéndole un factor de ajuste dependiendo de la orientación de las juntas, el talud y otros factores que van en función del método de la excavación. Se calcula según lo indicado en la Ecuación 6.

$$SMR = RMR + (F_1 * F_2 * F_3) + F_4 \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

RMR = ver Tabla 3

F_1 = Depende del paralelismo entre el rumbos de las juntas y la cara del talud. Varía entre 1,00 (cuando ambos rumbos son paralelos) a 0,15 (cuando el ángulo entre ambos rumbos es superior a 30° y la probabilidad de rotura es muy baja). Se calcula a través de lo postulado en la Ecuación 7.

$$F_1 = (1 - \sin(\alpha_j - \alpha_s))^2 \quad \text{Ecuación (7)}$$

Siendo:

α_j = rumbo de las discontinuidades.

α_s = rumbo del talud.

F_2 = Va en función del ángulo de buzamiento de las diaclasas. Varía entre 1,00 (para discontinuidades con buzamiento superior a 45°) y 0,15 (para discontinuidades con buzamiento inferior a 20°). Se calcula a través de lo postulado en la Ecuación 8.

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \quad \text{Ecuación (8)}$$

Siendo:

β_j = ángulo de buzamiento de las discontinuidades.

F_3 = Refleja la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y del talud.

Para fallas tipo cuña o plana primero se calcula el valor A según se muestra en la Ecuación 9.

$$A = \beta_j - \beta_s \quad \text{Ecuación (9)}$$

Para fallas por volcamiento primero se calcula el valor A según se muestra en la Ecuación 10.

$$A = \beta_j + \beta_s \quad \text{Ecuación (10)}$$

Siendo:

β_j = ángulo de buzamiento de las discontinuidades.

β_s = ángulo de buzamiento del talud.

Luego se ubica el valor de F_3 en la Tabla 5.

Tabla 5: “Relación entre buzamientos para *SMR*”. Modificado de Romana (2003).

RELACIÓN ENTRE BUZAMIENTOS		
Falla Cuña-Plana	Falla Volcamiento	F_3
> 10°	< 110°	0
10° - 0°	110° - 120°	-6
0°	> 120°	-25
0° - (-10°)	-	-50
< (-10°)	-	-60

F_4 = Es un factor de ajuste por el método de excavación empleado, para el caso de taludes ver Tabla 6.

Tabla 6: “Método de excavación para *SMR*”. Modificado de Romana (2003).

MÉTODO DE EXCAVACIÓN	
MÉTODO	F_4
Talud natural	15
Precorte	10
Voladura suave	8
Voladura normal o excavación mecánica	0
Voladura deficiente	-8

En la Tabla 7 se muestra la ponderación del *SMR* y su relación con la estabilidad.

Tabla 7: “Clasificación *SMR*”. Modificado de Romana (2003).

CLASES DE ESTABILIDAD					
Caso	V	IV	III	II	I
<i>SMR</i>	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Descripción	Muy mala	Mala	Normal	Buena	Muy buena
Estabilidad	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Buena	Muy estable
Roturas	Grandes roturas por planos continuos o por masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguna
Tratamiento	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

3.2.3 Generalidades de escombreras

a) Escombreras

Para el ITGE (1999), una escombrera es un depósito ordenado y secuencial de material estéril procedente de una explotación minera. Siendo el estéril, el resultado de la extracción del mineral sin valor económico. Por su parte Nichol *et al.* (2005), mencionan que las pilas de desechos estériles (escombreras), son generalmente gruesas zonas no saturadas de decenas a cientos de metros de altura que se componen de materiales física y químicamente heterogéneos, presentando gran variabilidad en tamaño, textura, permeabilidad, entre otras características. Actis (2008), define a las escombreras o botaderos como lugares donde se depositan materiales de desecho provenientes de las industrias mineras, manufactureras, de la construcción o de actividades diversas.

Mientras que Carreño (2008), una escombrera es toda aquella acumulación de materiales sólidos de granulometría variable procedente de las actividades humanas, bien como residuos de los procesos mineros (estériles rocosos) o de otros procesos industriales o urbanos (escombros de demolición, tierras de vaciado, entre otros).

En síntesis, según los conceptos previamente plasmados, una escombrera está integrada por materiales heterogéneos de distintas granulometrías que para el momento de su construcción, no poseen un valor económico.

b) Área de emplazamiento de la escombrera

Actis (2008) explica que la elección del área de emplazamiento de la escombrera persigue diversos objetivos, entre los que se encuentran:

- Minimizar los costos de transporte y vertido.
- Alcanzar la integración y la restauración de la estructura en el entorno.
- Evitar la alteración del hábitat de especies protegidas.
- Garantizar el drenaje.
- Minimizar el área afectada.

La técnica de la evaluación se basa en el análisis de decisiones con objetivos múltiples; dicho método es de gran aplicación, requiere el empleo y definición de funciones de utilidad multiatributos para la valoración de los diferentes objetivos empleados en la toma de decisiones.

c) Tipos de escombreras

Actis (2008), explica que de acuerdo a la secuencia constructiva en terrenos con pendiente, que es el caso más habitual, se pueden presentar los siguientes casos:

- Vertido libre

Solo es aceptable en escombreras de pequeñas dimensiones, y cuando no existe riesgo de rodadura de rocas aguas abajo. Se caracteriza por presentar en cada momento, un talud que coincide con el ángulo de reposo de los estériles y una segregación por tamaños muy acusada. Es el más desfavorable geotécnicamente hablando a pesar de ser el más empleado en la actualidad (ver Figura 8).

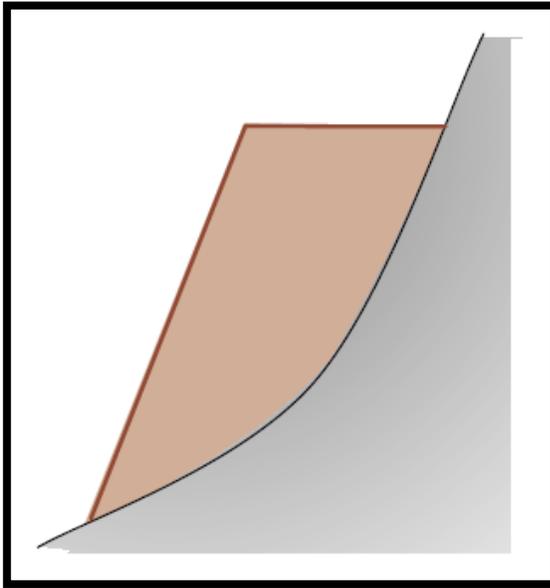


Figura 8: “Esquema de vertido libre”. Tomado de Actis (2008).

- Vertido por fases adosadas

Proporcionan factores de seguridad mayores porque se consiguen taludes medios finales más bajos. La altura total puede llegar a suponer una limitación por consideraciones prácticas de acceso a los niveles inferiores (ver Figura 9).

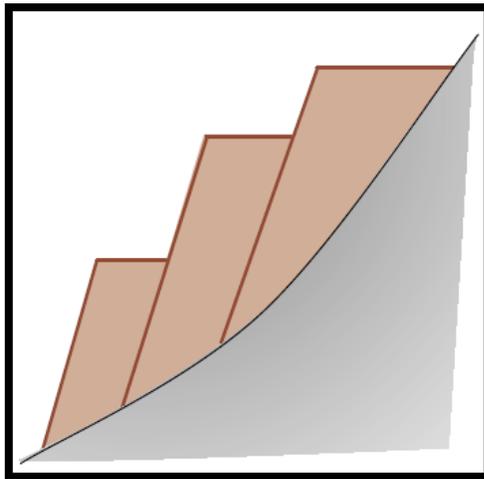


Figura 9: “Esquema de vertido por fases adosadas”. Tomado de Actis (2008).

- Dique de retención en pie

Se aplica cuando los estériles que se van a verter no son homogéneos y presentan diferentes litologías y características geotécnicas. Puede ser conveniente el levantamiento de un dique de pie con los materiales más gruesos y resistentes, de manera que actúe de muro de contención del resto de los estériles depositados.

Esta secuencia constructiva es la que suele seguir en aquellas explotaciones donde se extraen grandes cantidades de materiales arcillosos y/o finos, cuya disposición exigiría de otro modo grandes extensiones de terreno y presentaría un elevado riesgo de corrimiento, o cuando las condiciones de la base no son buenas (ver Figura 10).

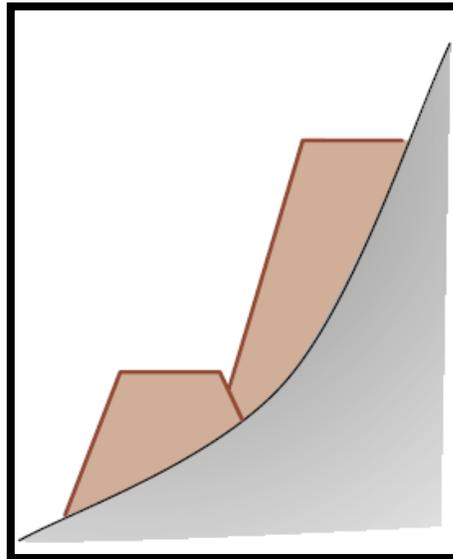


Figura 10: “Esquema de dique de retención en pie”. Tomado de Actis (2008).

- Fases ascendentes superpuestas

Aportan una mayor estabilidad porque se disminuyen los taludes finales y se consigue una mayor compactación de los materiales.

El proceso de vertido determina en gran medida el método de construcción o de desarrollo de la escombrera, el método de vertido puede ser por tonjadas o por basculamiento final.

Aplicable principalmente en explotaciones donde la topografía es suave, se aconseja el basculamiento final para aprovechar el tránsito de camiones, lograr una mejor compactación de los materiales y así conferirle una mayor estabilidad.

No obstante, los vertederos construidos mediante este método son más susceptibles a erosión por aguas de escorrentía, a pesar de mantener taludes inferiores, pues las superficies son largas e interrumpidas, sin bermas o terrazas intermedias y los taludes no pueden protegerse con vegetación (ver Figura 11).

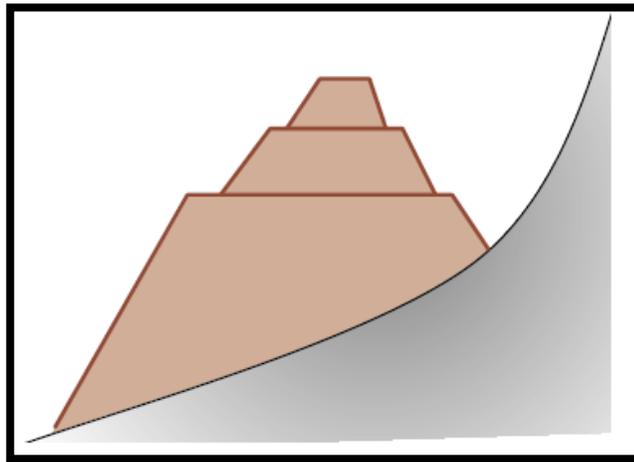


Figura 11: “Esquema de fases ascendentes superpuestas”. Tomado de Actis (2008).

d) Estabilidad de taludes en escombreras

Blanco (2014), menciona que el talud es la superficie inclinada de un terreno o del paramento de un muro respecto a la horizontal y su estabilidad, en lo referente a procesos técnicos de cálculo, se verifica por la relación entre dos grupos de fuerzas, aquellas que forman parte de las resistencias del terreno y las estructuras soporte o de contención y aquellas que tienden a desestabilizarlo. A las escombreras y presas le son de aplicación los principios de la caracterización mecánica de los suelos y las técnicas de cálculo de estabilidad así como las técnicas de mejora de esta estabilidad (disminución de pendientes, pilotes en cabeza, muros, sistemas de drenaje, reforestación, etc.), con la consideración de que en ambos casos los materiales no están tan consolidados como en los suelos naturales y se deben tener las

consideraciones adecuadas al estimar o evaluar los parámetros correspondientes de cálculo.

- Factores influyentes en la estabilidad

Existen muchos factores que se consideran importantes en la estabilidad de los taludes, identifica González (2002) cuatro de ellos como los más relevantes, siendo estos los factores geométricos (altura e inclinación del talud), factores geológicos (planos de foliación y diaclasas), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos (resistencia y deformabilidad).

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies y que sea cinemáticamente posible el movimiento. A su vez, se puede generar una clasificación de los factores mencionados anteriormente en factores condicionantes y desencadenantes, de los cuales se citan algunos en la Tabla 8.

Tabla 8: “Factores Desestabilizantes”. Modificado de González (2002).

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
<ul style="list-style-type: none"> • Litología. • Condiciones hidrogeológicas. • Propiedades físicas, resistentes y deformacionales. • Tensiones naturales y estado tenso-deformacional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobrecargas estáticas. • Cargas dinámicas. • Cambios en las condiciones hidrogeológicas. • Factores climáticos. • Variaciones en la geometría. • Reducción de parámetros resistentes.

- Tipos de fallas en escombreras

Según se menciona en la sección “Factores influyentes en la estabilidad”, las causas que pueden generar deslizamientos en taludes son diversas, lo que complica su análisis. El deslizamiento de un talud se produce por la rotura y posterior desplazamiento de una cuña de suelo a lo largo de un plano de debilidad, lo que ocasiona un desmoronamiento total o parcial de dicho talud (Bañón, 2000).

El mismo autor Bañón, hace referencia a otras fuentes y comenta, que los deslizamientos en material suelto ocurren a lo largo de una superficie de curvatura variable y que para fines prácticos, su forma ha sido asociada siempre a un arco de

circunferencia. En base a lo mencionado anteriormente, existe una clasificación de roturas llamada “Círculos Suecos”, tomando en cuenta sólo las roturas que podrían presentarse en taludes de escombreras, estas se clasifican de la siguiente manera:

- **Círculo superficial de pie:** La superficie de deslizamiento pasa por el pie del talud, siendo este el punto más bajo de la misma. Este tipo de deslizamientos se produce en suelos con alto ángulo de rozamiento interno o en taludes muy inclinados (ver Figura 12).

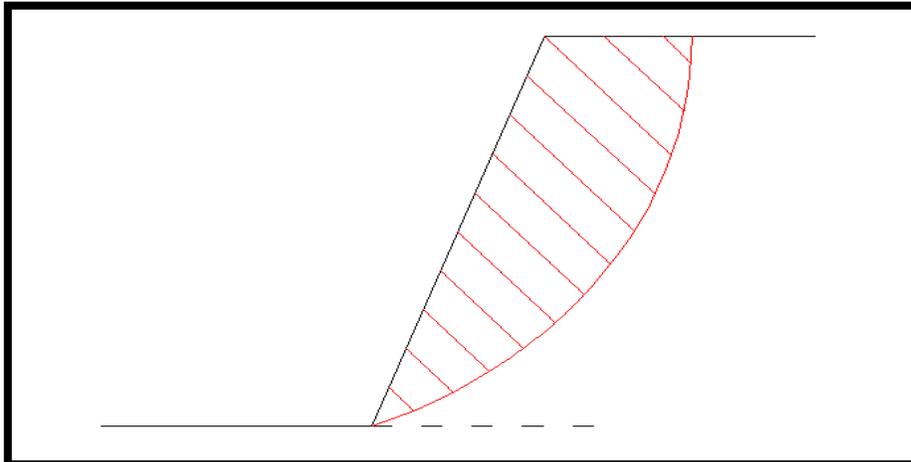


Figura 12: “Esquema de círculo superficial de pie”. Modificado de Bañón (2000).

- **Círculo profundo:** La superficie de rotura pasa por debajo del pie del talud. Este tipo de rotura se presenta en suelos con bajo ángulo de fricción o que poseen un ángulo de talud bastante acostado. Seguidamente se ilustra lo mencionado (ver Figura 13).

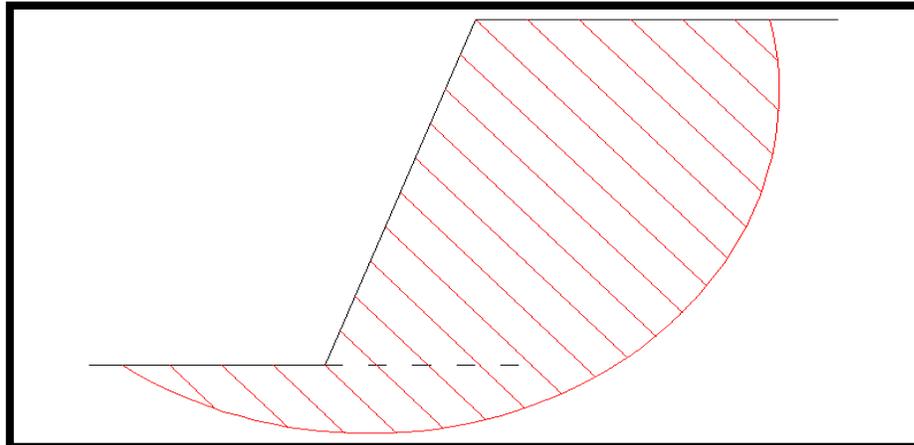


Figura 13: “Esquema de círculo profundo”. Modificado de Bañón (2000).

- Círculo profundo de pie: La superficie de deslizamiento intersecta con el pie del talud, sin embargo, este no es el punto más bajo. Viene planteada como una situación intermedia entre los dos casos anteriores. En la Figura 14 se muestra lo mencionado.

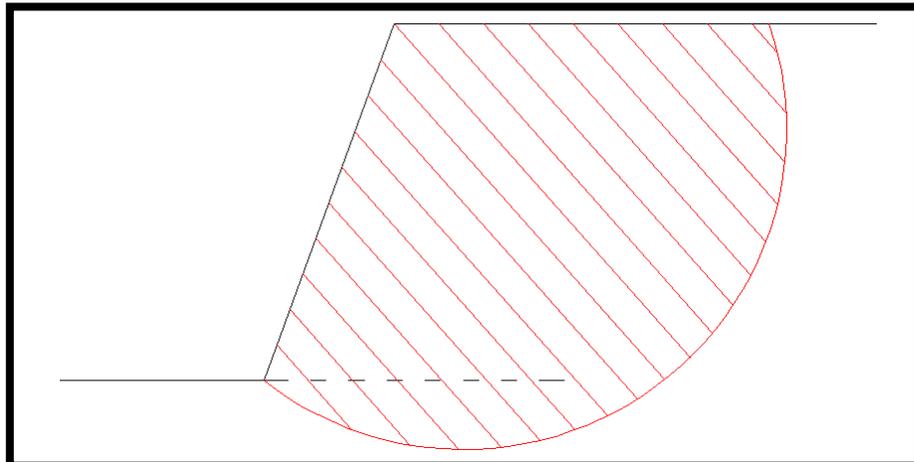


Figura 14: “Esquema de círculo profundo de pie”. Modificado de Bañón (2000).

- Análisis de estabilidad

Según trabajos desarrollados por González, L. (2002), los análisis de estabilidad permiten diseñar los taludes, mediante el cálculo de su factor de seguridad, y definir el tipo de medidas correctoras en caso de roturas reales o potenciales. Además, hace énfasis en que es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, de los posibles modelos o mecanismos de rotura que

pueden tener lugar y de los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico matemático en el que intervienen las fuerzas actuantes y resistentes que actúan sobre el talud y que por tanto permiten determinar la forma en que se comporta y su estabilidad. Dichos métodos se pueden agrupar en:

- Métodos probabilístico:

Se realiza considerando las posibilidades de rotura de un talud bajo condiciones previamente determinadas. Este método resulta ser un poco más engorroso complicado para su ejecución debido a la gran cantidad de datos que son requeridos para su desarrollo.

- Métodos determinísticos:

Mediante el previo conocimiento o suposición de las condiciones en que se encuentra un talud, indican que tan estable es su comportamiento. El método se base en la correcta selección de los parámetros físicos que rigen el comportamiento del material que compone al talud para luego definir su estabilidad o factor de seguridad.

Dentro de los métodos determinísticos empleados para evaluar la estabilidad de las escombreras destaca el método de Bishop Simplificado, el cual según González (2002), se enmarca dentro de 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.

- De la condición de equilibrio de fuerzas verticales en cada rebanada se obtienen las fuerzas N (normales a la superficie de rotura) y se sustituyen en la ecuación resultante de equilibrio de momentos.
- El método de Bishop Simplificado (El más conocido y utilizado) supone, que las fuerzas de contacto entre cada dos rebanadas no influyen, por considerarse equilibradas.
- Finalmente, se obtiene la expresión del coeficiente de seguridad F de la superficie considerada.

Considerando que F no aparece en esta expresión de forma explícita es necesario realizar múltiples iteraciones para obtener su valor.

González (2002), desglosa el cálculo de Bishop Simplificado indicando que sobre cada una de las dovelas que se consideran en el talud, se establece el equilibrio de momentos como se muestra en la Ecuación 11:

$$\sum S.R = \sum W.x = \sum W.R.\text{sen}(\alpha) \quad (11)$$

Como según la Ecuación 12:

$$F = \frac{c.A + N.tg(\phi)}{S} \quad (12)$$

Despejando de la Ecuación 7 el valor de S se tiene en la Ecuación 13:

$$S = \frac{c.A + N.tg(\phi)}{F} \quad (13)$$

Luego tomando las Ecuaciones 12 y 13:

$$\sum \frac{c.A + N.tg(\phi)}{F}.R = \sum W.R.\text{sen}(\alpha) \quad (14)$$

Entonces despejando F en la Ecuación 14:

$$F = \frac{\sum c.A + N.tg(\phi)}{\sum W.\text{sen}(\alpha)} \quad (15)$$

Para despejar la incógnita N mostrada en la Ecuación 15, se establece el equilibrio vertical en la rebanada

$$W + \Delta X = N.\cos(\alpha) + U.\cos(\alpha) + S.\text{sen}(\alpha) \quad (16)$$

Sustituyendo S según se muestra en la Ecuación 13 y despejando N según la Ecuación 16 se tiene:

$$N = \frac{W + \Delta X - U \cdot \cos(\alpha) - \left[\frac{c \cdot A + N \cdot \operatorname{tg}(\phi)}{F} \right] \cdot \operatorname{sen}(\alpha)}{\cos(\alpha)} \quad (17)$$

De donde:

$$N = \frac{W + \Delta X - \left[\frac{c \cdot A \cdot \operatorname{sen}(\alpha)}{F} + U \cdot \cos(\alpha) \right]}{\cos(\alpha) + \left[\frac{\operatorname{tg}(\phi) \cdot \operatorname{sen}(\alpha)}{F} \right]} \quad (18)$$

Y en la Ecuación 18 el coeficiente de seguridad queda (considerando $\Delta X = 0$), según se muestra en la Ecuación 19:

$$F = \frac{\sum \{c \cdot A \cdot \cos(\alpha) + [W - U \cdot \cos(\alpha)] \cdot \operatorname{tg}(\phi)\} \cdot \frac{1}{Mi(\alpha)}}{\sum W \cdot \operatorname{sen}(\alpha)} \quad (19)$$

Siendo:

F = Factor de seguridad

c = Ángulo de cohesión

A = Area de la rebanada

W = Peso de la rebanada

α = Ángulo de fricción

ϕ = Ángulo de base de la rebanada (con respecto a la horizontal)

Donde el cálculo de $Mi(\alpha)$, se encuentra regido por lo mostrado en la Ecuación

20:

$$Mi(\alpha) = \cos(\alpha) \cdot \left(1 + \frac{\operatorname{tg}(\phi) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{F} \right) \quad (20)$$

Para el cálculo de $Mi(\alpha)$ puede utilizarse además el ábaco mostrado en la Figura 15.

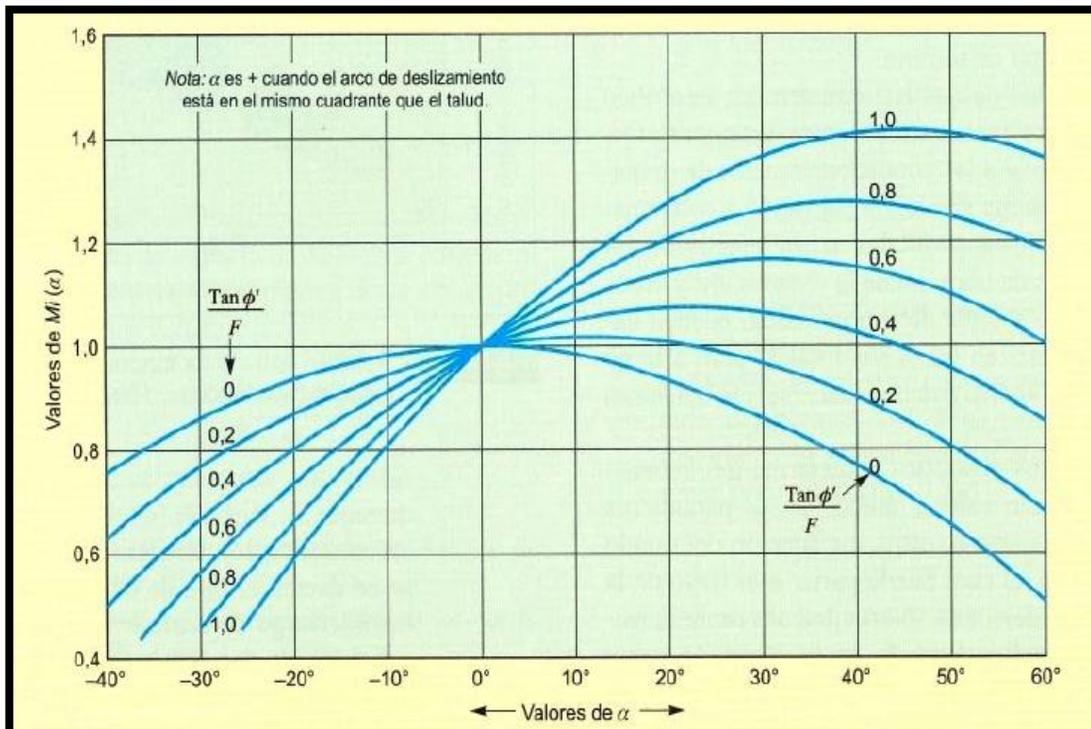


Figura 15: “Cálculo de $M_i(\alpha)$ ”. Tomado de González (2002).

Por su parte, menciona Tapia (2009) que el método Morgenstern-Price es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie terrestre dividiendo planos (como en el método de Bishop).

Cada bloque se asume para contribuir a la misma fuerza. Los siguientes supuestos se introducen en el método Morgenstern-Price para calcular el equilibrio límite de las fuerzas y momento de los bloques individuales:

- Los planos divididos entre bloques son siempre verticales.
- La línea de acción de peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento representada por el punto M.
- La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento i^{th} de la superficie de deslizamiento, en el punto M.
- La inclinación de las fuerzas E_i que actúan entre los bloques es diferente en cada bloque (δ_i) al punto extremo de la superficie de deslizamiento $\delta = 0$.

Donde:

W_i = Componente vertical del peso de la i -ésima dovela.

M = Centro de masas de contacto entre rebanada y suelo no deslizante.

N_i = Componente de la normal de la i -ésima dovela.

E_i = Fuerza resistente de la dovela anterior.

δ_i = Ángulo entre la horizontal y la dirección de la fuerza E_i .

e) Restauración ambiental de escombreras

Precisa Actis (2008), la definición de restauración al conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

La evaluación del daño producido es fundamental para encarar su reparación. En primera instancia se pensara en medidas de mitigación, o sea medidas para reducir los daños potenciales sobre la vida y los bienes que puedan causar los eventos de carácter geológico, hidrológico o industrial.

Las medidas de remediación son todas las medidas inmediatas que se toman para evitar consecuencias mayores y siempre tendientes a la reparación del daño provocado. Es el conjunto de acciones que se llevan a cabo de limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes.

El objetivo de la restauración es no solo frenar e impedir la degradación en la vegetación autóctona y actuar de forma controlada sobre este medio natural para evitar un retroceso en el orden ecológico, sino también el de elaborar una sistemática de trabajo que permita actuar sobre las escombreras y el hueco de explotación, obteniendo además de los niveles mínimos de calidad exigidos en la legislación vigente una regeneración total de los terrenos afectados, de manera que puedan ser objeto de una explotación agrícola, forestal y ganadera, similar a las de su entorno geográfico.

COTUMAPTE La Rioja (2006), identifica como factores influyentes en la selección del método de restauración al tipo de explotación, entorno social, entorno

ambiental, costes, reglamentación y ordenación del territorio, entre otros. Además, precisan que cada restauración debe ser abordada en un contexto particular, sin ideas preconcebidas, para optar por aquella solución que permita satisfacer todas las condiciones de contorno que se apliquen en esas circunstancias concretas.

Es necesario tener en cuenta desde el momento inicial de planteamiento de la revegetación, el uso que se le va a dar a los terrenos del área de la cantera una vez finalizado el aprovechamiento mineral, ya que eso definirá el tipo de restauración apropiada. En la Tabla 9 se muestran los tipos de restauración ambiental en escombreras.

Tabla 9: “Tipos de Restauración Ambiental de Escombreras”. Modificado de COTUMAPTE La Rioja (2006).

TIPOS DE RESTAURACIÓN		
TIPOS DE USO	CARACTERÍSTICAS	ASPECTOS NECESARIOS
Agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Plantación de frutales • Cereales • Vides • Pastizales • Forrajes 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendientes suaves • Sistema de drenajes • Suelo fértil bien reconstituido • Tipo de cultivo adaptado a la disponibilidad de agua y a las características del suelo
Forestal	Plantación de árboles para la explotación de madera, incremento de la biodiversidad, lucha contra la erosión, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Pendientes moderadas. • Suelo fértil bien reconstituido. • Sistema de drenaje. • Selección de especies.
Hábitat natural	<ul style="list-style-type: none"> • Recuperación del entorno natural o creación del nuevo hábitat. • Reserva (flora y fauna). 	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo fértil bien reconstituido. • Selección de especies. • Modelado de orillas y fosa (en caso de lago).
Actividades recreativas	<ul style="list-style-type: none"> • Senderismo. • Escalada. • Caza y pesca. • Deporte náuticos. • Campos para práctica deportiva. • Parque zoológico. • Jardín botánico. • Museo de la explotación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad de los taludes. • Buenas propiedades geotécnicas del suelo restaurado. • Accesos. • Proximidad a núcleos urbanos. • Medidas de seguridad para los usuarios. • Buen acondicionamiento de la fosa (deportes náuticos).
Urbanismo	<ul style="list-style-type: none"> • Urbanizaciones. • Parques y zonas verdes. • Auditorios. • Iglesias • Bodegas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pendientes suaves. • Buenas propiedades geotécnicas del suelo restaurado. • Accesos. • Proximidad a núcleos urbanos. • Medidas de seguridad para los usuarios.
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Suelo para establecimiento de polígonos industriales. • Aparcamientos. • Depósitos de agua para consumo humano o riego. • Piscifactoría. 	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura (alcantarillado, líneas eléctricas, agua potable, carreteras de acceso, etc.). • Buen acondicionamiento y sellado de la fosa (vertederos, depósitos y piscifactoría).

3.2.4 Caracterización geomecánica para uso del estéril

British Columbia Mine Dump Committee (1991) menciona que el conocimiento de las características geológicas de los materiales rocosos que integran el vertedero también son necesarios. Los parámetros clave tales como litología, meteorización, la gradación, durabilidad y otras características importantes de los materiales destinados al desecho en una mina; todo esto con la finalidad de determinar algún uso posible.

a) Ensayo de análisis de suelo

Según el ASTM D 2487 (2006), este método de ensayo permite determinar de forma cuantitativa la distribución de tamaño de partículas en el suelo. La distribución del tamaño mayor de 75 micras (retenida en malla No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de tamaños de partículas más pequeños que 75 micras se determinan mediante un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro para determinar los datos necesarios.

Menciona Bañón (2000) que para este ensayo se emplea una serie normalizada de tamices de malla cuadrada y abertura decreciente, a través de los cuales se hace pasar una determinada cantidad de suelo seco, quedando retenida en cada tamiz la parte de suelo cuyas partículas tengan un tamaño superior a la admisión máxima de dicho tamiz. Una vez realizado el proceso de tamizado y posterior sedimentación (para el caso de arcillas y limos), se procede a pesar las cantidades retenidas en cada uno de los tamices, representándose así en una gráfica semilogarítmica donde se represente el porcentaje en peso de muestra retenida para cada abertura de tamiz. Próximamente se muestra tambor de tamices normalmente usados en este ensayo (ver Figura 16).



Figura 16: “Tambor de tamices”.

Bañón (2000) indica además que según la distribución que presente la curva puede interpretar si el suelo se encuentra bien o mal graduado y la distribución que presentan sus partículas. Calculándose lo mencionado a través de los coeficientes de uniformidad y de curvatura.

- Coeficiente de uniformidad: Sirve para medir el grado de distribución de tamaños de las partículas de un suelo, si todas las partículas son similares D_{60} y D_{10} no diferirán mucho en y por tanto el suelo se calificará de uniforme o mal graduado. Su cálculo se muestra en la Ecuación 21:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (21)$$

Donde:

D_{10} y D_{60} = Tamaño de partículas correspondiente al 10% y 60% de finos según la curva de distribución granulométrica, respectivamente.

- Coeficiente de curvatura (Cc): Da información acerca del equilibrio entre los distintos tamaños. Se calcula según lo indicado en la Ecuación 22:

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (22)$$

Donde:

D_{10} , D_{30} y D_{60} = Tamaño de partículas correspondiente al 10%, 30% y 60% de finos según la curva de distribución granulométrica, respectivamente.

- Granulometría continua: En su mayoría todos los tamices retienen material, por lo que la curva adopta una disposición suave y continua. Este tipo de suelos puede considerarse como bien graduados.
- Granulometría discontinua: La curva presenta picos y tramos planos, lo cual indica que varios tamices consecutivos no retienen material de manera significativa, lo cual suele evidenciar que la variación de tamaños es escasa. Este suelo es considerado como mal graduado.

Para obras civiles se considera que para que un suelo presente un comportamiento más competente al ser compactado es necesario que su gradación presente distintos tamaños, de modo tal que las partículas más finas ocupen los huecos que dejan los áridos de mayor tamaño, reduciendo de esta forma el número de intersticios y alcanzando una mayor estabilidad, y por consiguiente una mayor capacidad portante.

En sus observaciones Bañón (2000), menciona que tras la elaboración de un análisis granulométrico del suelo y realizar una adecuada clasificación del mismo, permite al profesional de la ingeniería tener una idea acerca del comportamiento del suelo como cimiento firme, normalmente solo con la granulometría y la plasticidad puede conocerse su comportamiento mecánico. En base a esto, existen dos tipos de clasificaciones muy útiles, las cuales son el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) y la clasificación de materiales para subrasantes de la *Highway Research Board* (H.R.B.).

Mencionan Kumar y Kumar (2005), que el sistema de clasificación H.R.B. desarrollado en la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), está basado en las características de tamaño y la plasticidad que

componen los suelos, se dividen los suelos en 7 grupos principales, designado como A-1, A-2, ..., A-7, y a su vez dichos grupos se encuentran divididos en subgrupos. Se determina el grupo al cual pertenece el suelo tomando en cuenta tres importantes criterios, la cantidad de material pasante del tamiz No 200, el límite líquido y el límite plástico, los últimos 2 se utilizan para estimar el índice de grupo (IG) mediante la Ecuación 23:

$$GI = 0,2a + 0,005ac + 0,01bd \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

- a = Porción del porcentaje del pasante en tamiz 200 entre 35%-75%, expresado entre números enteros del 0 al 40.
- b = Porción del porcentaje del pasante en tamiz 200 entre 15%-55%, expresado entre números enteros del 0 al 40.
- c = Porción del límite líquido entre 40-60, expresado entre números enteros del 0 al 20.
- d = Porción del límite plástico entre 10-30, expresado entre números enteros del 0 al 20.

Posteriormente, se recorre la Tabla 10 de izquierda a derecha hasta ubicar el suelo en la clasificación correspondiente.

Tabla 10: “Clasificación de materiales para subrasantes”. Modificado de Ruiz (1966).

Clasificación general	SUELOS GRANULARES							SUELOS ARCILLOSOS-LIMOSOS			
	(pasante tamiz No. 200 hasta el 35%)							(pasante tamiz No. 200 más de 35%)			
Clasificación por grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Ensayo de tamizado por vía húmeda. Porcentaje que pasa por:											
Tamiz de 2mm No 10	Máx 50										
Tamiz de 425 µm No 40	Máx 30	Máx 50	Min 51								
Tamiz de 75 µm No 200	Máx 15	Máx 25	Máx 10	Máx 35	Máx 35	Máx 35	Máx 35	Min 35	Min 35	Min 35	Min 35
Características de la fracción que pasa por tamiz 425 µm No 40											
Límite líquido ω_L (%)	-	-	-	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41	Máx 40	Min 41
Índice de plasticidad I_p (%)	Máx 6		No Plástico	Máx 10	Máx 10	Min 11	Min 11	Máx 10	Máx 10	Min 11	Min 11
Índice de grupo IG	0	0	0	0	0	Máx 4	Máx 4	Máx 8	Máx 12	Máx 16	Máx 20
Constituyentes principales de tipos más comunes	Fragmentos de roca		Arena fina	Gravas y arenas arcillosas limosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Comportamiento general como subrasante	Excelente a bueno					Regular a pobre					

La otra clasificación mencionada (S.U.C.S), consiste en una categorización según la distribución granulométrica que se enmarca según lo indicado en la Tabla 11.

Tabla 11: “Tipología de suelos S.U.C.S”. Modificado de Bañón (2000).

SÍMBOLO	CARACTERÍSTICAS GENERALES		
GW GP GM GC	Gravas (>50% retenido en tamiz No. 4)	Limpias (Finos < 5%)	Bien graduadas
		Con finos (Finos > 12%)	Pobrementemente graduadas
			Componente limoso
		Componente arcilloso	
SW SP SM SC	Arenas (<50% retenido en tamiz No. 4)	Limpias (Finos < 5%)	Bien graduadas
		Con finos (Finos > 12%)	Pobrementemente graduadas
			Componente limoso
		Componente arcilloso	
ML MH	Limos	Baja plasticidad (LL>50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
CL CH	Arcillas	Baja plasticidad (LL>50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
OL OH	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL>50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turba	Suelos altamente orgánicos	

Según la clasificación obtenida para el suelo en la Tabla 11, se establecen las características de comportamiento mecánico y capacidad de drenaje en la Tabla 12.

Tabla 12: “Características según S.U.C.S”. Modificado de Bañón (2000).

DIVISIONES PRINCIPALES		SÍMBOLO	COMPORTAMIENTO MECÁNICO	CAPACIDAD DE DRENAJE
Suelos de grano grueso	Gravas	GW	Excelente	Excelente
		GP	Bueno a excelente	Excelente
		GM	Bueno	Mala a impermeable
		GC	Bueno	Mala a impermeable
	Arenas	SW	Bueno	Excelente
		SP	Aceptable a bueno	Excelente
		SM	Aceptable	Mala a impermeable
	SC	Malo a aceptable	Mala a impermeable	
Suelos de grano fino	Limos y arcillas	ML	Malo a aceptable	Malo a aceptable
		CL	Malo a aceptable	Casi impermeable
	(LL < 50)	OL	Malo	Mala
	Limos y arcillas	MH	Malo	Malo a aceptable
		CH	Malo a aceptable	Casi impermeable
	(LL > 50)	OH	Malo a muy malo	Casi impermeable
Suelos orgánicos	Pt	Inaceptable	Malo a aceptable	

b) Ensayo de compactación (proctor modificado)

Bañón (2000) explica que la ejecución de este ensayo persigue la determinación de la humedad óptima de compactación de una muestra de suelo.

Según la norma ASTM D1557 (2012) este ensayo se le aplica a un suelo con un contenido de humedad determinado con cinco de sus capas ubicadas en un molde de dimensiones previamente establecidas, dicha muestra será compactada por 25 o 56 golpes de un pistón de 10 Lbf (libras-fuerza), caído desde una distancia de 457,2 mm., sometiendo así al suelo a un esfuerzo de compactación de aproximadamente 27.000 kN-m/m³ (kilo Newton-metro cada metro cúbico), lo cual permite calcular el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite para un número suficiente de moldes que permitan establecer una relación entre el peso de la muestra seca y humedad. Para representarse estos datos se utiliza una relación curvilínea conocida como curva de compactación, la cual permitirá obtener los valores de humedad óptima y densidad máxima. A continuación en la Figura 17 se ilustra el equipo normalmente utilizado para realizar este ensayo.



Figura 17: “Proctor”.

Destaca además en la norma ASTM D1557 (2012) que el suelo colocado como relleno en ingeniería (terraplenes, fundaciones, bases de carreteras) se compactan a un estado denso por lo cual este ensayo permitiría obtener propiedades de ingeniería satisfactorias, tales como resistencia al corte, compresibilidad, o permeabilidad.

Menciona el Grupo de Geotecnia (2008) que tras el ensayo se relacionan los valores de contenido de humedad con la densidad, lo que dará como resultado una parábola cóncava la cual tendrá en su punto más alto (coincidente con el punto de inflexión), la densidad máxima, a su vez, puede obtenerse la curva de saturación, relacionando el contenido de humedad y la densidad saturada bajo la siguiente ecuación (ver Ecuación 24):

$$W_{sat} = 100 * \frac{(\gamma_w * G_s - \gamma_d)}{G_s * \gamma_d} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

W_{sat} = Contenido de agua para la condición de saturación completa (%)

γ_w = Peso unitario del agua (N/m³)

G_s = Gravedad específica (Adimensional)

γ_d = Peso unitario del suelo (N/m³) (ver Ecuación 25)

Siendo:

$$\gamma_d = G_s * \gamma_w \quad \text{Ecuación (25)}$$

La pertinencia de realizar este ensayo es debido a que es necesario conocer el comportamiento del material estéril al ser compactado, de modo que exista la posibilidad de definir algún posible uso como agregado para la construcción que le brinde un valor agregado a los residuos de origen esquistoso de la empresa Canteras Tacarigua, C.A.

3.2.5 Caracterización geomecánica para diseño de la escombrera

Pastor *et al.* (2002) indican que las características ingenieriles de la fundación de la escombrera así como la de los materiales que la integrarán, son de necesario conocimiento para su diseño y el de sus taludes. Se recomienda seleccionar muestras significativas y representativas para su ensayo, interpretación y aplicación de sus

resultados al diseño, comprendiendo sus diversos componentes en relación con su ambiente físico. El tipo y la cantidad de ensayos necesarios a realizarse, dependerá de la complejidad de su emplazamiento, la localización, tipo, tamaño y configuración de la escombrera, el impacto ambiental de su ubicación, entre otras. Para escombreras grandes, o localizadas en lugares de sensibilidad ambiental comprometida, podría necesitarse mayor cantidad de ensayos. A continuación se enlistan algunos de los ensayos más utilizados para la caracterización geomecánica de escombreras:

a) Ensayo de carga puntual

Pastor, M. *et al.* (2002) indican que las características de resistencia a la compresión del sustrato son necesarias para el estudio de estabilidad de la fundación y su capacidad portante. Donde las condiciones de la fundación son complejas, o el suelo contiene alta cantidad de finos, blando o susceptible a consolidación, más ensayos de laboratorio podrían ser requeridos. El número y tipo de ensayos a ser realizados, y el estado de la muestra, dependerá de la complejidad de la ubicación, la naturaleza del suelo a ser ensayado y las condiciones de carga a las cuales se encontrará sometido.

Según lo anterior, se establece la necesidad de hacer ensayos de carga puntual, para los cuales la norma ASTM D5731 (2002) indica que el objeto del mismo es medir la resistencia de probetas de roca al someterlas a cargas puntuales aplicadas mediante un par de piezas cónicas. Las probetas pueden ser cilíndricas (para los ensayos de carga concentrada “diametral” y “axial”) o trozos de forma irregular (para el ensayo de “trozo irregular”). De los resultados del ensayo puede derivarse un índice de resistencia a la carga puntual o concentrada $I_s(50)$ que sirve para clasificar las rocas por su resistencia. Aunque este ensayo se puede hacer en el laboratorio, está pensado principalmente para obtener resultados en muestras de roca en el campo.

CEDEX (1973) además indica que para la realización de este ensayo es necesario disponer del sistema para aplicar la carga, el cual está compuesto por un bastidor de carga, una bomba, un émbolo y sus bases. Un sistema para medir la carga

P necesaria para romper la probeta y un sistema para medir la distancia D entre los puntos de contacto de las 2 bases.

CEDEX propone, que con las rocas a clasificar se forman 2 grupos, cada uno de los cuales se considera con resistencia uniforme en la inspección preliminar. Se escoge entonces de cada grupo una muestra de roca que contenga el número de probetas necesario. Se preferirán muestras de forma cilíndrica cuando existan.

La norma ASTM D5731 (2002) postula que para el ensayo con bloques o fragmentos irregulares se escogen con una dimensión media de aproximadamente 50 ± 35 mm y con una relación entre D/W entre 0,3 y 1, preferiblemente 1. La distancia L debe ser por lo menos 0,5 W. El ensayo debe hacerse con al menos 10 fragmentos por muestra. Para el cálculo del $I_s(50)$ es necesario determinar el I_s , la misma se determina mediante la Ecuación 26 que se postula seguidamente:

$$I_s = \frac{P}{De^2} \quad (26)$$

Donde:

P = Carga de falla.

De = Para muestras de bloques y trozos irregulares se muestra en la Ecuación 27.

$$De^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (27)$$

Siendo:

WD = Área de la sección transversal mínima de la probeta.

Entonces tomando la Ecuación 26 y 27, se calcula $I_s(50)$ según se indica en la Ecuación 28:

$$I_s(50) = F * I_s \quad (28)$$

Donde F se indica en la Ecuación 29:

$$F = \left(\frac{De}{50}\right)^{0,45} \quad (29)$$

La correlación entre $I_s(50)$ y la resistencia a la compresión simple de la roca (σ_c o UCS) está regida por la relación mostrada en la Ecuación 30:

$$UCS = C * I_s(50) \quad (30)$$

Donde:

C = Factor del diámetro de la muestra (ver Tabla 13).

Tabla 13: “Valor de f generalizado”. Modificado de ASTM D5731 (2002).

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

En la Figura 18 se muestran las especificaciones con las que deben contar las probetas a usarse.

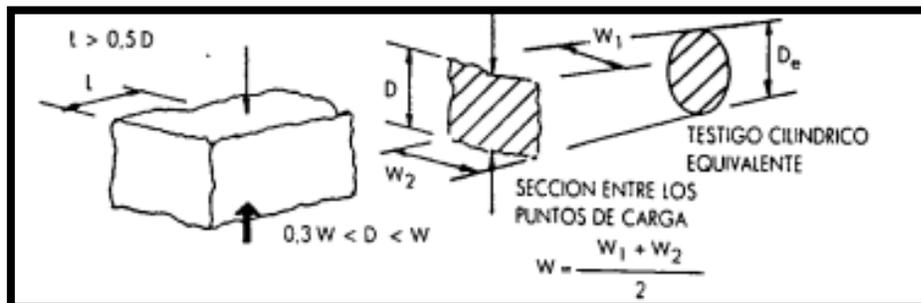


Figura 18: “Especificaciones exigidas para ensayos de fragmentos de forma irregular”. ASTM D5731 (2002).

b) Ensayo de gravedad específica del suelo

La importancia de este ensayo radica en la necesidad de conocer (a través de la gravedad específica) el peso específico del material a integrar la escombrera para los cálculos de estabilidad de la misma. Indica el Grupo de Geotecnia (2008) que la gravedad específica de un suelo se utiliza en el cálculo de las relaciones de fase de los suelos, en los cálculos de los ensayos de granulometría por sedimentación, compresibilidad y potencial de expansión. Esta consiste en una técnica en la que se estima medir la misma en los suelos pasantes del tamiz #4. La ecuación utilizada se postula a continuación (ver Ecuación 31).

$$G_s(a, T_b) = \frac{M_o}{M_o + (M_a - M_b)} \quad \text{Ecuación (31)}$$

G_s = Gravedad específica (Adimensional).

M_a = Masa del picnómetro llenado con agua a la temperatura T_b (gramos).

M_b = Masa del picnómetro llenado con agua y suelo a la temperatura (gramos).

M_o = Masa de la muestra de suelo secado al horno (gramos).

a = Factor de corrección (adimensional).

T_b = Temperatura del contenido del picnómetro cuando se determinó la masa (°C).

3.2.6 Características climáticas y diseño de drenaje

British Columbia Mine Dump Committee (1991) menciona que la hidrología de una zona particular de la escombrera puede limitar su uso. Los patrones climáticos, frecuencia e intensidad de lluvias así como el tamaño de la cuenca, todos son influyentes en el drenaje y la estabilidad de la escombrera y por tanto las zonas con altas precipitaciones podrían requerir de la construcción de métodos especiales de drenaje para minimizar la infiltración de aguas en la misma.

En 2002, Pastor y otros han propuesto que las condiciones piezométricas de una escombrera y su fundación asociada son de gran importancia para asegurar la estabilidad de la misma. En muchos casos, materiales largos y gruesos poseen gran permeabilidad y por tanto es necesario diseñar una estructura de drenaje eficiente. El material emplazado mediante ciertas técnicas puede generar que el material grueso se asiente en el área de contacto entre el pie del talud y la fundación, situación que aumenta las probabilidades de permeabilidad. Otros métodos que impliquen grandes dimensiones y simultánea construcción de los canales de drenaje para favorecer la permeabilidad a través de ellos, son de los métodos más costosos pero eficientes.

Los autores mencionados anteriormente, además señalaron que la percolación de las aguas de lluvia a través de la escombrera acarrea la existencia de partículas finas hacia los niveles de fundación. La generación de partículas finas a lo largo del tiempo en la escombrera por causas naturales, puede causar su asentamiento en los canales de drenaje y el área de contacto entre la fundación y la escombrera,

reduciendo así significativamente la capacidad de drenaje de la estructura. La presencia de agua empozada puede ser causada por los granos finos, como producto de la depositación de material de calidad pobre en una misma área o elevación de la escombrera. Lo anterior podría permitir la formación de zonas de deformación e inestabilidad. La solución para ello parte de la construcción de diversos diques alrededor de la escombrera. Los mencionados diques deben estar constituidos por rocas gruesas y amontonadas para controlar la erosión, estos a su vez deben estar diseñados acorde a los requerimientos hidrológicos.

Por su parte Ahmad *et al.* (2008) indican que un mal sistema de drenajes puede ser causante de infiltración de agua durante los períodos lluviosos; dicha agua al moverse dentro de la escombrera puede incrementar la presión de agua, generando problemas graves de estabilidad.

Considerando lo anterior, para el diseño de drenajes suele utilizarse el método racional, el cual supone la conjugación de los siguientes factores:

- Intensidad de la precipitación máxima (I , en mm/h)
- Área de la cuenca (A , en Km²)
- Coeficiente de escorrentía (C , valor adimensional ver Tabla 14)
- Caudal (Q , en m³/s)

Cumpliendo así con la siguiente relación mostrada en la Ecuación 32:

$$Q = \frac{C * I * A}{3,6} \qquad \text{Ecuación (32)}$$

Tabla 14: “Tabla de coeficientes de escorrentía”. Tomado de Aparicio (1996).

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Despreciable
		>50%	>20%	>5%	>1%	<1%
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba, grama	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Para determinar el flujo de agua que va a circular a través de las cunetas de desagüe en la mina, se aplica lo indicado en la Ecuación 33.

$$Q = V \cdot A \quad \text{Ecuación (33)}$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

A = Área de la sección de la cuneta (m)

V = Velocidad del agua (m/s)

Para el cálculo del caudal la única incógnita termina siendo la velocidad del agua, para lo cual es necesario usar la fórmula de Manning (Castillo, 2003), la cual puede apreciarse en la Ecuación 34.

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S} \quad \text{Ecuación (34)}$$

El cual al despejarse el radio hidráulico de la Ecuación 34, puede expresarse como se muestra en la Ecuación 35:

$$V = \frac{1}{n} * \left(\frac{A_h}{P_h}\right)^{\frac{2}{3}} * \sqrt{S} \quad \text{Ecuación (35)}$$

Donde:

V = Velocidad (m/s)

n = Rugosidad de la pared (adimensional, ver Tabla 15)

A_h = Área mojada de la sección (m²)

P_h = Perímetro mojado (m)

S = Pendiente de la línea de agua (m/m)

Tabla 15: “Tabla de coeficientes de rugosidad”. Modificado de Castillo (2003).

TIPO DE CANAL	n
Revestido con cemento (hormigón), terminación fina	0,015
Revestido con cemento (hormigón), terminación gruesa	0,013
Suelo excavado, recto sección uniforme, sin vegetación	0,022
Suelo excavado, recto sección uniforme, laterales con césped	0,030
Suelo excavado, en curva o irregular, sección no uniforme, con arena o piedra en el fondo	0,030
Canal natural, recto, sin vegetación	0,030

3.3 Generalidades de la ubicación

3.3.1 Características climáticas

El clima costero nacional, posee como particularidad, la poca cantidad de precipitaciones por año. Las costas del estado Carabobo no son una excepción a la mencionada actividad meteorológica, tal como se representa en el siguiente mapa que indica las precipitaciones promedio anuales por zonas en la región en cuestión. En la Figura 19 se muestra el promedio de precipitaciones anuales (en mm de lluvia por año) en el estado Carabobo.

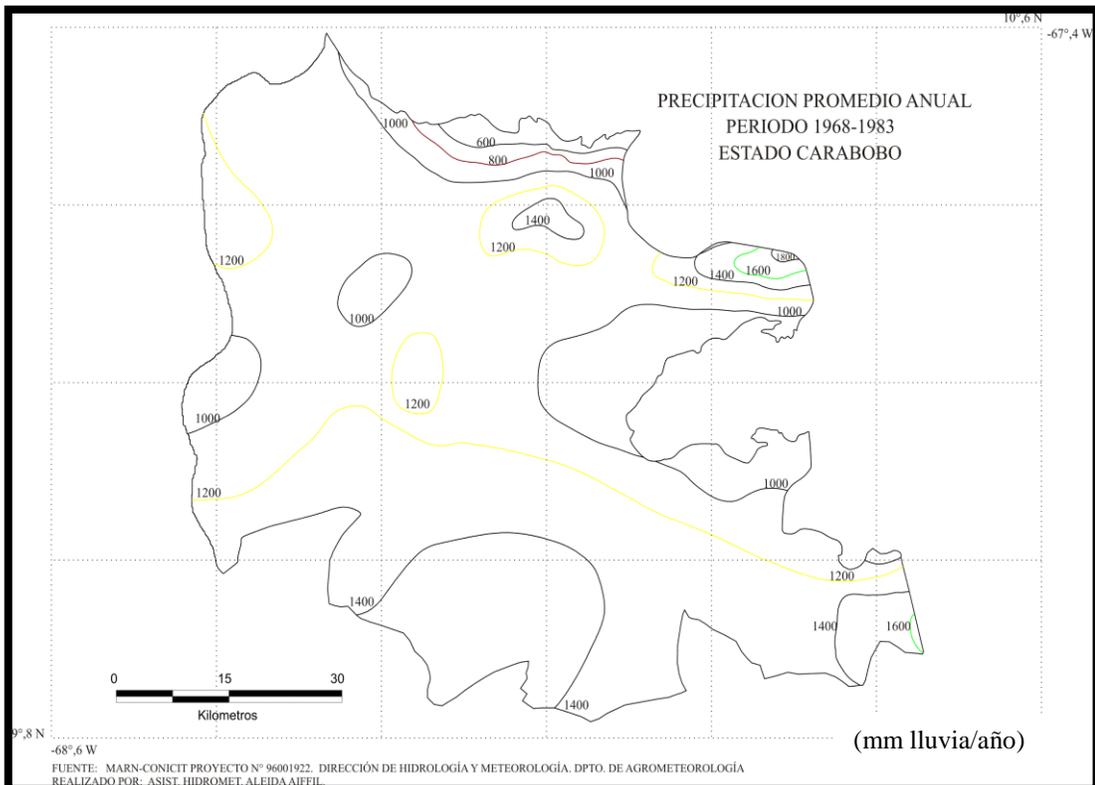


Figura 19: “Precipitaciones estado Carabobo”. Tomado de INAMEH.

En la Tabla 16 se muestran las precipitaciones máximas registradas en el área de interés del estudio y su período de duración respectivo según estadísticas del INAMEH.

Tabla 16: “Pluviosidad máxima, Puerto Cabello”. Modificado de INAMEH.

Año	Tiempo duración	Lluvia máxima (mm)
1970	15 min	31,1
	30 min	36,9
	1 hora	4,2
1971	15 min	23
	30 min	27,4
	1 hora	3,6
1972	15 min	32,4
	30 min	37,9
	1 hora	4,7
1973	15 min	19,6
	30 min	27,7
	1 hora	4,9
1974	15 min	29,94
	30 min	32,4
	1 hora	4,5
1975	15 min	29,8
	30 min	40,5
	1 hora	5,2

3.3.2 Topografía

Indican Pastor *et al.* (2002) que la topografía es un ámbito que tiene una influencia directa en la estabilidad de la escombrera en diferentes maneras. La inestabilidad de la escombrera en terrenos empinados puede ser causante de la dificultad de alcanzar una adecuada densidad de escombros y por tanto estresar el material hasta generar acercamientos a sus esfuerzos límites y generar fallamientos. Otros problemas incluye el aumento de ángulo de taludes hacia el pie del mismo o sus adyacencias. Terrenos horizontales o de pendiente poco pronunciada poseen taludes más estables, ya que tienden a aproximarse más a sus ángulos de reposo natural.

La topografía predominante pertenece al sistema montañoso del Caribe o de La Costa, es una continuación estructural del Arco Insular de la región Oriental del Caribe. Constituye un sistema montañoso del tipo alpino con variadas formas de relieve, tales como valles interiores, lomas, colinas y lomerías. Las montañas de esta área presentan topos redondeados, con estructuras tipo *karst*, y elevaciones que pueden llegar desde los 225 m a 275 m, con pendientes naturales que van desde los

45° a los 55° de inclinación, de predominante comportamiento abrupto en muchas direcciones.

3.3.3 Geología

a) Geología regional

Fase Antímamo (ver Figura 20)

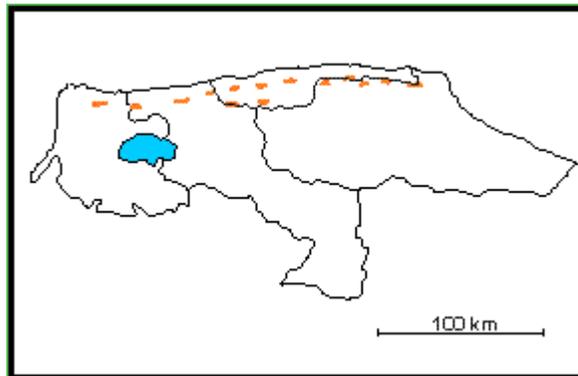


Figura 20: “Mapa Fase Antímamo”. Tomado de PDVSA Léxico Estratigráfico.

El estado Carabobo cuenta con una geología compleja y heterogénea debido al emplazamiento geotectónico al cual pertenece la región; muestra estructuras como anticlinales, sinclinales y fallas, que le confieren aproximadamente un 75% a todo lo largo de su territorio condiciones de un relieve montañoso propio de la Cordillera de la Costa.

Regionalmente el yacimiento de calizas y dolomitas otorgado bajo la Figura de Concesión Minera a la empresa Canteras Tacarigua CA, forma parte de la provincia metamórfica de la Fase Antímamo, Formación Las Brisas y Formación Las Mercedes, una importante unidad que conforma la parte inferior del Grupo Caracas, la cual atraviesa toda la Cordillera de La Costa y aflora extensamente entre el estado Miranda y el estado Yaracuy. En la zona de la concesión se observan secciones y un gran bloque de rocas metamórficas pertenecientes a las mismas formaciones indicadas anteriormente.

Consideraciones históricas: Dengo (1949) menciona por primera vez a la Formación Antímamo, designa la localidad tipo y la describe brevemente. Dengo

(1947) la había identificado como las calizas de la fase Zenda de la Formación Las Brisas. Aguerrevere y Zuloaga (1937) y Smith (1952) las consideraron como parte de la Formación Las Mercedes. Dengo (1951) la eleva a rango formacional. MacLachlan (1960), Feo-Codecido (1962), Wehrmann (1972), González (1972) extienden esta unidad hacia los estados Miranda, Aragua y Carabobo. González de Juana et al. (1980, p. 314) son los primeros en interpretar que esta unidad probablemente "representa un horizonte tectónico y no una unidad litoestratigráfica". Ostos et al. (1987), Navarro *et al.* (1988) redefinen esta unidad como Fase Antímamo, formando parte de su unidad litodémica de corrimiento que denominan como Complejo la Costa, que reúne adicionalmente a las fases Tacagua y Nirgua. Urbani y Ostos (1989) y Urbani *et al.* (1989) utilizan este nombre en los mapas geológicos de la zona de Puerto Cruz a Macuto, Distrito Federal, y El Palito-Morón-Valencia, estado Carabobo.

Localidad tipo: Dengo (1951) establece la localidad tipo a 0,5 km al Norte de Antímamo, Distrito Federal (Hoja 6847, escala 1:100.000, Cartografía Nacional), cuyos afloramientos hoy en día están totalmente cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas. Muy buenos afloramientos aún están visibles en las canteras de la quebrada Mamera.

Descripción litológica: Dengo (1951) describe esta Formación como un mármol masivo de grano medio, color gris claro, con cristales de pirita, alternando con capas de esquistos cuarzo micáceos, y asociadas con cuerpos concordantes de rocas anfibólicas, algunas con estructuras de "boudinage". El mármol está formado de un 85-95% de calcita, con cantidades menores de cuarzo detrítico, muscovita (2,5%), grafito (2,5%) y pirita (2%).

En la cartografía geológica de la zona de Puerto Cruz-Mamo, Talukdar y Loureiro (1982) reconocen su Unidad de anfibolitas y mármoles, que posteriormente Urbani y Ostos (1989) la denominan como Fase Antímamo, allí ocurre la asociación de anfibolita, mármol, esquistos calcáreo-muscovítico \pm grafitoso, esquistos cuarzo-muscovítico \pm granatífero, esquistos cuarzo-muscovítico-graucofánico-granatífero.

En la zona de El Palito, estado Carabobo, Urbani et al. (1989) mencionan la asociación de anfibolita granatífera-clinopiroxénica, anfibolita granatífera, eclogita, anfibolita epidótica-plagioclásica, mármol, cuarcita y esquistos cuarzo-plagioclásico-muscovítico.

Extensión geográfica: Se han descrito afloramientos aislados desde la zona de Antímamo, hacia el Oeste en San Pedro y hacia el Este hasta La Florida (afloramientos hoy cubiertos por el urbanismo de la ciudad de Caracas), continúa la zona de afloramientos en una franja en el valle de la quebrada Tacagua, y de ahí hacia el Oeste como una franja entre Mamo, Carayaca y Tarma, Distrito Federal. Los últimos afloramientos se han reconocido en la zona de El Palito, estado Carabobo.

Expresión topográfica: En las zonas donde afloran mármoles masivos y gruesos se nota una topografía abrupta, con estructuras kársticas superficiales.

Contactos: Esta formación presenta contactos estructuralmente concordantes con las formaciones adyacentes: Las Brisas y Las Mercedes. En la zona de Antímamo y Mamera, los lentes de mármoles y rocas anfibólicas, que alcanzan a veces grandes dimensiones longitudinales, se hallan embutidos en esquistos de diversos tipos, especialmente los correspondientes a la Formación Las Brisas (Cantisano, 1989).

Importancia económica: Los mármoles han sido explotados ampliamente para su uso en la construcción (agregados para concreto, rocas para gaviones y como lajas para recubrimiento de paredes).

b) Geología local

La cordillera del Litoral donde se emplaza el área de operaciones de Canteras Tacarigua CA emergió por plegamientos verticales ocurridos a finales del Cretáceo, hace setenta y ocho millones de años. En el Plioceno, hace doce millones de años, emergió La Cordillera del Interior. El emerger de los dos relieves produjo grandes hundimientos o fosas tectónicas y es así como se conforma la cuenca del Lago de Tacarigua y lo que es el propio lago.

Adicionalmente, la erosión producida por el curso de las aguas que se desprenden de la cordillera del Litoral hacia el Sur y desde la del Interior hacia el

Norte, en el transcurso de millones de años, rellenaron la fosa tectónica surgiendo así los valles que rodean el lago. Este proceso continúa en términos geológicos, ya que la cordillera del Litoral aún está emergiendo a un ritmo de un milímetro por año y por otra parte, la erosión de ambas cordilleras se mantiene, continuando el proceso de formación de los valles.

Desde el punto de vista geológico regional, se puede señalar que toda la zona está comprendida dentro de la cordillera de la costa (tramo central) y que las rocas que afloran, son metamórficas e ígneas. Esta es una zona donde hubo un intenso metamorfismo regional, revelado por las extensas zonas de serpentinitas, peridotitas serpentinizadas y granitos.

Localmente el material que se presenta en el área de operaciones minera de Canteras Tacarigua CA, está constituido por calizas, dolomitas y un gneis muy meteorizado, casi disgregado en su superficie y muy friable en zonas más frescas y superficiales.

Está laminado horizontalmente hasta el punto donde la delgadez de las láminas, dan un aspecto de paquetes esquistosos.

En el caso de la dolomita, esta se caracteriza por sus colores claros, uniformidad y cambios frecuentes de facies hasta calizas magnesianas y dolomitas silíceas. Genéticamente parecen constituir los clásicos depósitos asociados con eventos de dolomitización lenta y calizas plataformales en ambientes de alto contenido de magnesio.

Es importante destacar que en Venezuela se encuentran cuatro zonas, tres de las cuales están bajo explotación y representan los depósitos comerciales de dolomitas. En el estado Carabobo está entre Gañango y Patanemo, y en el afloran masas de mármoles dolomíticos de excelente calidad, asociados con la Formación Antímamo. En la región de Puerto Cabello, esta formación constituye una faja discontinua de rocas metamórficas estratigráficamente ubicada entre las formaciones Las Mercedes y Las Brisas. En esta zona, la Formación Antímamo puede reconocerse como una unidad diferenciable. Sus mármoles dolomíticos se presentan en lechos lenticulares y son claramente distintos de las rocas de Las Mercedes suprayacentes. Las mejores

localidades para el estudio de estas rocas son las canteras situadas a lo largo de la carretera Guaicamacuto-Patanemo. Aquí la unidad aflora en dos lentes de aproximadamente 1 Km. de longitud y espesor variable pero importante, separados estratigráficamente por un intervalo de materiales que contienen esquistos, cuarzo-moscovíticos-clorítico-granatíferos. Hasta el momento se han observado mármoles dolomíticos de similar pureza a lo largo del flanco Sur de la Cordillera. La secuencia estratigráfica en este lado de la serranía, pasa directamente de la Formación Las Brisas a la Formación Las Mercedes, sin las dolomitas blancas de la Formación Antímamo.

Los mármoles de la Formación Antímamo, tal y como se reconocen en la región de Puerto Cabello y más típicamente en Patanemo, son muy blancos, de grano grueso y dolomíticos. Están completamente recristalizados, sin rastros de texturas sedimentológicas. La mineralogía más característica es dolomita-tremolita-calcita. Las bandas ricas en cuarzo de los mármoles se asocian con calcita, tremolita y diópsido. Además de esas zonas, se han ubicado secuencias dolomíticas en las áreas de: La Concepción, Sur de la ciudad de Yaritagua, estado Yaracuy; Torrellero entre Sanare, Lara y Agua Blanca, Portuguesa y entre Guiria y Macuro, estado Sucre.

La secuencia estratigráfica del yacimiento comienza con 15 m de material meteorizado, suprayace 1 m de capa vegetal, infrayacen estratos intercalados de esquistos y arcillas de 20 m de espesor, seguidamente unas limolitas de color grises entre oscuras y claras, con estratificaciones planares y onduladas, es carbonática el estrato mide 7 m de espesor, por debajo de este estrato continua unas calizas dolomíticas con intercalaciones de óxido de hierro con un espesor de 3,2 m, luego un paquete de dolomitas blancas cristalizada, bien competentes de 4,6 m, a esta capa le infrayace un marcador esquistoso de color verde, para finalmente esta columna con dos paquetes de caliza masiva la primera gris clara competente con algunas intercalaciones dolomíticas de 6,5 m y 69 m de una caliza gris oscura masiva homogénea. El promedio del buzamiento del yacimiento es de 55°.

c) Geología estructural

El área minera de Canteras Tacarigua se emplaza en la Vertiente Norte de la Serranía del Litoral de la Cordillera de La Costa, específicamente en la Vertiente Norte del Cerro Palma de Vino: presenta dos estructuras, una caracterizada por relieve inclinado de ablación, correspondiente a vertientes bajas de montañas, comprendido entre las cotas 15 y 90, con una pendiente promedio de 40%, que converge de manera decreciente hacia un área plana de origen sedimentario con una pendiente inferior al 20%, enmarcada entre las cotas 2 y 25, esta área plana presenta un relieve modificado debido a la existencia en el pasado de un Vertedero de basuras a cielo abierto. En las vertientes Este y Oeste de la concesión existen unas terrazas de origen antrópico, producto de la evolución propia de la actividad de extracción del mineral a lo largo de varios años de explotación.

Desde el punto de vista geomorfológico y estructural, el paisaje va cambiando a medida que se modifica el factor pendiente y en este sentido se puede relacionar el conjunto analizado de planicie media suavemente ondulada, donde existen colinas, vegas y valles muy estrechos, área de lomerío medio quebrado y zonas de lomerío escarpado.

En el caso de la parte baja del área de concesión, es de planicie media suavemente ondulada con relieve de tipo colinoso, alternado con elevaciones y ligeras depresiones. La vega que se observa hacia la parte baja de la propiedad, es muy puntual y en ella se manifiesta una acumulación de material aluvial transportado por los drenes generalmente intermitentes, detectándose algunos coluviales con escurrimiento difuso, que han sido alterados, con la disposición de basuras y otros desechos y por estériles, producto de la actividad minera que se desarrolla en esta zona de La Ensenada.

La parte de lomerío medio quebrado se hace presente desde la zona media de esta área analizada hasta aguas arriba de la zona de contacto con la Carretera Nacional Puerto Cabello - Patanemo, donde la presencia de lomas y cerros se acentúa, manifestándose pendientes que oscilan entre 20 y 40%, que es lo que predomina en el

resto del paisaje. Estas lomas se conocen como cerros de la cordillera y laterales de las micro cuencas presentes.

La zona de lomerío escarpado corresponde a una unidad geomorfológicamente desarrollada sobre rocas donde predominan las calizas, las dolomitas y los gneises y está conformada por lomas con pendientes que oscilan entre 40 y 60%, donde los cerros tienden a ser más pronunciados y a caracterizarse por una forma típica donde se denotan los elevamientos y después la presencia de senos muy suaves, de recorrido relativamente corto, seguido nuevamente de cerros pronunciados, lo que da una configuración de lomas y cerros escarpados.

Estructuralmente el yacimiento presenta un buzamiento en promedio de 48° en los afloramientos inferiores del área de explotación de 58° promedio y en aumento en las zonas superiores del área de explotación, con respecto a la horizontal se puede ver un bloque en forma de franja o tablón rocoso, con familias de diaclasas y pequeñas fallas bien marcadas.

3.3.4 Productividad y equipos mineros

Existen algunos términos necesarios para la comprensión de la capacidad y rendimiento de los equipos en el área de la minería y construcción, tales como son, *loc. cit.* Navarro (2008):

- Capacidad de una máquina: Limitación de un equipo al momento de ejecutar determinada magnitud o volumen de trabajo en un plazo de tiempo determinado, se expresa en distintas unidades, siendo mayormente utilizadas m/h, m²/h, m³/h.
- Productividad teórica: Es aquella capaz de alcanzarse solo bajo excelentes condiciones de trabajo y estado técnico, sin interrupciones. Es el que brindan los fabricantes de los equipos en los catálogos de venta.
- Productividad real de un equipo: Aquella que puede desarrollar considerando condiciones reales y más usuales de trabajo para el operador y la máquina, donde se consideran interrupciones por múltiples causas (lluvia, mantenimiento, estado

técnico real, habilidades de los operadores, entre otras.). Siendo siempre inferior o igual a la productividad teórica o de fábrica.

- Disponibilidad física: Es una relación porcentual que establece la relación entre las horas de trabajo y disponibles que presenta un equipo o flota de equipos con respecto a las horas totales.
- Disponibilidad mecánica: Se expresa como una relación porcentual entre las horas trabajadas por un equipo o flota de equipos con respecto a las horas en reparación.
- Uso de la disponibilidad: Es una relación porcentual entre las horas trabajadas de un equipo o flota de equipos con respecto a las horas que se encuentra inactivo pero disponible para uso.

La empresa Canteras Tacarigua, C.A. posee una flota pequeña de equipos, de los cuales pretenden utilizar solo dos para las labores en el área de escombrera, un tractor CAT D8N, una retroexcavadora CAT 330L y una motoniveladora CAT 14G, de los cuales se enuncian sus especificaciones a continuación.

a) Tractor CAT D8N

Navarro (2008) describe el tractor como una máquina explanadora formada por un tren de rodaje (sistema de orugas) o sobre neumáticos, con órganos de trabajo conformados por una hoja topadora y su cuchilla colocada en la parte delantera. En el presente trabajo se estima el uso del tractor CAT D8N, cuyas especificaciones se detallan en la Figura 21 y Tabla 17.

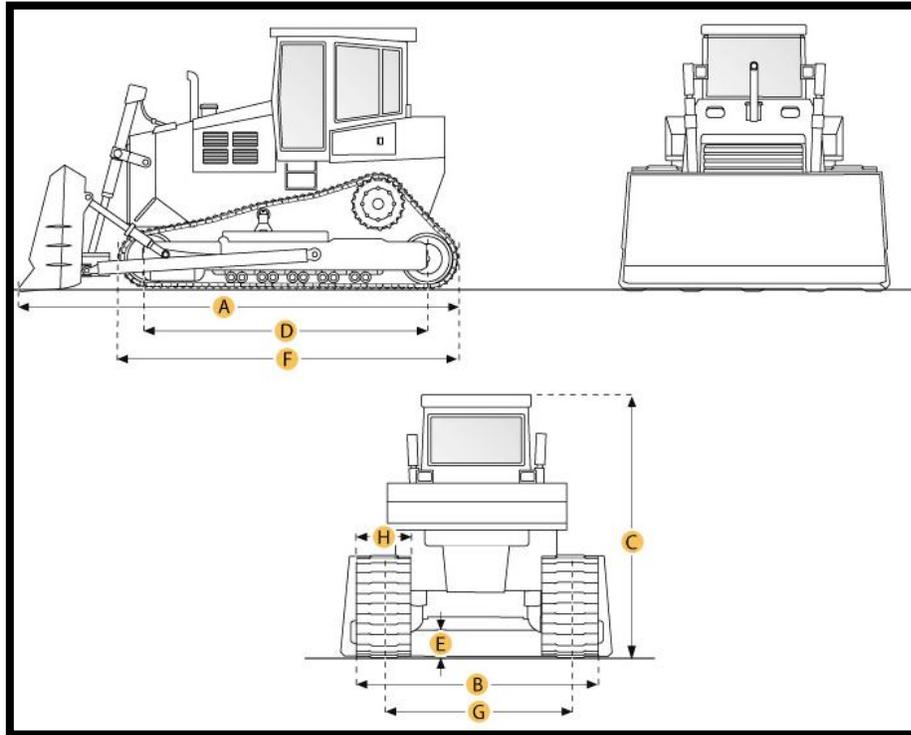


Figura 21: “Dimensiones tractor CAT D8N”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).

Tabla 17: “Dimensiones tractor CAT D8N”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.).

Especificaciones	Dimensiones
(A) Longitud de cuchilla	6.265 mm
(B) Anchura sobre las orugas	2.642 mm
(C) Altura hasta la parte superior de la cabina	3.430 mm
(D) Longitud de la oruga en tierra	3.200 mm
(E) Despeje desde el suelo	528 mm
(F) Longitud sin la hoja	4.954 mm
(G) Distancia entre los extremos de la oruga	2.083 mm
(H) Tamaño estándar de la oruga	560 mm

b) Retroexcavadora CAT 330L

Esta maquinaria es descrita por Navarro (2008) como un equipo de arranque-carga, diseñado para ser usado en la industria de la construcción y minería. El órgano de trabajo de la mencionada máquina se encuentra compuesto por la pluma o brazo principal, el *stick* o brazo secundario y el balde. Para efectos de los cálculos realizados en el presente trabajo se consideran las especificaciones del CAT 330L, cuyas características se muestran en la Figura 22 y Tabla 18.

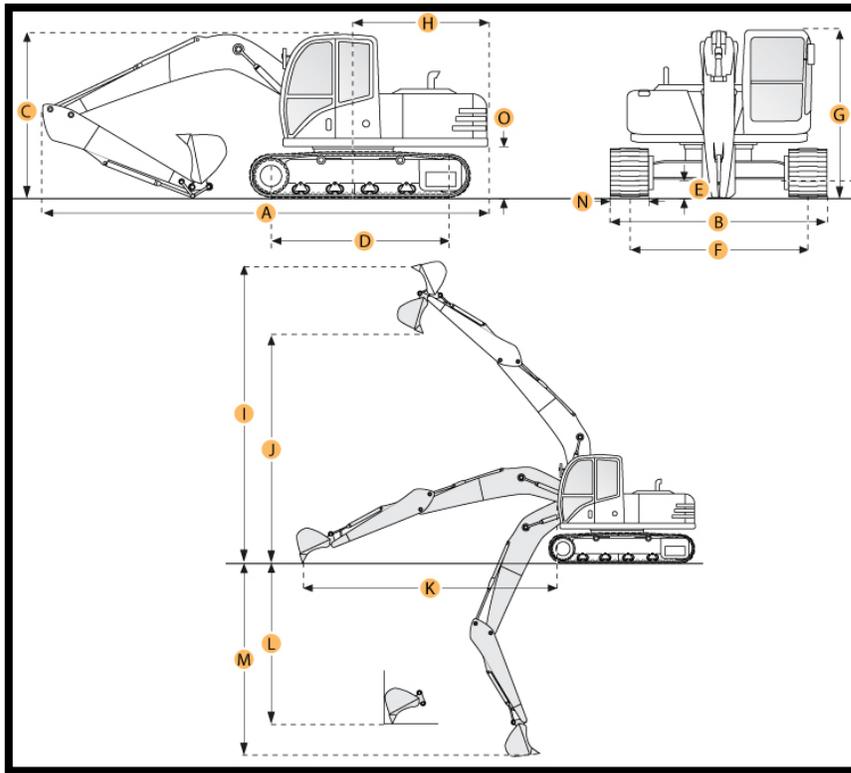


Figura 22: “Dimensiones retroexcavadora CAT 330L”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).

Tabla 18: “Dimensiones retroexcavadora CAT D8N”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.).

Especificaciones	Dimensiones
(A) Longitud de envío	11.080 mm
(B) Anchura sobre las orugas	3.340 mm
(C) Altura de envío	3.610 mm
(D) Longitud de la oruga en tierra	4.040 mm
(E) Distancia eje orugas-suelo	510 mm
(F) Distancia entre los sistemas oruga	2.590 mm
(G) Altura hasta la parte superior de la cabina	3.150 mm
(H) Radio de giro	3.500 mm
(I) Máxima altura de corte	10.770 mm
(J) Máxima altura de carga	7.600 mm
(K) Máximo alcance en suelo	11.620 mm
(L) Máxima profundidad de excavación vertical	7.230 mm
(M) Máxima profundidad de excavación	8.080 mm
(N) Tamaño estándar de la oruga	750 mm
(O) Distancia cabina-suelo	1.260 mm
Capacidad de balde	1,5 m ³

c) Motoniveladora CAT 14G

La motoniveladora es definida por Navarro (2008) como una máquina explanadora, sobre neumáticos, auto propulsada, destinada principalmente a la conformación de terrenos. Sus usos principales van desde el mantenimiento de vías y terrazas hasta apertura de cunetas. En el presente trabajo de investigación se consideran las características del CAT 14G, la especificaciones de la misma se muestran en la Figura 23 y Tabla 19.

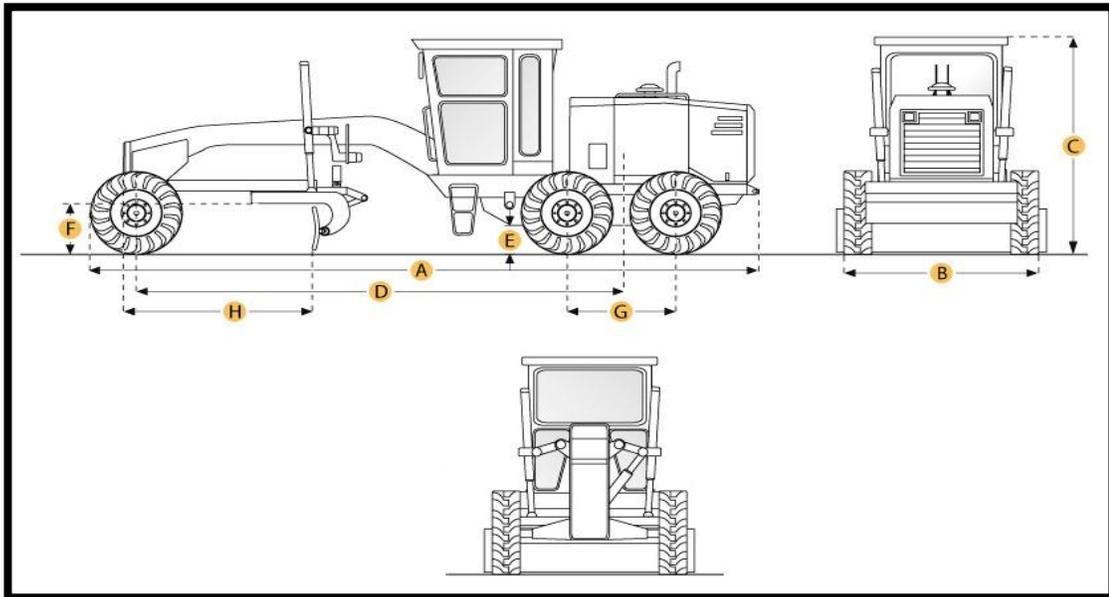


Figura 23: “Dimensiones motoniveladora CAT 14G”. Tomado de Ritchie Specs (s.f.).

Tabla 19: “Dimensiones motoniveladora CAT 14G”. Modificado de Ritchie Specs (s.f.).

Especificaciones	Dimensiones
(A) Longitud total	9.220 mm
(B) Anchura sobre los neumáticos	2.840 mm
(C) Altura hasta la parte superior de la cabina	3.570 mm
(D) Distancia entre ejes	6.450 mm
(E) Distancia cabina-suelo	Según neumáticos
(F) Altura tope de cuchilla-suelo	Según ángulo cuchilla
(G) Distancia central entre neumáticos de cabina	1.530 mm
(H) Base de la cuchilla	2.870 mm

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En la siguiente sección se especifica la metodología aplicada durante el proceso de investigación y desarrollo del presente trabajo.

4.1 Tipo de investigación

Esta investigación desarrollada es de campo correlacional-descriptiva debido a que se realiza el análisis sistemático de un problema, con el propósito de describirlos entendiendo sus factores constituyentes y su ocurrencia; ello puede observarse al correlacionarse datos geológicos y técnicos para la adecuación de una escombrera que tenga los parámetros básicos de seguridad y que pueda almacenar la mayor cantidad de estéril sin marcar un fuerte contraste con la topografía del sitio ni representar un peligro potencial para los trabajadores que hacen vida en ella.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo no experimental transeccional debido a que no hay manipulación intencional de las variables, además de que la recolección de datos se hace en un tiempo único y definido para el diseño de la escombrera.

4.3 Técnicas e instrumentos

Las técnicas e instrumentos utilizados durante la recopilación de, análisis de datos y diseño del plan de adecuación de la escombrera son:

- Recopilación de información geológica (regional, local y estructural) tanto teórica como en campo del área de la cantera, estimándose la elaboración de un RMR que permita cuantificar la calidad del macizo rocoso.
- Sondeo de trabajos, documentos, reportes y ensayos que desarrollen, adecuen o recuperen escombreras, con la finalidad de reflexionar los criterios considerados en dichas referencias.

- Ejecución de ensayos de laboratorio que permitan definir las características del material estéril y su comportamiento bajo condiciones de similares a las generadas en una escombrera, siendo considerados para ello análisis granulométricos, ensayos de resistencia al corte, ensayos de soporte de california, ensayos de gravedad específica y ensayos de proctor modificado.
- Estimación del volumen de la escombrera, en función de la cantidad de residuos a ser generados en la cantera y considerando las limitaciones topográficas.
- Calcular el factor de seguridad de la escombrera producto de su magnitud y características físicas determinadas en los ensayos de comportamiento del sustrato y del material que la compone.
- Diseño del sistema de drenajes, de modo tal que permitan la libre y rápida circulación de las aguas a través de la escombrera sin que afecte su estabilidad, basado en datos hidrometeorológicos de la zona de estudio.
- Establecer método de vertido, en función de una correcta adecuación y considerando el uso de los equipos dispuestos por Canteras Tacarigua, C.A. para trabajar en el área.
- Generar plan de mantenimiento de la escombrera, siendo especificados los tiempos en los cuales serán empleados los equipos y que actividad desarrollarán en la misma.
- Modelamiento digital, con el uso de un software minero especializado para ser representado de forma gráfica y más comprensible.

4.4 Análisis de datos

Para una apropiada selección de los equipos mineros existen ciertos criterios que deben tomarse en cuenta.

Para el caso del estudio de rendimiento de un tractor es necesario considerar ciertas variables, dentro de las cuales se encuentran las dimensiones de la hoja, potencia del motor, distancia de acarreo y los coeficientes de oposición al movimiento del mismo. A continuación en la Ecuación 36, se muestra la fórmula tomada de Navarro (2008), la cual permite estimar la productividad de un tractor:

$$\text{RENDIMIENTO} = 60 * \frac{CAP * \varepsilon}{t_c} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Donde:

RENDIMIENTO = Producción real del tractor por unidad de tiempo (m³/h).

ε = Disponibilidad física (%)

t_c = Tiempo de ciclo (s)

CAP = Capacidad de la hoja del tractor (m³)

Siendo CAP calculado según se indica en la Ecuación 37:

$$CAP = \frac{LH^2}{2 * \tan(\alpha)} \quad \text{Ecuación (37)}$$

Donde:

L = Largo de la hoja del tractor (m).

H = Altura de la hoja del tractor (m).

α = Ángulo de reposo del material (°)

Mientras que para el cálculo del t_c se utiliza la siguiente fórmula postulada en

la Ecuación 38:

$$t_c = \frac{d * 60}{Vm_f} + \frac{d * 60}{Vm_i} \quad \text{Ecuación (38)}$$

Donde:

d = Distancia de acarreo

Vm_f = Velocidad media final (km/h)

Vm_i = Velocidad media inicial (km/h)

Calculándose a su vez las velocidades medias (tanto inicial como final) de la

siguiente manera (ver Ecuación 39):

$$Vm_x = 0,67 * \left(\frac{274 * Hp * \varepsilon}{R_c + R_s + R_{rod}} \right) \quad \text{Ecuación (39)}$$

Donde:

R_c = Resistencia de carga (kg).

R_s = Resistencia a la pendiente (kg).

R_{rod} = Resistencia a la rodadura (kg).

Hp = Potencia del motor (Hp).

ε = Constante de rendimiento del equipo (Proveído por el fabricante).

Utilizándose las siguientes fórmulas para determinar los valores de resistencias

(ver Ecuaciones 40, 41 y 42):

$$R_c = CAP * \gamma \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$R_s = W * s \quad \text{Ecuación (41)}$$

$$R_{rod} = W * C_{rr} \quad \text{Ecuación (42)}$$

Donde:

W = Peso del equipo (kg).

S = Pendiente (% , en caso de ir a favor equivale a 0).

γ = Densidad del Material (kg/m³).

C_{rr} = Coeficiente de rodadura.

Por su parte, el cálculo de la productividad de la retroexcavadora se realiza simplemente considerando variables tales como capacidad del balde, factor de llenado y disponibilidad física, según Navarro (2008) se recomienda el uso de la Ecuación 43 para su cálculo:

$$\text{RENDIMIENTO} = \frac{C_b * F * D_f}{t_c} * 60 \quad \text{Ecuación (43)}$$

Donde:

RENDIMIENTO = Producción real de retroexcavadora por unidad de tiempo (m³/h).

C_b = Capacidad de balde (m³).

F = Factor de llenado (%).

D_f = Disponibilidad Física (%).

t_c = Tiempo de ciclo. (Minutos, se estima para retroexcavadoras medianas en 0,33 min).

4.5 Procedimiento experimental

Los medios e instrumentos utilizados para la puesta en marcha de las actividades son principalmente hojas de cálculo, dibujo asistido por computadora y de planificación de minas; todos estos empleados en el cálculo y diseño de los parámetros geotécnicos, dimensionales y de drenaje de la escombrera. En la Figura 24 se muestra el esquema metodológico empleado en la investigación, mostrándose entre paréntesis el orden en el cual fue desarrollado.

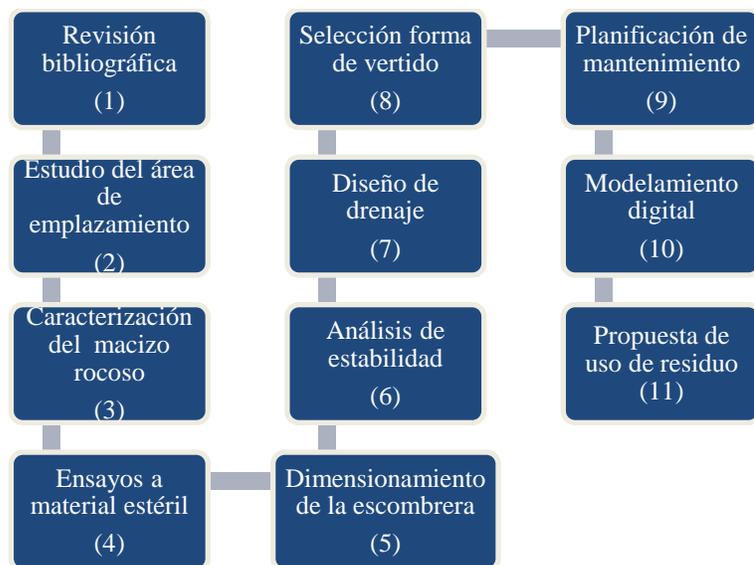


Figura 24: “Esquema metodológico”.

En base al esquema metodológico representado en la Figura 24 y sus números asignados, se genera una vinculación directa de los parámetros con el cumplimiento de los objetivos del trabajo, lo cual se ilustra en la Tabla 20.

Tabla 20: “Relación esquema metodológico – objetivos específicos”.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS/METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cuantificar el volumen de estéril a generar durante la vida útil de la cantera	X	X				X			X		X
Analizar la ubicación actual de la escombrera considerando criterios técnicos y ambientales	X	X	X	X						X	X
Establecer un sistema de control de aguas superficiales considerando el sistema de drenajes naturales y las características pluviométricas de la zona	X	X			X			X			
Calcular los parámetros del diseño final de la escombrera	X		X	X	X	X	X		X	X	
Definir plan de adecuación y secuencia de desarrollo de la escombrera	X	X	X	X			X	X	X		
Determinar el plan de mantenimiento operativo de la escombrera	X				X		X	X			
Elaborar un modelo computarizado del diseño final de la escombrera	X	X			X	X	X		X	X	

Según la Figura 24 y la Tabla 20, se estima que tras desarrollarse el esquema metodológico se obtendrá la siguiente información:

- a) Cuantificar el volumen de estéril a generar durante la vida útil de la cantera: Esta información ayudará a determinar las dimensiones que abarcará la escombrera, de modo tal que pueda almacenar la mayor cantidad de material posible, tomando como un máximo el residuo total estimado.
- b) Analizar la ubicación actual de la escombrera y proponer posible nuevo emplazamiento considerando criterios técnicos y ambientales: El manejo de esta variable viene definido por la cantidad de material a almacenar, el cual, una vez estimado definirá si la ubicación propuesta es la más idónea o debe considerarse otra. Por lo cual, se estima a través del levantamiento topográfico de determinar la extensión del área destinada como escombrera.
- c) Establecer un sistema de control de aguas superficiales considerando el sistema de drenajes naturales y las características pluviométricas de la zona: Para evitar la erosión de los taludes se busca la canalización de las corrientes de agua, la cual debe seguir circulando en sus cursos naturales una vez abandonada el área de laborero de la cantera.
- d) Calcular los parámetros del diseño final de la escombrera: En busca de la estabilidad de los taludes, se determinará mediante ensayos de laboratorio los ángulos de cohesión, fricción, densidad húmeda y en seco del material a ser depositado en la escombrera.
- e) Definir plan de adecuación y secuencia de desarrollo de la escombrera: Una vez realizado el levantamiento topográfico del volumen de estéril actualmente depositado, se determinará las características del trabajo que deben realizar los equipos de minería con la finalidad de realizar la migración de botadero a escombrera.
- f) Determinar el plan de mantenimiento operativo de la escombrera: Se determinará durante esta fase la forma y tiempo en que debe hacerse mantenimiento a la escombrera con la finalidad de que los parámetros ya establecidos puedan durar en el tiempo.
- g) Elaborar un modelo computarizado del diseño final de la escombrera: Una vez recopilada todas la variables, se procederá a desarrollar mediante un software

4.7 Presentación y análisis de los resultados

4.7.1 Análisis del emplazamiento

Siendo el emplazamiento de la escombrera un área la cual debe cumplir con ciertas características tanto de estabilidad como de competencia geológica, se procede a realizar un análisis de múltiples variables importantes al momento de definir si un sustrato es apto para soportar grandes volúmenes sin presentar deformación. En base a lo anterior, se sigue el siguiente esquema metodológico (ver Figura 26) para analizar el emplazamiento:

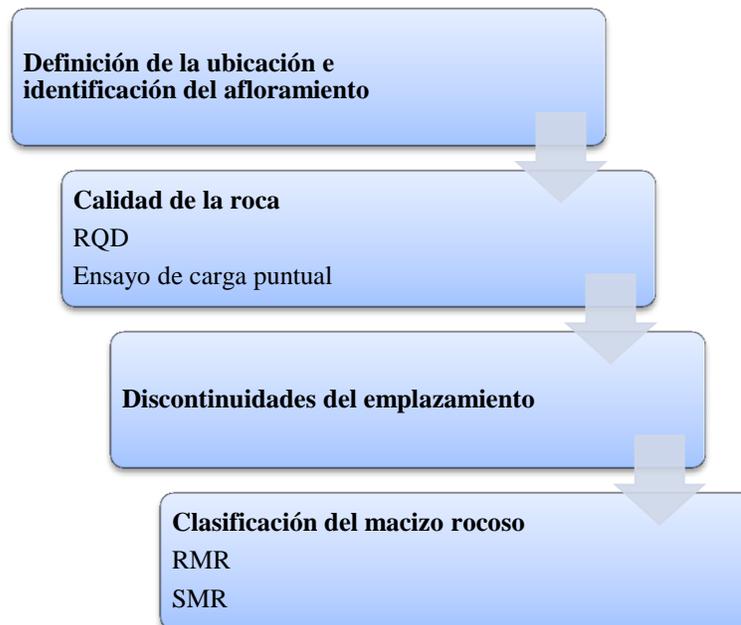


Figura 26: “Procedimiento de análisis del emplazamiento”.

a) Definición de la ubicación e identificación del afloramiento

Tomando en cuenta que Canteras Tacarigua, C.A. ya dispone de una ubicación para sus estériles, el análisis comienza por evaluar si dicha área puede considerarse adecuada para soportar el residuo a largo plazo.

Siendo predominante en el área de concesión el relieve topográfico de montaña (común de la Costa venezolana) y estando ubicada la zona de botadero en una media ladera de la formación montañosa en un desvío de la ruta de acceso hacia el frente dolomítico, además alejada del afloramiento de interés económico para la empresa, lo mencionado previamente se corrobora con el trabajo presentado por Gómez y Mayora (2006), quienes delimitaron los contactos entre la Unidad de Mármol (UM) y la Unidad Esquistosa (UECAM). Se anexa en la Figura 27 los contactos previamente mencionados.

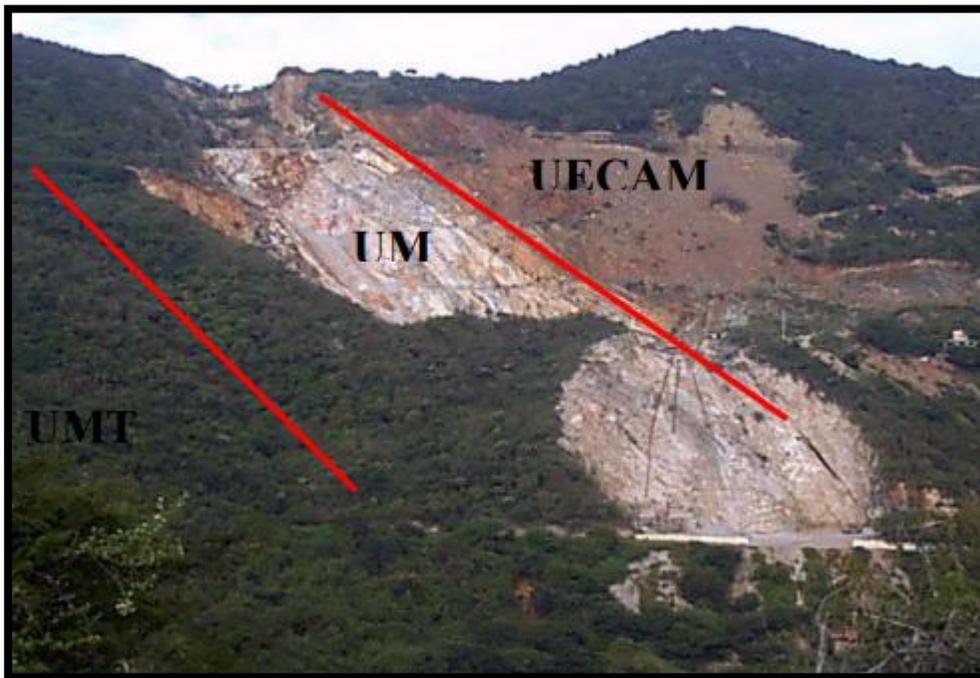


Figura 27: “Contactos de la Unidad de Mármol”. Tomado de Gómez y Mayora (2006)

La ubicación actual de la escombrera se encuentra en la definida por Gómez y Mayora (2006) UECAM por el flanco más alejado de UM. Esta área esquistosa de

aproximadamente 4,16 Ha, posee una pendiente topográfica natural de 50° con respecto al plano horizontal. Podría describirse el lugar además, como una mezcla entre topografía natural y excavación, debido a que ha sido afectado por décadas de explotación minera sin racionalidad alguna, siendo notablemente observable por las alturas del talud en el afloramiento y la disposición que se le ha dado al residuo de las labores para generación de lajas ornamentales.

En la descripción de la ubicación, también se identifican las características geológicas que enmarcan el macizo rocoso. La roca en estudio es procedente de un complejo proceso de metamorfismo regional de contacto de carácter orogénico, se identifica un esquistos color pardo, cuarzoso-anfibolítico-micaseo, textura nematoblástica, estructura metamórfica con foliaciones planares laminares, moderadamente dura. Se aprecia por tanto que el afloramiento consiste de una roca anfibolítica de textura esquistosa y apreciable meteorización, identificándose por su contenido de cuarzo y micas de carácter moscovítico.

Gómez y Mayora (2006) mencionan que en la zona oriental del afloramiento de esquistos (ubicación actual de la escombrera) la roca fresca es de color gris claro a oscuro, que meteoriza a ocre verdoso y gris oscuro con tonalidades rojizas debido a la presencia de materiales oxidados, describen como de grano fino a medio con tamaño promedio de 0,2 mm, con planos de foliación bien desarrollados.

Se identifica una foliación con rumbo N60E, buzamiento de 55° hacia el Noreste. Al tomar mediciones de las diaclasas, se observa la presencia de solo una familia, con un rumbo N50E y buzamiento de 65° hacia el Noreste; las mismas se repiten como se describió anteriormente con una frecuencia de 1,4 metros, lo que permite determinar que el afloramiento está fracturado en bloques de tamaño grande (1 a 3 discontinuidades cada metro cúbico), el espaciado en las diaclasas se encuentra en el rango de 300 mm permitiendo clasificarlas como medianamente juntas; además se identifica una continuidad superior a los 20 metros y el relleno entre las diaclasas se cuantifica como de espesor menor a 5 mm.

Al momento de realizar las observaciones que permitan estimar el comportamiento hidrogeológico del yacimiento, no puede apreciarse humedad en las

paredes frescas ni meteorizadas del afloramiento; además según la información suministrada por la empresa, hasta el momento no se ha registrado agua en los barrenos que se han perforado en el área, por tanto puede inferirse que no hay presencia importante o nivel freático en los niveles trabajados actualmente.

Para que se pudiese observar adecuadamente las condiciones topográficas del área de estudio, además de la fotografía, se empleó un software minero libre en el cual se cargó la información levantada por un GPS diferencial, se generaron para ello un aproximado de 1672 puntos, los cuales se triangularon para obtener el modelado de la superficie (ver Figura 28, Figura 29 y Figura 30).

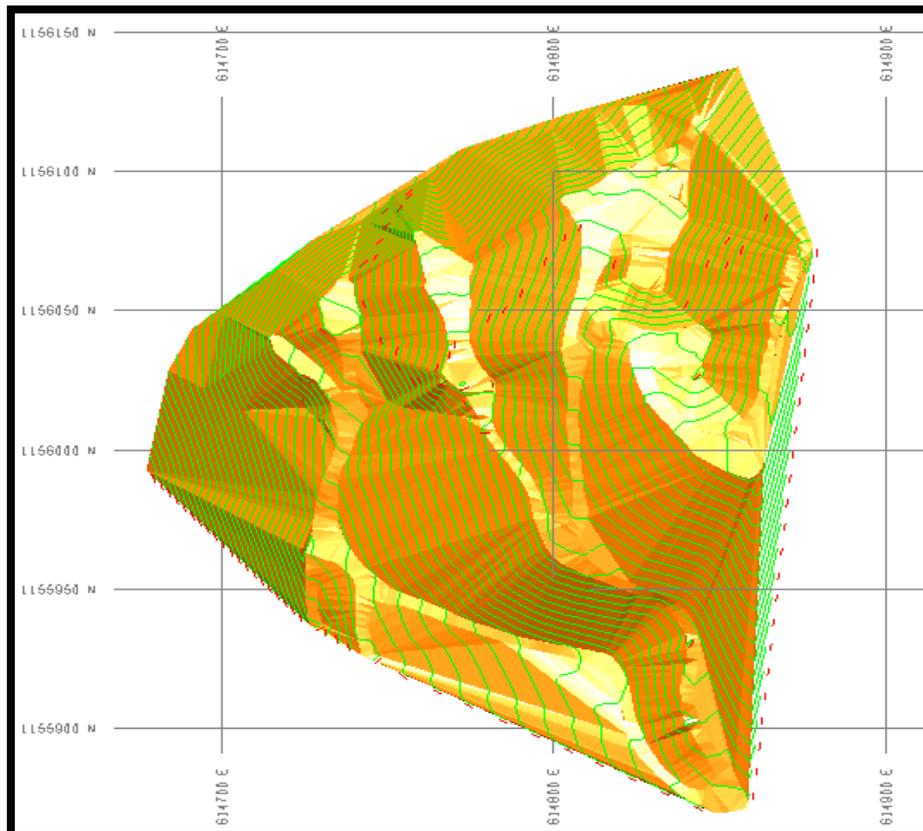


Figura 28: “Vista planta topografía actual”.

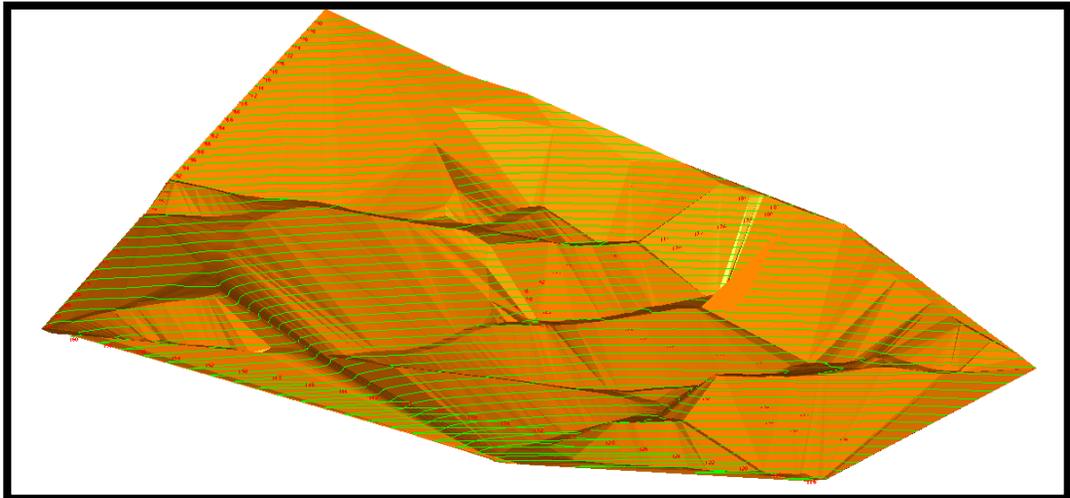


Figura 29: “Vista en perspectiva Suroeste de la topografía actual”.



Figura 30: “Vista actual área de botadero”.

Para estimar el volumen de material a ser usado en las labores de generación de lajas artesanales, se ha determinado un plan de explotación referencial que le permita

a la empresa Canteras Tacarigua, C.A. organizar el método de aprovechamiento en esta área de la concesión y así poder evaluar la cantidad de material a ser extraído del macizo rocoso. Se propone un sistema de minado a cielo abierto el cual consta de 3 bancos de 10 m de altura que comienzan desde la cota 180 msnm hasta la cota 210 msnm, con ángulos de talud de 75° ; presentando la propuesta además, anchos de berma de 6 m los cuales tendrán la finalidad de permitir acceso a un tractor de orugas para su mantenimiento. Para la representación de las características definidas en la propuesta de diseño, se utilizó el ya mencionado software minero libre, en el cual se utilizó la información topográfica previamente cargada, lo cual permitió estimar un volumen total de extracción de material de poco más de 35.100 m^3 en reservas. En las figuras a continuación de ilustran las condiciones topográficas del diseño que se propone (ver Figura 31 y Figura 32).

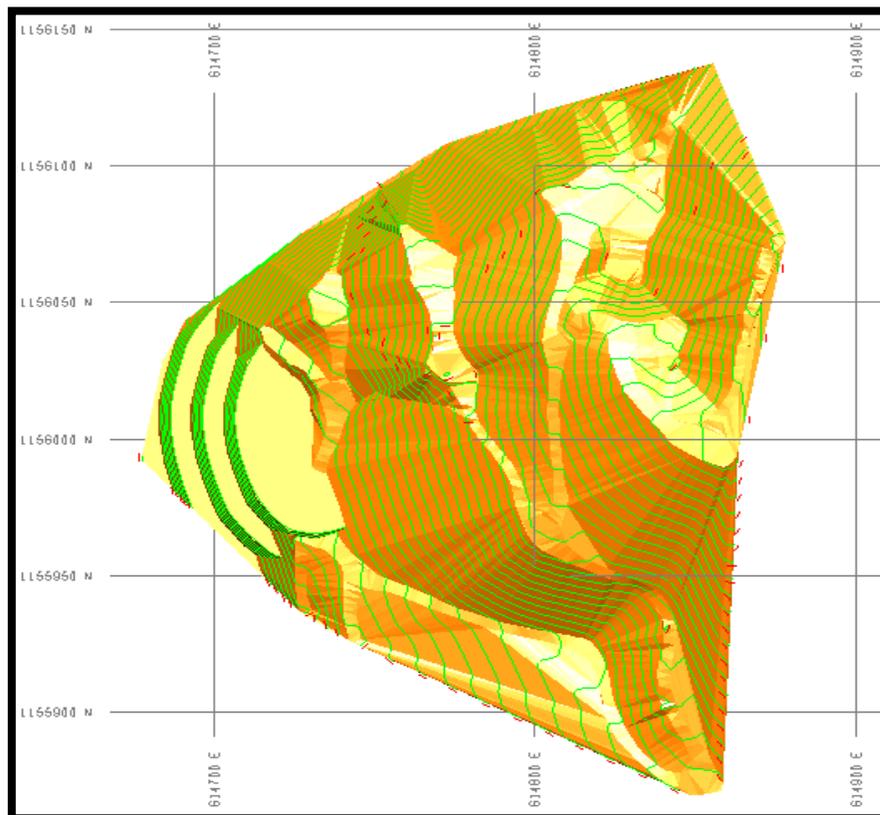


Figura 31: “Vista planta topografía modificado”.

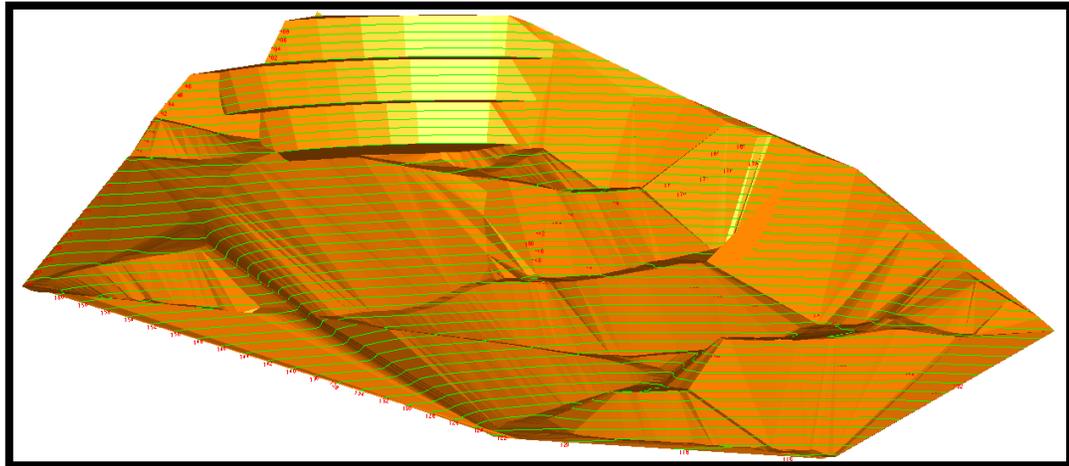


Figura 32: “Vista en perspectiva Suroeste de la topografía modificada”.

b) Calidad de la roca

Con base en las observaciones geológicas de campo y los ensayos de laboratorio realizados, se puede determinar el comportamiento de la roca y su competencia para el basamento de la escombrera.

Como en todo estudio del que se requiera el análisis de masas rocosas, antes de probar la competitividad mecánica del material mediante ensayos que requieran de toma de muestras y su traslado, es necesario realizar pruebas *in situ*, las cuales permitirán determinar (antes de enviar muestras al laboratorio) un comportamiento aproximado del material lo cual garantice la inversión en su ensayo.

En este caso, para conocer la calidad del macizo rocoso *in situ*, se realizó una clasificación del RQD, todo esto con la finalidad de considerar no solo criterios de comportamiento mecánico de la roca sino también geológicos y presencia de discontinuidades.

Por motivos económicos y para lograr una estimación que no requiera de una preparación de muestra, en seguimiento del procedimiento de estimación del RQD “*in situ*”, se decidió estudiar un área del frente del afloramiento no afectado por voladuras y que presentase bajos niveles de meteorización toda vez que fuere representativo del macizo. En dicho espacio se escogió un área de 5 metros para la

observación y medición de las familias de diaclasas presentes y determinar el número de juntas (J_v) (ver Figura 33 y Figura 34).

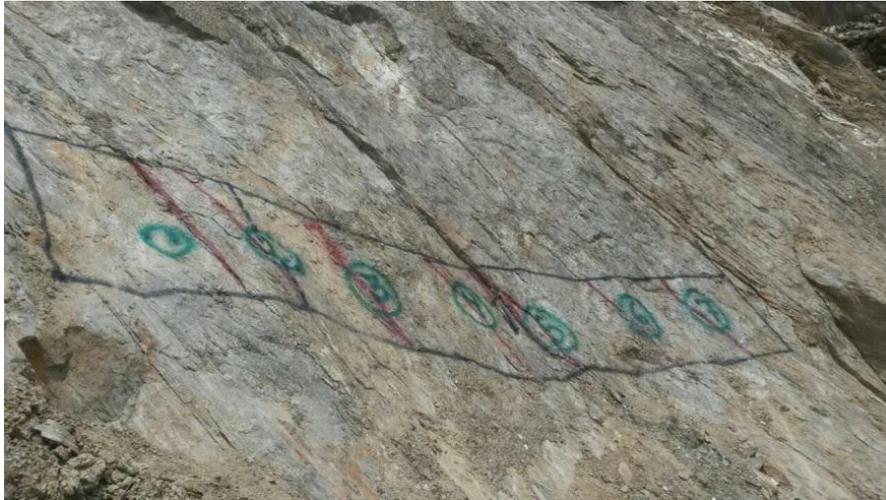


Figura 33: “Área para determinación RQD”.



Figura 34: “Determinación RQD”.

Una vez examinados los 5 metros previamente establecidos se determinó la existencia de 7 diaclasas, todas de la misma familia y con orientación N50E65N, para lo cual y en cumplimiento de la Ecuación 46 que postula:

$$Jv = \frac{\text{n}^\circ \text{ de discontinuidades}}{\text{longitud medida (m)}} \quad (46)$$

Sustituyendo valores en la Ecuación 37 se tiene que:

$$Jv = \frac{7}{5}$$

Por tanto:

$$Jv = 1,4$$

Entonces como $Jv \leq 4,5$ se cumple que el $RQD = 100$.

Por otra parte, se consideró realizar el análisis de resistencia a la compresión simple mediante ensayos de carga puntual, las características de las probetas fueron definidas según los criterios presentes en el aparte 3.2.2 (a) del Capítulo III de este trabajo. Cabe destacar que el ensayo se efectuó en 20 muestras (tal como se muestran en la Figura 35) y fue realizado en sentidos perpendicular y paralelo a la foliación, obteniéndose así los valores según cada caso (ver Tabla 21).



Figura 35: “Muestras a ensayar”.

Tabla 21: “Resultados ensayos de carga puntual”.

Muestra	Tipo	Tipo de falla	D (mm)	W (mm)	De ² (mm ²)	P. Carga Rot (Lbf)	P. Carga Rot. (N)	Is (MPa)	F (factor)	Is 50 (MPa)	C (factor de tabla)	UCS (Mpa)
1	F	C	50,45	75,55	4.852,95	2.292,00	10194,82	2,10	1,16	2,44	23	56,09
2	F	C	50,30	74,20	4.752,06	2.256,00	10034,69	2,11	1,16	2,44	23	56,12
3	F	C	40,12	75,10	3.836,29	2.063,00	9176,22	2,39	1,10	2,63	21	55,31
4	F	C	40,35	65,15	3.347,10	1.934,00	8602,43	2,57	1,07	2,74	21	57,63
5	F	C	50,13	75,10	4.793,45	2.293,00	10199,26	2,13	1,16	2,46	23	56,66
6	F	C	40,33	70,23	3.606,29	2.039,00	9069,47	2,51	1,09	2,73	21	57,35
7	F	C	50,77	70,25	4.541,13	2.195,00	9763,36	2,15	1,14	2,46	23	56,56
8	F	C	50,66	70,40	4.540,96	2.308,00	10265,98	2,26	1,14	2,59	23	59,47
9	F	C	40,52	74,51	3.844,10	2.134,00	9492,03	2,47	1,10	2,72	21	57,13
10	F	C	42,31	70,13	3.777,96	2.086,00	9278,53	2,46	1,10	2,70	21	56,60
11	//	C	40,75	71,23	3.695,73	1.402,00	6236,10	1,69	1,09	1,84	21	38,69
12	//	C	50,65	72,89	4.700,65	1.502,00	6680,90	1,42	1,15	1,64	23	37,68
13	//	C	40,65	75,88	3.927,34	1.395,00	6204,96	1,58	1,11	1,75	21	36,73
14	//	C	40,23	65,38	3.348,92	1.407,00	6258,34	1,87	1,07	2,00	21	41,91
15	//	C	40,67	64,62	3.346,19	1.331,00	5920,29	1,77	1,07	1,89	21	39,67
16	//	C	50,38	70,56	4.526,13	1.406,00	6253,89	1,38	1,14	1,58	23	36,32
17	//	C	50,45	72,24	4.640,33	1.360,00	6049,28	1,30	1,15	1,50	23	34,46
18	//	C	50,32	74,61	4.780,22	1.554,00	6912,19	1,45	1,16	1,67	23	38,48
19	//	C	40,72	70,56	3.658,28	1.338,00	5951,42	1,63	1,09	1,77	21	37,22
20	//	C	40,88	65,54	3.411,36	1.243,00	5528,86	1,62	1,07	1,74	21	36,50

Según se muestra en la Tabla 21, se obtienen los promedios de valores que se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22: “Relación carga puntual – compresión simple”.

Promedio		
Is (MPa)	Is 50 (MPa)	UCS (Mpa)
1,94	2,16	47,33

c) Discontinuidades del emplazamiento

Una vez propuesto el diseño previamente descrito, se procede a estimar las condiciones cinemáticas de estabilidad del mismo, a través de un análisis con el uso de una red estereográfica de Wulf, en la cual se exponen sus sentidos de foliación y buzamiento, diaclasas registradas, así como la representación espacial de los taludes de diseño propuestos. A continuación se muestra el proceso de identificación de discontinuidades (Figura 36).



Figura 36: “Levantamiento de discontinuidades”.

Seguidamente en la Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los valores de foliación y diaclasamiento registrados en el cimienta rocoso de la escombrera.

Tabla 23: “Medidas de foliación”.

FOLIACIÓN			
Ubicación		Rumbo	Buzamiento
Este	Norte		
614.746	1.156.021	N60E	55N
614.762	1.156.019	N59E	53N
614.752	1.155.967	N60E	54N
614.779	1.155.947	N62E	52N
614.791	1.155.911	N62E	55N
614.790	1.156.030	N62E	56N
614.800	1.155.926	N59E	55N

Tabla 24: “Medidas de diaclasas”.

DIACLASAS			
Ubicación		Rumbo	Buzamiento
Este	Norte		
614.802	1.156.041	N49E	62N
614.792	1.155.992	N50E	67N
614.778	1.155.940	N45E	65N
614.726	1.156.025	N50E	66N
614.795	1.155.900	N47E	65N
614.802	1.155.932	N50E	64N
614.735	1.155.980	N52E	66N

Las medidas realizadas en campo y mostradas en la Tabla 23 y Tabla 24 se muestran representadas en una red estereográfica de Wulf (

Figura 37) con la finalidad de mostrar las familias de diaclasas predominantes y la dirección de foliación preferencial del macizo rocoso.

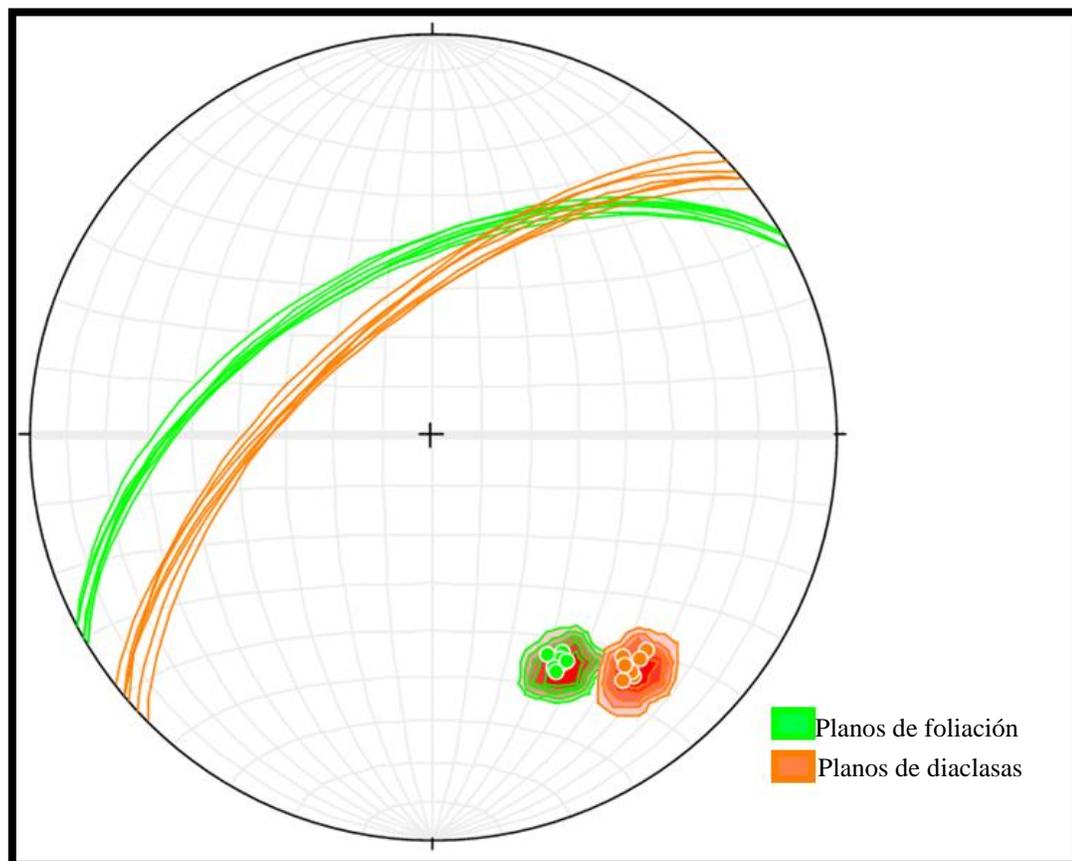


Figura 37: “Representación general de discontinuidades en red de Wulf”.

De la red estereográfica de Wulf mostrada en la Figura 37 se identifica la dirección preferencial de foliación y una sola familia de diaclasas cuyas características se muestran en la Tabla 25 y se representan en la red estereográfica de Wulf mostrada en la Figura 38.

Tabla 25: “Variables usadas en red estereográfica”.

ID PLANO	RUMBO	BUZAMIENTO
Taludes	N12W	70N
Foliación	N60E	55N
Diaclasas F1	N50E	65N

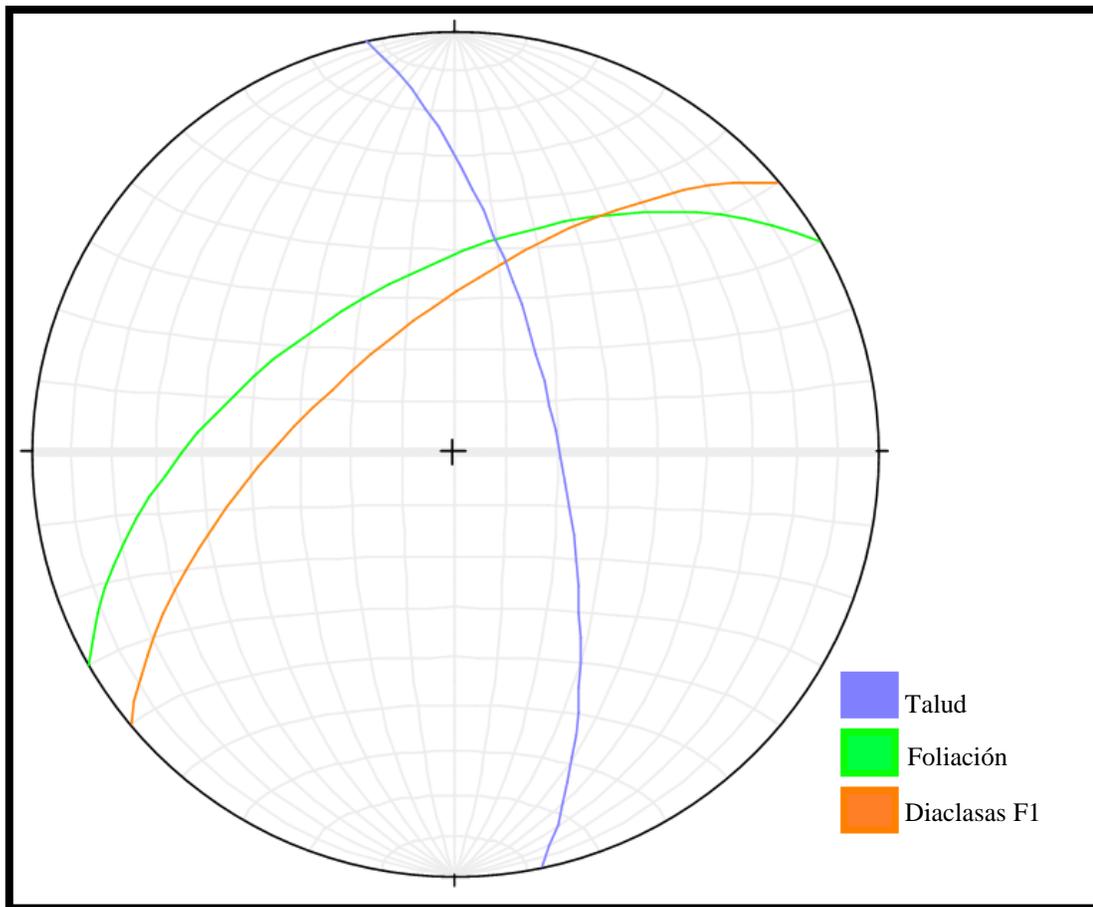


Figura 38: “Representación de discontinuidades en red de Wulf”.

Tal como puede observarse en la Figura 38, no existe posibilidad de falla planar ni de volcamiento al no coincidir la dirección de los rumbos de la foliación o

diaclasas con las del talud, sin embargo, existe la posibilidad cinemática de que ocurra falla tipo cuña ya que la línea de intersección de los planos de foliación y diaclasas poseen una inclinación de menor ángulo con respecto a un plano horizontal que el talud y en el mismo sentido.

Para descartar la posibilidad de falla tipo cuña, es necesario efectuar un estudio de las condiciones mecánicas de estabilidad, para lo cual se debe conocer el ángulo de fricción del macizo (Φ), cuyo valor debe ser mayor al contrastarse con el ángulo de la línea de intersección entre los planos de foliación y estratificación ($\alpha_{I_{ef}}$). En base a la relación mencionada anteriormente, puede observarse que:

$$\Phi = 34^\circ$$

$$\alpha_{I_{ef}} = 29^\circ$$

Por tanto se cumple que:

$$\Phi > \alpha_{I_{ef}}$$

Lo indicado previamente garantiza la estabilidad mecánica a falla tipo cuña, por tanto puede garantizarse una resistencia por parte del macizo a cualquiera de los patrones más comunes de falla.

d) Clasificación del macizo rocoso

Posterior a la definición de la ubicación, la identificación de las discontinuidades y de la calidad de la roca, se procedió a clasificarlo por el método de Bieniawski (1989), el cuál según lo plasmado en el Capítulo III, evalúa multicriterios entre los que se mencionan resistencia a la compresión simple, grado de fracturación (RQD), espaciamiento de las discontinuidades, estado de las discontinuidades, presencia de agua, entre otras.

Evaluando todas las variables recomendadas, tanto en campo como en laboratorio se obtuvo la clasificación indicada en la Tabla 26.

Tabla 26: “Resultados clasificación de Bieniawski”.

Parámetros		Resultado
Resistencia de la roca intacta (MPa)	Compresión simple	47,33
VALOR		4
RQD (%)		100
VALOR		20
Espaciado de juntas (mm)		338
VALOR		10
Condición de juntas		Ligeramente rugosas, moderadamente abiertas entre 1 y 5 mm, persistencia de las discontinuidades muy alta > 20 m. Relleno de las discontinuidades blando y ligeramente meteorizado.
VALOR		13
Aguas subterráneas		Totalmente seco
VALOR		15
TOTAL RMR		62
Clase / calidad		II / Buena

Luego de ejecutada la clasificación del macizo y haber obtenido una ponderación bastante favorable según el *RMR*, se procede a determinar el *SMR*, el cual según las Ecuaciones 7, 8 y 9 postuladas en el aparte 3.2.2 (d) del Capítulo III se tiene lo mostrado en la Tabla 27:

Tabla 27: “Coeficientes para *SMR*”.

F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
0,15	1	-50	8

Posteriormente haciendo uso de la Ecuación 6 y los coeficientes presentes en la Tabla 27, se concluye según lo mostrado en Tabla 28.

Tabla 28: “Estabilidad según *SMR*”

<i>SMR</i>	Caso	Descripción	Estabilidad	Roturas	Tratamiento
62,5	II	Buena	Buena	Algunos Bloques	Ocasional

4.7.2 Análisis del estéril

Para determinar la estabilidad de la escombrera, se hace necesario analizarla como roca altamente fragmentada, por lo que las características de comportamiento de dicho material se asemejan mucho a las de un suelo. Basado en lo anterior, se considera una muestra representativa del material que se encuentra en el área de botadero para ser ensayado y analizado bajo el siguiente esquema de trabajo mostrado en la Figura 39:

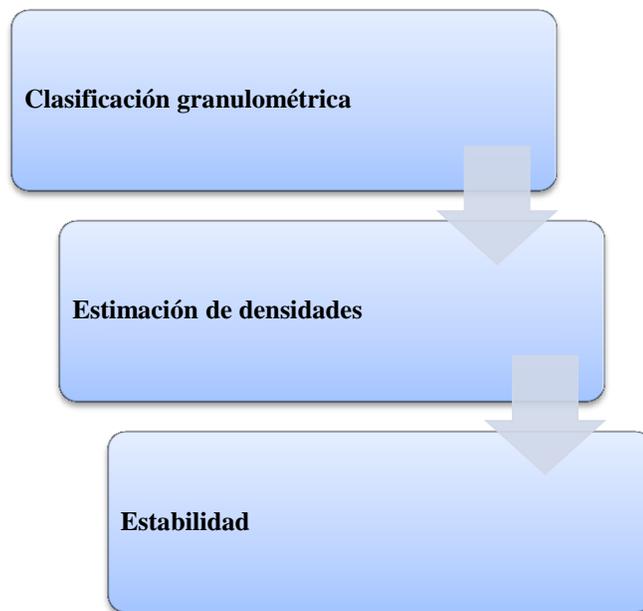


Figura 39: “Procedimiento de análisis del estéril”.

a) Clasificación granulométrica

Para determinar las características granulométricas del material a integrar la escombrera se decide hacer un análisis granulométrico, durante el muestreo se contempla la toma de aproximadamente 190 kilogramos (6 costales de aproximadamente 30 kg. de capacidad cada uno), del cual se excluye el material con sobre tamaño (superior a 2½”) ya que dicha granulometría se presenta mayormente en los lugares donde actualmente se realizan las labores artesanales, por tanto sus dimensiones serán posteriormente reducidas lo cual motiva que no fuesen considerados en el cálculo, obteniéndose así un peso total de suelo de 150 kilogramos, por lo cual se estima entonces que la proporción de material superior a 2½” en la escombrera es cercano al 20%. Luego, siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D 2487 (2006), se hace pasar los 150 kg. de muestra en porciones de aproximadamente 11 kg. a través de una serie sucesiva de tamices para obtener un promedio de la cantidad de material que queda retenido en cada tamiz, para así determinar la gradación del material que compone la escombrera. Una vez realizados los 13 ensayos correspondientes y promediados los registros se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: “Distribución granulométrica de la escombrera”.

PROMEDIO								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.137,5	1.137,5	10,0%	90,0%
			1 ½"	38,1	1.262,6	2.400,1	21,1%	78,9%
			1"	25,4	1.922,4	4.322,5	38,0%	62,0%
			¾"	19	1.001,0	5.323,5	46,8%	53,2%
	Fina	½"	12,7	887,3	6.210,8	54,6%	45,4%	
		⅜"	9,51	375,4	6.586,1	57,9%	42,1%	
		¼"	6,5	511,9	7.098,0	62,4%	37,6%	
No. 4		4,76	329,9	7.427,9	65,3%	34,7%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	523,2	7.951,1	69,9%	30,1%	
		No. 10	2	102,4	8.053,5	70,8%	29,2%	
	Media	No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	466,4	8.519,9	74,9%	25,1%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	477,8	8.997,6	79,1%	20,9%	
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	443,6	9.441,3	83,0%	17,0%	
		No. 100	0,149	364,0	9.805,3	86,2%	13,8%	
		No. 200	0,074	273,0	10.078,3	88,6%	11,4%	
Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1.296,8	11.375,0	100,0%	0,0%	
TOTAL				11.375,0				

Una vez procesados los datos de la Tabla 23 y considerando los promedios granulométricos obtenidos en el contenido ANEXO I, se procede a elaborar una gráfica logarítmica, que permita interpretar visualmente el gradado que presenta la muestra de suelo. A continuación en la Figura 40, se muestra la gráfica de distribución granulométrica mencionada.

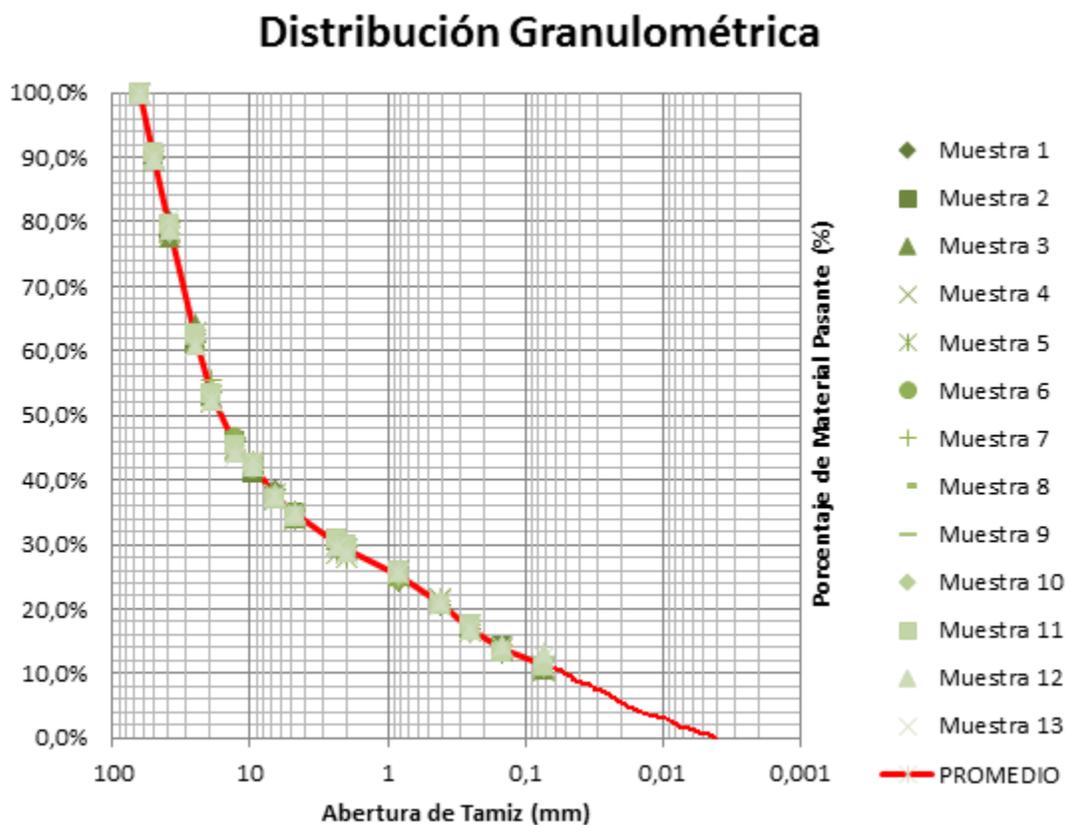


Figura 40: “Gráfica de distribución granulométrica”.

De la Figura 40, se puede inferir que al ser una representación característica de granulometría tipo continua, ya que la curva de distribución granulométrica no presenta ningún tipo de picos bruscos ni tramos planos, el material de residuo se encuentra bien gradado. Además tras el uso de las Ecuaciones 16 y 17 se determinan que $C_u=500$ y $C_c=4,6$.

Según lo indicado en el Capítulo III, la granulometría de estas características permite un comportamiento más competente por parte del suelo al momento de ser

confinado, situación que es relevante no tanto durante el diseño de escombreras, sino para posibles usos como agregado de construcción.

En base a los resultados obtenidos en la distribución granulométrica, el material granular destinado a integrar la escombrera cuenta con una categorización dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) como GP-GM, lo cual se refiere a grava pobremente gradada con limo. Esto se debe a que más del 50% del grueso es retenido en el tamiz No. 4 y entre el 5-12% de finos pasan el tamiz No. 200 además el material pasante del mencionado tamiz al humedecerse no adquiere textura arcillosa. Se puede decir además que, según la clasificación de materiales para subrasante de la *Highway Research Board* (H.R.B.) posee una clasificación de A-1-a, lo cual la califica como excelente para el uso como subrasante.

b) Estimación de densidad y relación saturación-compactación

Siendo las densidades máxima, saturada y el peso específico valores que serán usados durante el desarrollo de los cálculos de estabilidad de la escombrera, se procede a realizar el ensayo para la obtención de la Gravedad Específica, el cual permitió obtener el valor de 2,77. El cual a su vez, en cumplimiento de la mencionada ecuación 22, utilizándose un valor de γ_w a 4°C equivalente a 1000 N/m³, por lo cual se obtiene un γ_d igual a 2770 N/m³.

Durante el ensayo de Proctor Modificado (ASTM D 1557) descrito en el aparte 3.2.4 (a) del Capítulo III, se realiza el procedimiento de golpes a la muestra para un número representativo de contenido en agua, de modo tal que se pueda establecer una relación entre el contenido de agua para el suelo y el peso unitario que resulte en seco. Una vez obtenida la mencionada relación se procede a graficar los datos obtenidos, lo que permitirá obtener como resultado una representación curvilínea la cual se le denomina “curva de compactación” (Figura 41), en cuyo punto máximo el cual a su vez coincide con el punto de inflexión de la curva, se pueden obtener los valores de contenido de humedad óptima y el peso unitario seco máximo o densidad máxima como se muestra a continuación en la Tabla 30.

Tabla 30: “Resultados ensayo de compactación”.

Muestra	Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	Saturación/humedad
1	3,83	2097,8	11,56
2	5,85	2182,13	9,72
3	7,86	2180,74	9,75
4	9,94	2071,1	12,18

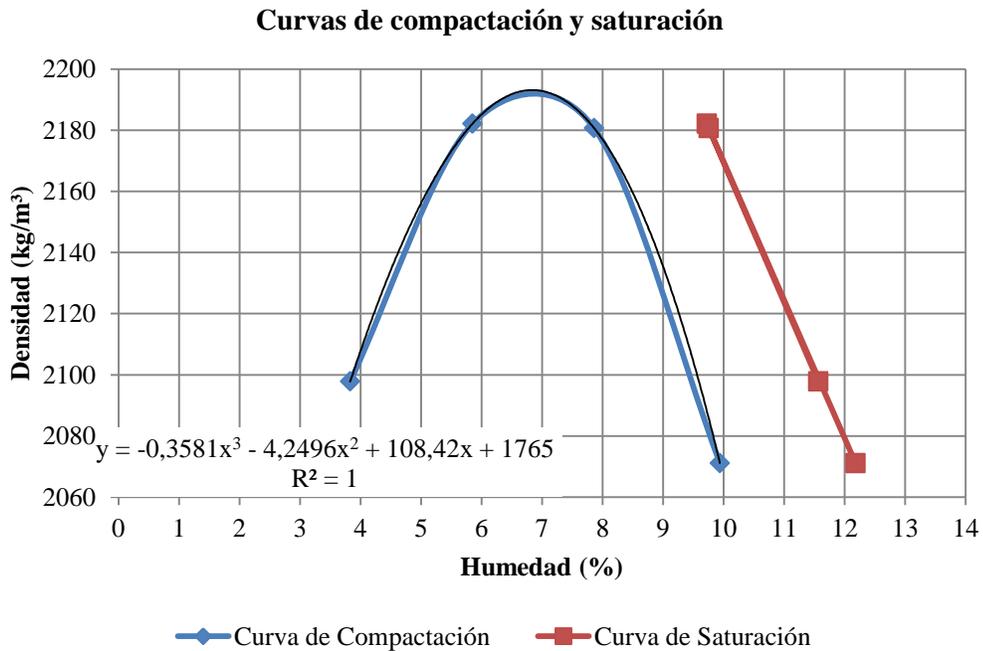


Figura 41: “Gráfica de curvas de compactación y saturación”.

De las curvas presentadas en la Figura 41, se puede mencionar que la densidad máxima del material a integrar la escombrera es 2.193 kg/m³ y la humedad óptima para su compactación equivale a 6,71%.

c) Estabilidad

Para el análisis de estabilidad del material ya constituido como una escombrera se utilizaron dos métodos determinísticos, específicamente los métodos de Bishop simplificado y Morgenstern-Price, los cuales se detallan en el apartado 3.2.3(d) del Capítulo III y consisten en el análisis de las características geométricas (por dovelas o

rebanadas) en las cuales se encuentra dispuesta la escombrera, pero tomando en cuenta valores tales como el peso específico del mismo, nivel freático, entre otros.

Para el proceso de análisis de estabilidad de la escombrera fue considerada una disposición geométrica de 2 bancos con altura de 20 metros, pendientes de talud con ángulos de 34° (valor asumido del ángulo de reposo del material por sus características), toda vez que todo este sistema descansa sobre una pendiente topográfica de aproximadamente 50° de pendiente. El mencionado diseño se propone bajo dichas características ya que por términos operativos y de limitaciones en extensión es el más conveniente para la empresa Canteras Tacarigua, C.A.

La herramienta computacional empleada para el cálculo del factor de seguridad es el software *GeoStudio 2012* en su versión libre estudiantil, específicamente en la aplicación *Slope*, en el cual se genera la siguiente geometría de corte y relleno en base a lo mencionado previamente (Figura 42).

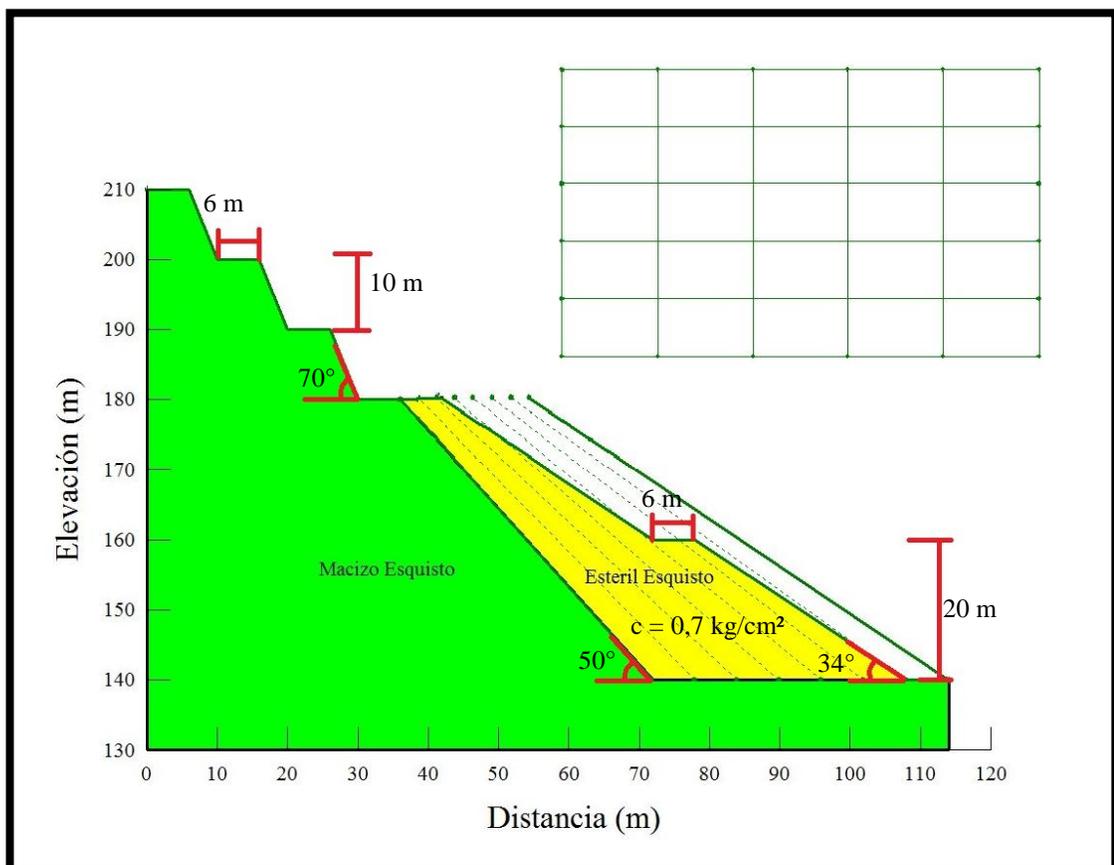


Figura 42: “Geometría para cálculo de factor de seguridad”.

Se establecen 40 posibles superficies de falla distintas para el estudio de las dovelas mediante los métodos previamente mencionados. Se estableció un número máximo de 100 iteraciones y una tolerancia permisiva de error al factor de seguridad de 0,001. Posteriormente se ingresan los parámetros ángulo de cohesión ($0,7 \text{ kg/cm}^2$), peso específico del suelo ($27,16539 \text{ kN/m}^3$) y peso específico del agua ($9,807 \text{ kN/m}^3$). Una vez aplicados los datos solicitados por *GeoSlope 2012* para el cálculo del factor de seguridad y especificando que se realizará el análisis para 30 rebanadas (dovelas), se muestran los resultados para el método de Bishop simplificado (Figura 43 y Tabla 31), el método de Morgenstern-Price (Figura 44 y Tabla 32) y el método de Jambu simplificado (Figura 45 y Tabla 33).

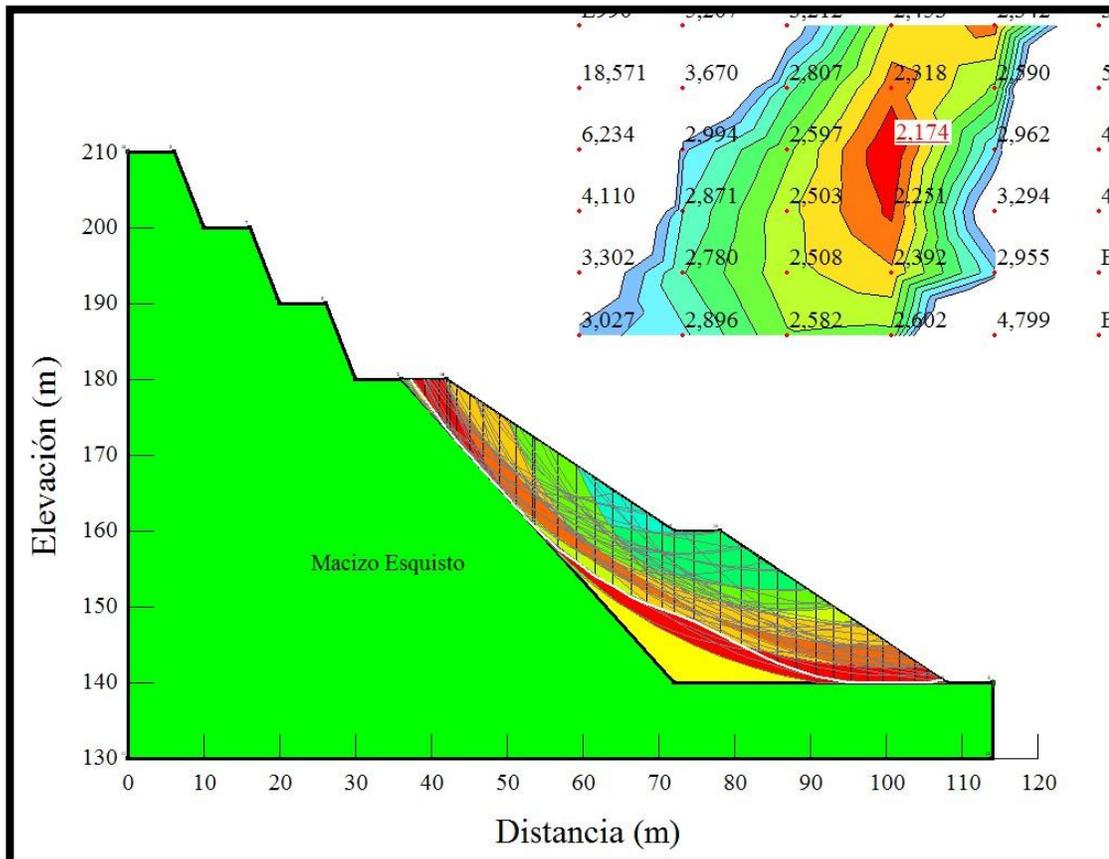


Figura 43: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Bishop simplificado”.

Tabla 31: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Bishop simplificado”.

Método de Bishop simplificado	
Factor de seguridad	2,174
Volumen	676,92 m ³
Peso	18.844,91 kN
Resistencia al momento	1.005.810,8 kN-m
Momento de activación	462.693,03 kN-m

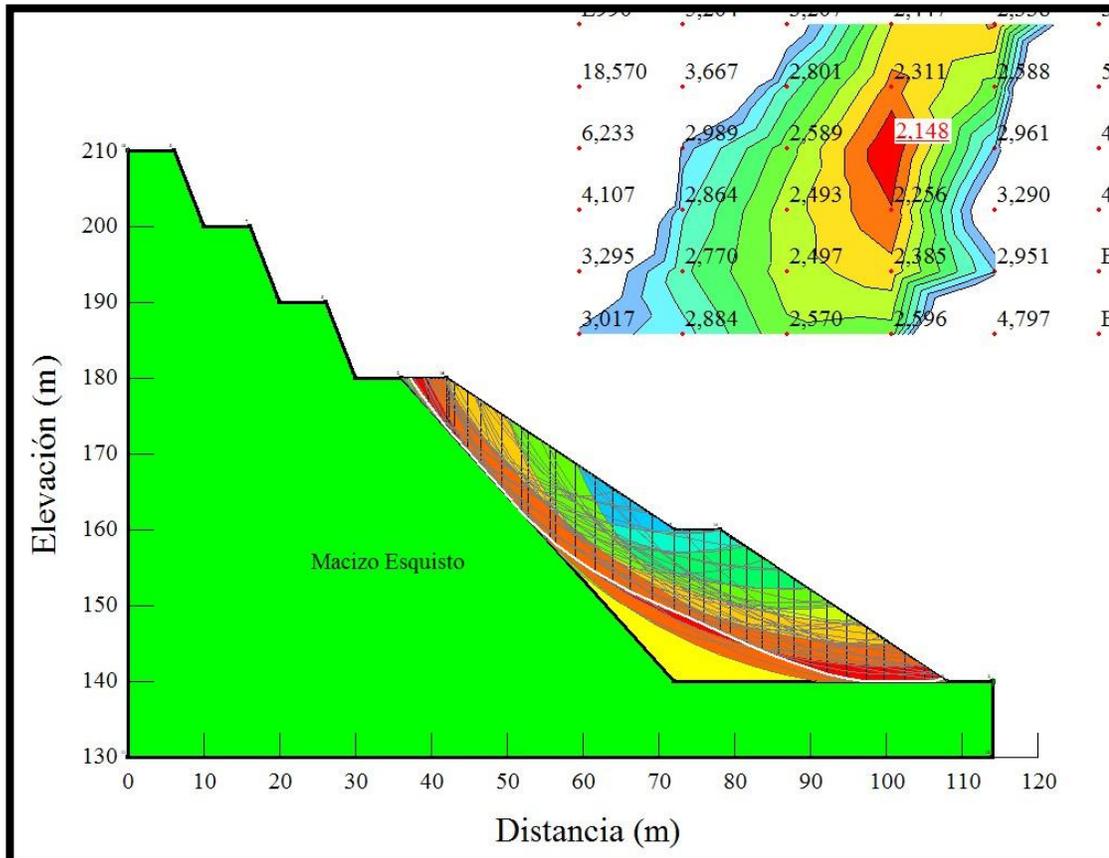


Figura 44: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Morgenstern-Price”.

Tabla 32: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Morgenstern-Price”.

Método de Morgenstern-Price	
Factor de seguridad	2,148
Volumen	663,41 m ³
Peso	14.548,66 kN
Resistencia al momento	984.384,26 kN-m
Momento de activación	458.135,3 kN-m
Fuerza de resistencia	12.322,761 kN
Fuerza de activación	5.736,52 kN

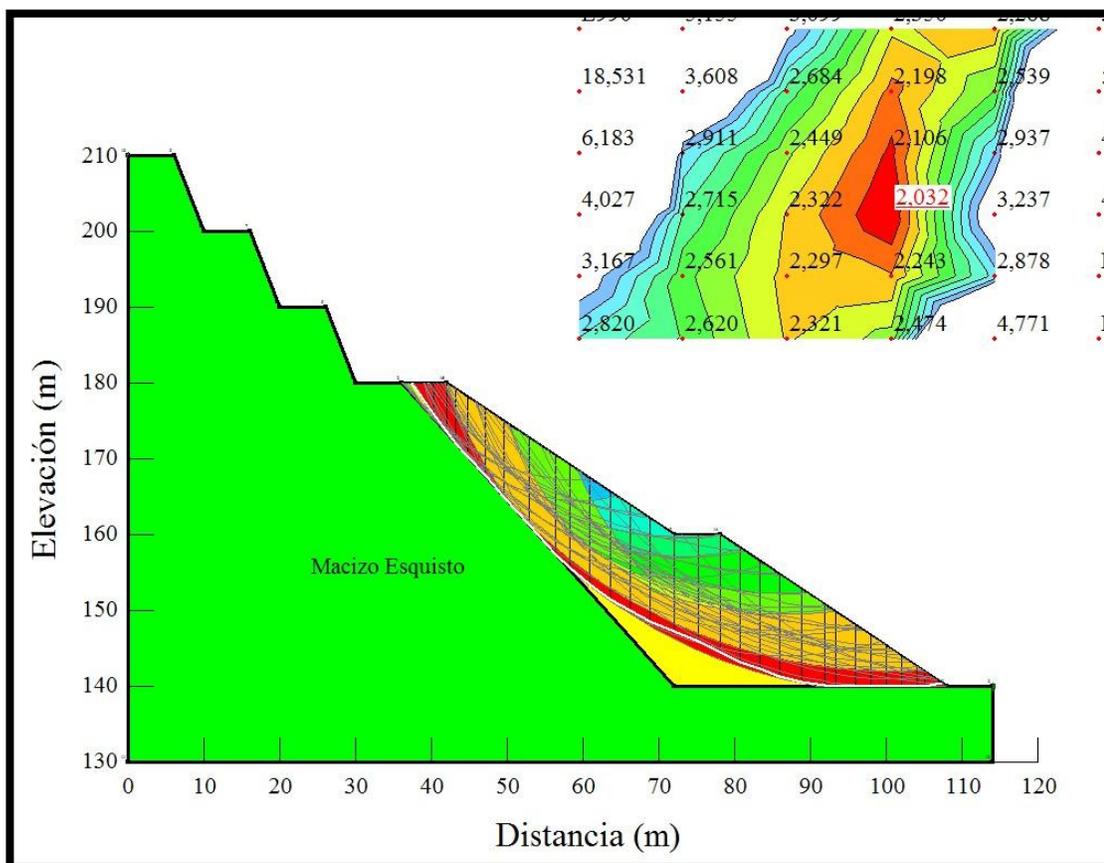


Figura 45: “Análisis de estabilidad de escombrera por método de Jambu simplificado”.

Tabla 33: “Resultados de análisis de estabilidad de escombrera por método de Jambu simplificado”.

Método de Jambu simplificado	
Factor de seguridad	2,032
Volumen	729,67 m ³
Peso	16.001,67 kN
Fuerza de resistencia	12.999,57 kN
Fuerza de activación	6.398,27 kN

Simultáneamente, con uso del software *GEO5 v19* en su versión libre, se cargó la superficie de falla crítica registrada en el programa *GeoStudio 2012* y se evaluó además 3 condiciones adicionales para cada uno de los métodos, con las condiciones del material saturado (ver Figura 46), con sismo (ver Figura 47) y saturado con sismo (ver Figura 48).

Para las condiciones de saturación se simula un nivel freático en la cota 160 msnm, mientras que en el caso de la condición sísmica, al formar la zona costera del estado Carabobo a la zona sísmica número 5, se toman los valores asignados por FUNVISIS que equivalen a un coeficiente sísmico de 0,3 en horizontal y 0,21 en vertical.

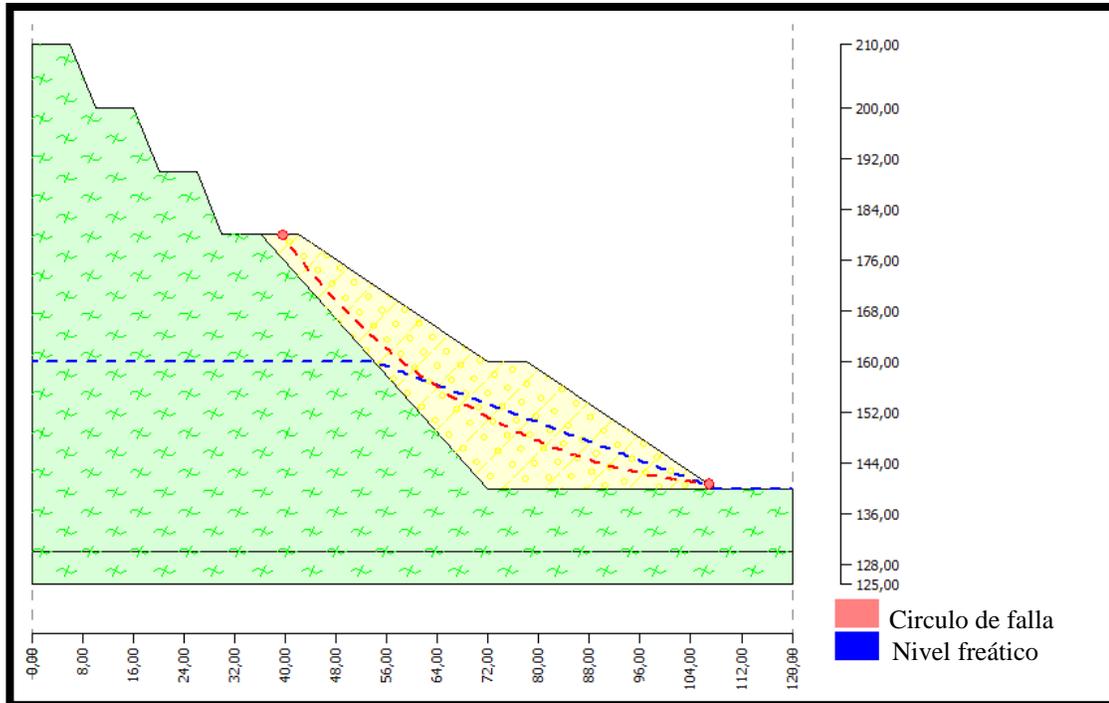


Figura 46: “Análisis de estabilidad de escombrera con nivel freático (160 msnm)”.

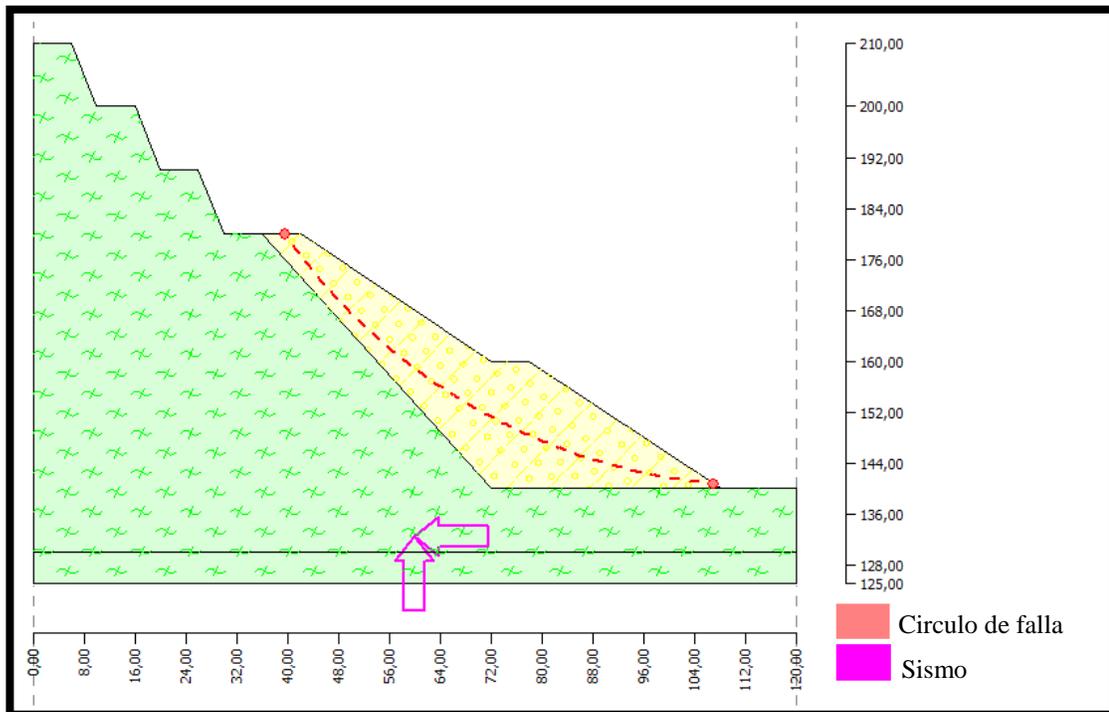


Figura 47: “Análisis de estabilidad de escombrera con sismo”.

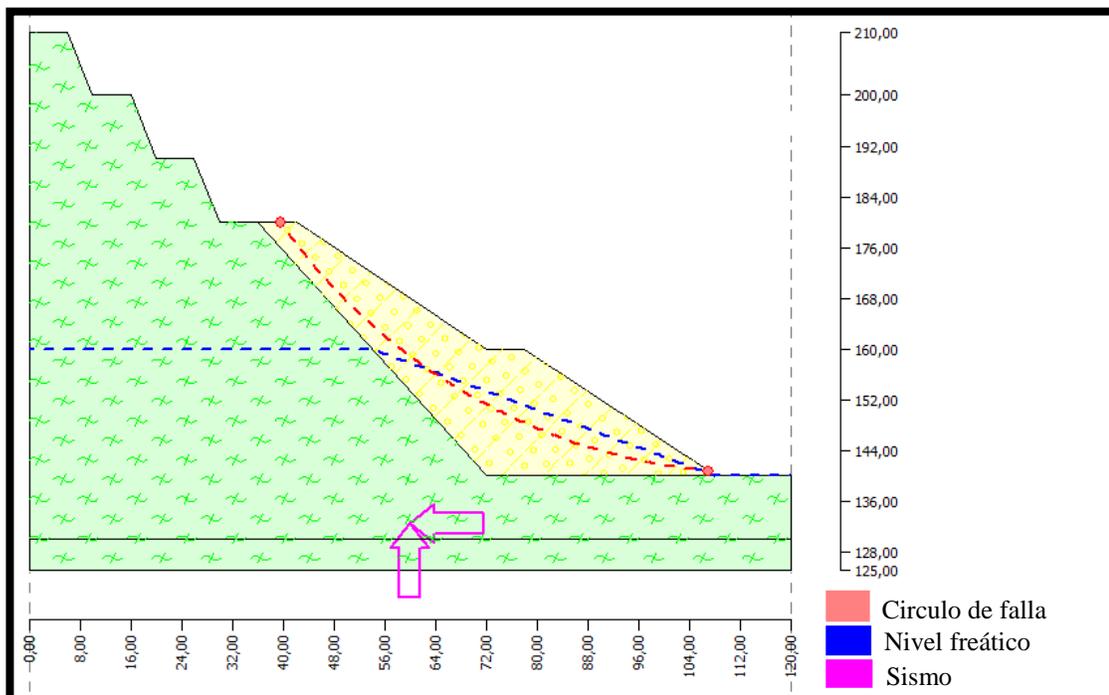


Figura 48: “Análisis de estabilidad de escombrera con sismo y nivel freático (160 msnm)”.

De las condiciones definidas previamente se obtienen los factores de seguridad que se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34: “Relación de factores de seguridad”.

Método	Normal	Sismo	Saturado	Saturado + Sismo
Bishop simplificado	2,174	1,065	2,000	0,913
Jambu simplificado	2,032	0,996	1,869	0,853
Morgenstern-Price	2,148	1,053	1,976	0,902

En base a los resultados obtenidos de los métodos determinísticos desarrollados, se puede determinar que la superficie crítica de deslizamiento para la escombrera en condiciones normales viene dada por el método de Jambu simplificado, el cual arroja un factor de seguridad de 2,032, por otra parte se estima que ante cualquier evento sísmico de alta magnitud la escombrera puede encontrarse igualando sus fuerzas resistentes con las promotoras de deslizamiento y en condiciones fatalistas en que dicho evento sísmico se vea combinado con el nivel freático planteado es probable un colapso parcial de la escombrera.

4.7.3 Adecuación de escombrera

Para llevar a cabo la adecuación de la escombrera, se hace necesario analizar el volumen que actualmente posee, con el fin de determinar el volumen total que puede albergar, las técnicas apropiadas para continuar con su construcción, de modo tal, que cumpla con los criterios de estabilidad, desarrollar un cronograma operativo para mantener un crecimiento inspeccionado de la escombrera y el control de las aguas en la cuenca en la cual se encuentra la misma. Basado en lo anterior, se decidió desarrollar el plan de estudio de la escombrera bajo el siguiente esquema de trabajo mostrado en la Figura 49.

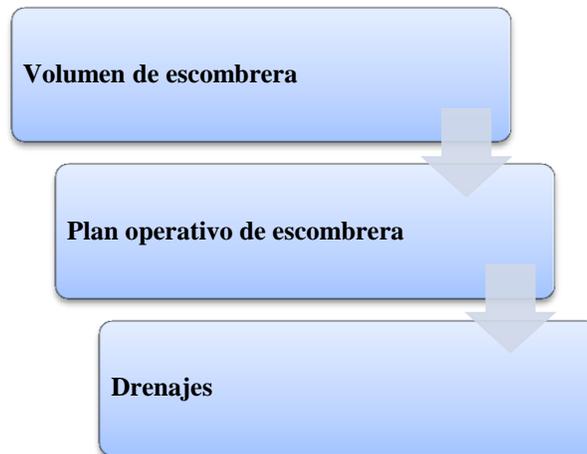


Figura 49: "Procedimiento de adecuación de escombrera".

a) Volumen de escombrera

Las condiciones actuales del área de disposición de residuos, tras años de alojar los remanentes producidos del trabajo artesanal con los esquistos, se pudo estimar que se han producido aproximadamente 40.000 m³ de desperdicios de dicha actividad; sin embargo, para estimar la producción de escombros hasta agotar las reservas de esquisto y basado en lo descrito en el apartado 4.7.1 (a) del Capítulo V donde se indica que el diseño propuesto abarca un volumen de aproximadamente de 35.100 m³, abarca un área de 8.000 m², se consideran los balances de despacho de lajas ornamentales los últimos 2 años, los cuales presentan la relación que se muestra en la Tabla 35.

Tabla 35: “Despacho lajas ornamentales 2013-2014”.

	2013			2014		
	Roca suelta usada (m ³)	Producción (m ³)	Residuo (m ³)	Roca suelta usada (m ³)	Producción (m ³)	Residuo (m ³)
<i>Enero</i>	343,42	206,05	137,37	526,53	315,92	210,61
<i>Febrero</i>	425,77	255,46	170,31	489,58	293,75	195,83
<i>Marzo</i>	345,13	207,08	138,05	411,62	246,97	164,65
<i>Abril</i>	407,65	244,59	163,06	535,27	321,16	214,11
<i>Mayo</i>	471,67	283	188,67	458,30	274,98	183,32
<i>Junio</i>	493,22	295,93	197,29	505,47	303,28	202,19
<i>Julio</i>	630,55	378,33	252,22	536,43	321,86	214,57
<i>Agosto</i>	694,95	416,97	277,98	498,75	299,25	199,50
<i>Septiembre</i>	657,12	394,27	262,85	635,65	381,39	254,26
<i>Octubre</i>	742,13	445,28	296,85	491,63	294,98	196,65
<i>Noviembre</i>	726,47	435,88	290,59	784,03	470,42	313,61
<i>Diciembre</i>	281,07	168,64	112,43	531,43	318,86	212,57
TOTAL	6.219,13	3.731,48	2.487,65	6.404,70	3.842,82	2.561,88

Los datos referentes a la cantidad de roca suelta utilizada y el residuo generado del trabajo artesanal, se infieren debido a que por observaciones de campo, se estima que por cada 1 m³ de roca con la cual se realizan las lajas, solo un 60% es aprovechable, mientras que el 40% restante es residuo. De la información mostrada puede observarse un incremento promedio anual de producción de aproximadamente 2,9%, tomando en cuenta ello, el ritmo de producción y las reservas aprovechables de

esquisto se genera la Tabla 36, la cual muestra los valores de cada uno proyectados año a año hasta agotarse la reserva.

Tabla 36: “Estimación generación de estériles 2015-2019”.

Año	Volumen inicial en macizo (m ³)	Volumen a volar (m ³)	Volumen suelto generado (m ³)	Laja ornamental producida (m ³)	Residuo generado (m ³)	Volumen final en macizo (m ³)
2015	35.122	5.337	6.405	3.843	2.562	29.785
2016	29.785	6.885	8.262	4.957	3.305	22.900
2017	22.900	8.882	10.658	6.395	4.263	14.018
2018	14.018	11.457	13.749	8.249	5.500	2.561
2019	2.561	2.561	3.073	1.844	1.229	0
TOTAL				25.288	16.859	

Una vez realizada la voladura se asume por observaciones en campo, un aumento de 20% del volumen de material suelto con respecto al volumen en banco. Puede tomarse por tanto, según los cálculos de Bishop simplificado mostrados en el apartado 5.2.4 del Capítulo V, un volumen de diseño de escombrera de 70.000 m³, de los cuales su capacidad real será de 56.859 m³, estando integrada esta cifra ya con los 40.000 m³ que se estima se encuentran en la zona y el resto que será producido con las actividades de generación de lajas ornamental que se desarrollen hasta 2019. La información relativa se muestra en la Tabla 37.

Tabla 37: “Características escombrera”.

Detalles escombrera	Volumen (m ³)
Capacidad de diseño	70.000
Cantidad de residuo actual (aprox.)	40.000
Residuo a ser generado	16.859
Capacidad real	56.859
Factor de sobredimensionamiento	23,1%

b) Plan operativo de escombrera

En las obras que requieren de movimientos de tierra (corte/relleno), se recomienda conocerse la cantidad de material que debe transportarse, para de esa manera estimar con que equipos es más apropiado el acarreo del mismo y en qué área ha de colocarse, siempre considerando las relaciones sobre la cantidad de material a moverse no sobrepase la capacidad del albergue de la zona a la que irá.

El plan de adecuación de la escombrera, está íntimamente relacionado con los equipos que serán utilizados y el empleo de sus horas máquina afectadas por sus valores de disponibilidad, esto con la finalidad de determinar cuánto tiempo y con qué eficiencia se podrá ejecutar todo el movimiento de tierras que requiere la escombrera. En base a lo mencionado anteriormente se anexa la Tabla 38 con datos acerca de la disponibilidad física y mecánica de los equipos en Canteras Tacarigua, C.A., efectiva para el mes de julio 2015.

Tabla 38: “Disponibilidad de equipos marzo-junio 2015. Canteras Tacarigua, C.A.”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

Equipo	Disponibilidad física (%)	Disponibilidad mecánica (%)	Uso de la disponibilidad (%)
CAT 350L	100	100	72
CAT 330L	47	47	47
CAT 988B-2	50	50	50
CAT 980F	91	90	88
CAT 730-1	57	52	82
CAT D8N	90	90	90

La construcción de la escombrera está considerada en el levantamiento de 2 terrazas las cuales serán construidas por los métodos que serán definidos posteriormente; sin embargo, a nivel operativo se requiere del proceso de movimiento de tierras previo a la definición de la Terraza 1, siendo este el procedimiento al que se define en este trabajo como “adecuación”. El mencionado volumen inicial acumulado

en la escombrera pertenece a aquel que integra la Terraza 1, pero como requiere de un movimiento de tierras diferente no corresponde su desarrollo con el de dicha terraza.

El procedimiento de adecuación del volumen actual de la escombrera comienza por el empleo de la retroexcavadora CAT 330L, la cual tendrá como labores durante esta fase la carga del material que se encuentra por encima de la cota 160 msnm del área actual. Dicho material extraído será vertido sobre el mismo nivel de cimiento de la escombrera (140 msnm) con la finalidad de redefinir la Terraza 1 según la geometría descrita en el aparte 4.7.2 (d) del presente capítulo.

Tras ubicar todo el material a una cota inferior a los 160 msnm (se estima para esta etapa una altura aproximada a la cota 155 msnm), continua el trabajo del tractor CAT D8N, cuya tarea será unificar a una sola cota uniforme toda la escombrera y empujar el material de tal forma que la Terraza 1 crezca manteniendo en contacto la parte posterior de la misma con el afloramiento de los cimientos, a este método de vertido se le conoce como “*push dumping*” y se ilustra en la Figura 50.

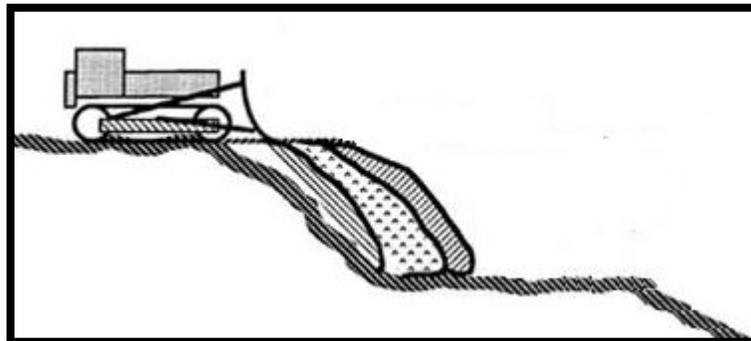


Figura 50: “*Push dumping*”. Tomado de Comité de escombreras de *British Columbia Mine Dump Committee* (1991).

Una vez practicada la adecuación del volumen acumulado en la escombrera procediendo como se ha descrito, el proceso de avance de la misma vendrá definido según el método de llenado pautado para cada terraza, siendo necesario un crecimiento establecido en secuencias de 2 etapas constructivas distintas. La primera viene definida en la denominada Terraza 1, la cual está ubicada entre las cotas 140 y 160 msnm. En base a lo mencionado previamente, en el nivel 140 ya se encuentra acumulada una cantidad abundante de material de residuo a alturas que para el

momento de ejecución de la presente etapa es de aproximadamente los 155 msnm; todo esto es debido al procedimiento inicial de conformación en toda el área lo que impide que el pie del talud de dicha terraza traspase los 6 metros del borde topográfico por motivos de mantenimiento.

La segunda etapa de la escombrera definirá la terraza número 2, la cual está comprendida entre las cotas 160 y 180 msnm. El avance se realiza desde la cota 180 en vertido por la cara libre del talud con tractor y/o retroexcavadora, de forma distribuida desde el flanco Sur hasta el flanco Norte sobre la primera etapa de la escombrera, de modo tal que la segunda fase se desarrolle (al igual que la primera) respetando los ángulos de reposo del material, manteniendo también el contacto permanente de la parte posterior de la segunda terraza con el macizo, dejando un ancho de berma entre el pie de la Terraza 2 y la cresta de la terraza 1 que no sea inferior a 6 m con la finalidad de realizar mantenimientos de vía.

A continuación se muestra en la Tabla 39 la distribución de volúmenes de estéril por terraza planificada, en función del diseño propuesto en el apartado 4.7.2 (d) del presente capítulo.

Tabla 39: “Distribución de volumen de estéril por terraza”.

Terraza	Cota inicial	Cota final	Área de sección (m ²)	Volumen de diseño (m ³)
1	140	160	626	50.080
2	160	180	249	19.920

Cabe destacar que para lograr el acceso a la Terraza 2, no es necesario generar una vialidad, ya que esta se encuentra a la misma cota (180 msnm) donde comienza el diseño de explotación sugerido del área de esquistos. Sin embargo, para lograr el acceso a la Terraza 1 será necesario inicialmente realizar rampas en relleno, para posteriormente cuando se encuentre culminada, se pueda habilitar un acceso en corte desde la vialidad ya existente, de modo tal que permita la entrada a la Terraza 1 con fines de mantenimiento. La mencionada vialidad de acceso a la terraza 1 mantendrá valores de 10% de pendiente, inclinación de 2% hacia el interior de la vía y ancho de

6 metros. La Figura 51 muestra el diseño final propuesto con los accesos mencionados anteriormente, elaborado con herramientas del software minero libre.

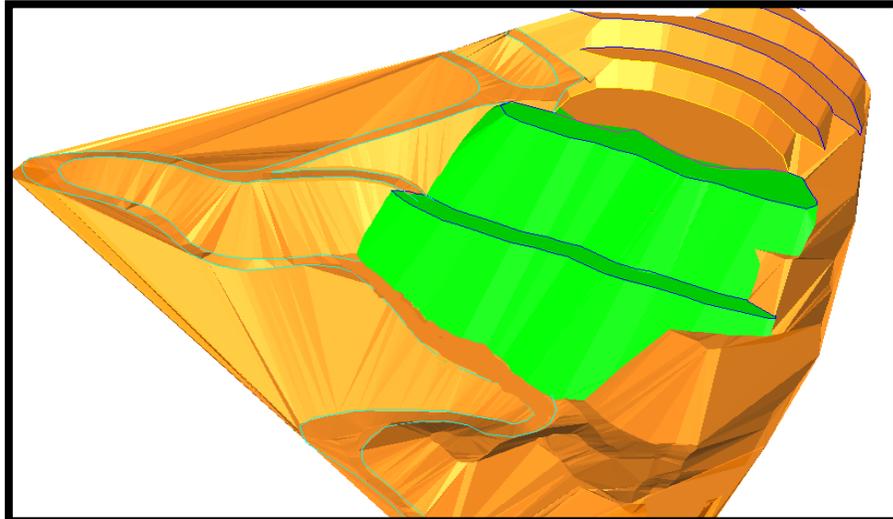


Figura 51: “Vista en perspectiva Norte-Sur de la topografía modificada”.

Para el cálculo de la productividad del tractor CAT D8N, es necesario conocer sus especificaciones y rendimiento real, en base a lo mencionado en el aparte 3.3.4 (a) del Capítulo III acerca del equipo minero a ser dispuesto en la escombrera de la cantera y los métodos de cálculo de productividad presentes en el aparte 4.4 del Capítulo IV, se procede a mostrar las siguientes Tablas con el rendimiento del tractor y características estéril (Tabla 40 a Tabla 43).

Tabla 40: “Capacidad hoja de tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”.

CAPACIDAD HOJA TRACTOR D8N			
Longitud hoja (m)	Altura hoja (m)	Ángulo de reposo (°)	Capacidad (m ³)
3,9	1,6	34	7,4

Tabla 41: “Características CAT D8N y material estéril, Canteras Tacarigua, C.A.”.

Densidad (Kg/m ³)	HP motor	Peso (Kg)	Eficiencia (%)
2193	285	37462	75%

Tabla 42: “Resistencias al desplazamiento tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”.

RESISTENCIA IDA					
Resistencia rodadura (Kg)	Resistencia pendiente (Kg)	Resistencia carga (Kg)	Resistencia total (Kg)	Velocidad (Km/h)	Velocidad media (Km/h)
1873,1	0,0	16230,3	18103,4	3,24	2,17

Tabla 43: “Rendimiento tractor CAT D8N, Canteras Tacarigua, C.A.”.

RENDIMIENTO TRACTOR D8N						
Acarreo (km)	Tiempo ida (min)	Tiempo vuelta (min)	Retardos (min)	Ciclo (min)	Disp. física (%)	Rendimiento (m ³ /h)
0,020	0,554	0,129	0,5	1,182	90%	253,49

Para el cálculo de la productividad de la retroexcavadora CAT 330L, considerando los factores mostrados en el capítulo 3, se muestra la siguiente tabla (ver Tabla 44).

Tabla 44: “Rendimiento retroexcavadora CAT 330L, Canteras Tacarigua, C.A.”.

RENDIMIENTO RETROEXCAVADORA 330L					
Capacidad de balde (m ³)	Factor de llenado (%)	Capacidad real (m ³)	Tiempo de ciclo (min)	Disponibilidad física (%)	Rendimiento (m ³ /h)
1,5	95%	1,4	0,33	47%	121,77

Considerando los cálculos mostrados en las Tabla 40 a Tabla 44 se presenta la Tabla 45, donde se muestran las horas máquina requeridas para adecuar la escombrera, completar el volumen de la Terraza 1 y el volumen de la Terraza 2.

Tabla 45: “Horas máquina de trabajo en escombrera”.

Rendimiento retroexcavadora (m³/h)	121,77
Producción de residuos (m³/h)	1,37
Rendimiento neto (m³/h)	120,40
Volumen existente (m³)	40.000
Volumen a mover por adecuación (m³)	16.000
Horas máquina adecuación	133
Volumen restante Terraza 1 (m³)	9.898
Horas máquina Terraza 1	82
Volumen Terraza 2 (m³)	6.961
Horas máquina Terraza 2	58
Horas máquina (total escombrera)	273

En la tabla presentada anteriormente (Tabla 45) se puede apreciar que el rendimiento de equipo utilizado para estimar las horas máquinas fue el de la retroexcavadora CAT 330L, esto debido a que el mencionado equipo es el que presenta la productividad limitante por poseer el menor rendimiento horario con respecto al tractor CAT D8N.

c) Drenajes

Para evitar filtraciones de agua en los cimientos de la escombrera es necesario tener control sobre las aguas de la cuenca en la cual se encuentra, es por ello que los drenajes que se diseñen deben ir en función del tamaño de la cuenca donde se encuentra la escombrera y la cantidad de agua que pudiese albergar como se indica en los apartes 3.2.6 y 3.3.1 del Capítulo III.

Con la finalidad de evitar sobrepasar la capacidad de los drenajes que se diseñen en el área de la escombrera, se realiza el análisis para dos cuencas con sistemas de drenajes por separado, manejándose así distintas salidas para cada uno, se propone uno de los sistemas de drenaje en la cuenca ubicada en el área de diseño en el macizo, mientras que el otro se establece para el área conformada por la estructura de la escombrera.

Seguidamente, tras estimar el área de las cuencas y tomando en cuenta el nivel de pluviosidad máxima registrada en el municipio Puerto Cabello en la estación más cercana a la cantera la cual solía estar ubicada en Borburata (ver Tabla 16), haciendo uso de la Ecuación 32 y de los coeficientes presentes en la Tabla 14, se presenta en la Tabla 46 los resultados obtenidos para cada cuenca.

Tabla 46: “Estimación de caudal de cuencas”.

CAUDAL REAL					
Área	Área cuenca (Km ²)	Intensidad (mm/h)	Escorrentía	Caudal (m ³ /s)	Factor de seguridad
Macizo esquistos	0,02	40	0,8	0,24	1,2
Escombrera	0,02	40	0,8	0,24	1,2

De la Tabla 46 se obtiene el caudal de diseño, a partir del cual se procede a plantear los sistemas de drenajes, tanto de la cuenca del frente de extracción de esquistos como en la estructura de la escombrera en general, todo esto para evitar la circulación excesiva de agua por los taludes y así evitar la erosión de los mismos.

Se propone como diseño del canal de drenajes en el área de la escombrera y del macizo de esquistos, una sección triangular con dimensiones de 0,5 x 1 m, con una inclinación en los laterales que guarde una relación de 1:1. En la Figura 52 se muestra la sección de drenajes propuesta.

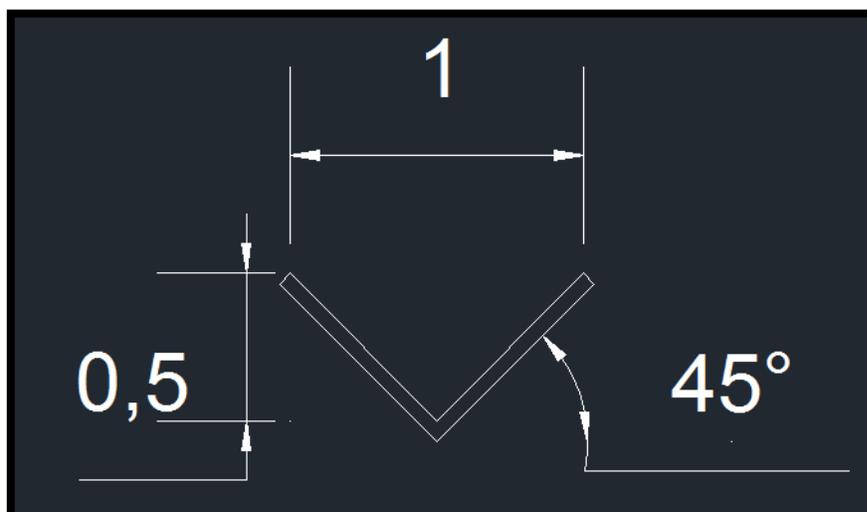


Figura 52: “Sección de drenajes”.

Para la configuración de drenajes propuesta, y mediante el uso de la Ecuación 33 y Tabla 15, se muestra a continuación la Tabla 47, la cual resume la cantidad máxima de agua que puede transportar el mencionado sistema.

Tabla 47: “Cálculo de drenajes”.

DISEÑO MANEJO DE CAUDAL									
Área	Altura (m)	Relación lateral (m)	Área mojada (m ²)	Perímetro mojado (m)	Pendiente (%)	Rugosidad	Velocidad (m/s)	Área sección (m ²)	Caudal (m ³ /s)
Macizo Esquistos	0,5	1	0,25	2,06	0,02	0,03	1,15	0,25	0,28
Escombrera	0,5	1	0,25	2,06	0,02	0,03	1,15	0,25	0,28

La red de manejo de aguas propuesta cuenta en total con 1.012 metros lineales de drenaje, se puede apreciar que bajo la configuración mostrada, aparte de manejar las aguas por distintos drenajes, el factor de sobredimensionamiento del mismo se encuentra en un 20% de los niveles de lluvia máximos posibles. La red de drenajes propuesta puede observarse en el segundo mapa de los anexos, titulado “Topografía Modificada”.

4.7.4 Recuperación y paisajismo

Para Canteras Tacarigua, C.A., el proceso de revegetación es una acción conducente a reducir el impacto generado por la construcción de la escombrera, debido al obvio contraste con el relieve topográfico natural, toda vez que se permita garantizar mayor estabilidad a los taludes y coadyuvar en la recuperación de las condiciones para facilitar la vida de flora y fauna del área afectada. En base a lo anterior, se desarrolla un planteamiento ambiental de cambio de uso expuesto en la Figura 53.



Figura 53: “Procedimiento de recuperación y paisajismo”.

a) Especies sugeridas

La Tabla 48 muestra las especies recomendadas para revegetar las zonas afectadas de la concesión, generada por especialistas del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas en inspección realizada en Canteras Tacarigua, con la finalidad de establecer la vegetación que debe usarse para pagar sus fianzas ambientales, considerando en su elaboración la autoctonía de las mismas y su disponibilidad en el mercado.

Tabla 48: “Especies para revegetación”. Tomado de Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A. (2008).

Espece	Nombre común	Condiciones
<i>Sancheiza Nobilis</i>	Esqueleto	Resistente a la sequía
<i>Plumbago</i>	Betulia	Resistente a la sequía
<i>Lantana Camara</i>	Cariaquito	Resistente a la sequía
Agave Americano	Magüey	Resistente a la sequía
Agave Americano <i>Marginata</i>	Variación de Magüey	Resistente a la sequía, riego casi nulo
Agave <i>Angustifolia</i>	Espada de Bolívar	Resistente a la sequía
<i>Bouganvilia</i>	Trinitaria	Resistente a la sequía
<i>Dorothenthus</i> <i>Bellidiformis</i>	Livinstogniana	Muy resistente a la sequía
<i>Tropaelum Majus</i>	Capuchina Roja	Resistente a la sequía
<i>Coccoloba Uvifera</i>	Uva de Playa	Resistente a la sequía
<i>Andira Inermis</i>	Pilón	Resistente a la sequía
<i>Portulaca</i>	Bella a las Once	Resistente a la sequía

b) Riego de plantas

Todas las plantas sugeridas por el personal del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (ver Tabla 48) para la rehabilitación de los espacios son resistentes a la sequía. Siendo el riego de las plantas una actividad vital para el crecimiento de las mismas y basado en los bajos niveles de lluvia que están presentes normalmente en el área costera del estado Carabobo, se estableció un sistema de riego que satisfaga la demanda de agua que requieren las especies.

Al momento de la siembra, dicha vegetación requiere de un riego en un período no mayor a 10 minutos previos, luego del “riego de siembra” se repetirá la misma acción cada 2 días durante el periodo matutino en las primeras semanas reduciendo paulatinamente en semanas posteriores el tiempo del mismo hasta 7 minutos en intervalos de cada 3 días en verano. Debe considerarse que los períodos de riego deben ajustarse en función del comportamiento que refleje la planta.

Para el caso de las trinitarias son necesarios al menos unos 10 minutos de riego por el rocío de siembra para luego tener una duración de riegos de 8 minutos con una frecuencia de 3 veces por semana.

Los agaves requieren solo de 1 a 2 riegos por semana con duración aproximada cada uno de 5 minutos.

Por tanto se concluye que a nivel general, que con un riego cada 3 días durante 10 minutos es suficiente para las plantas propuestas.

c) Morfología y uso del espacio

La actual morfología del área donde se ubica la escombrera tiene pendientes de aproximadamente 50°, con la construcción de la escombrera bajo los criterios descritos en el aparte 4.7.2 (d) del Capítulo IV, se estima no se vea afectada de manera negativa la percepción visual de la zona, debido a que los ángulos bajaran de 50° a 34° de pendiente, lo cual brinda mejores condiciones para el establecimiento de las especies vegetales durante la recuperación ecológica del espacio.

Se prevé que una vez finalizadas las labores en la cantera y por ende el desarrollo constructivo de la escombrera, la última solo destacará sobre el terreno de alrededor por poseer en sus terrazas una forma plana, las cuales con el transcurso del tiempo al ser reforestadas, reducirán considerablemente el impacto visual y prácticamente formarán parte integral de la montaña.

Se propone la creación de mini terrazas de aproximadamente 1 metro en los taludes de la escombrera y sembrar en ellas árboles leñosos de sistema radicular profundo; complementar además con agaves, los cuales presentan un sistema

radicular menor pero ayudan a mejorar la estructura en áreas donde un árbol grande no funcionaría de igual manera.

En las terrazas de la escombrera se plantea sembrar uvero de playa, colocados a una distancia de máximo 7 metros entre sí, y en algunos casos 4,5 metros ya que la ubicación de las especies brinda un aspecto más natural.

Se prevé que este espacio sea utilizado como mirador turístico, esto en relación con el Plan de Cierre de Minas de Canteras Tacarigua, C.A. el cual propone que toda el área de la cantera sea utilizada como espacio para actividades de entretenimiento, esparcimiento y práctica de deportes de montaña.

CAPÍTULO V

PROPUESTA DE EJECUCIÓN EN LA ADECUACIÓN DE LA ESOMBRERA

Para analizar los resultados obtenidos durante el período de ejecución de la investigación, es necesario analizar cada una de las variables que fueron desarrolladas y correlacionarlas de manera global.

5.1 Propuesta de metodología de adecuación

La tendencia a nivel mundial en la planificación de escombreras en comparación con tiempos anteriores, radica en aprovechar de una manera eficiente el espacio dentro de la mina y mover en la medida de lo posible la menor cantidad de material que no represente ingresos para la empresa, se hace necesario entonces estudiar las características físicas y químicas de los estériles para descartar que no posea propiedades que permitan darle algún uso y sea posible así su comercialización.

Basado en lo previamente mencionado, se pretende hacer seguimiento del esquema desarrollado por *British Columbia Mine Dump Committee* (1991), el cual indica el siguiente orden de desarrollo para evaluar la factibilidad de construcción de una escombrera según se muestra en la Figura 54.

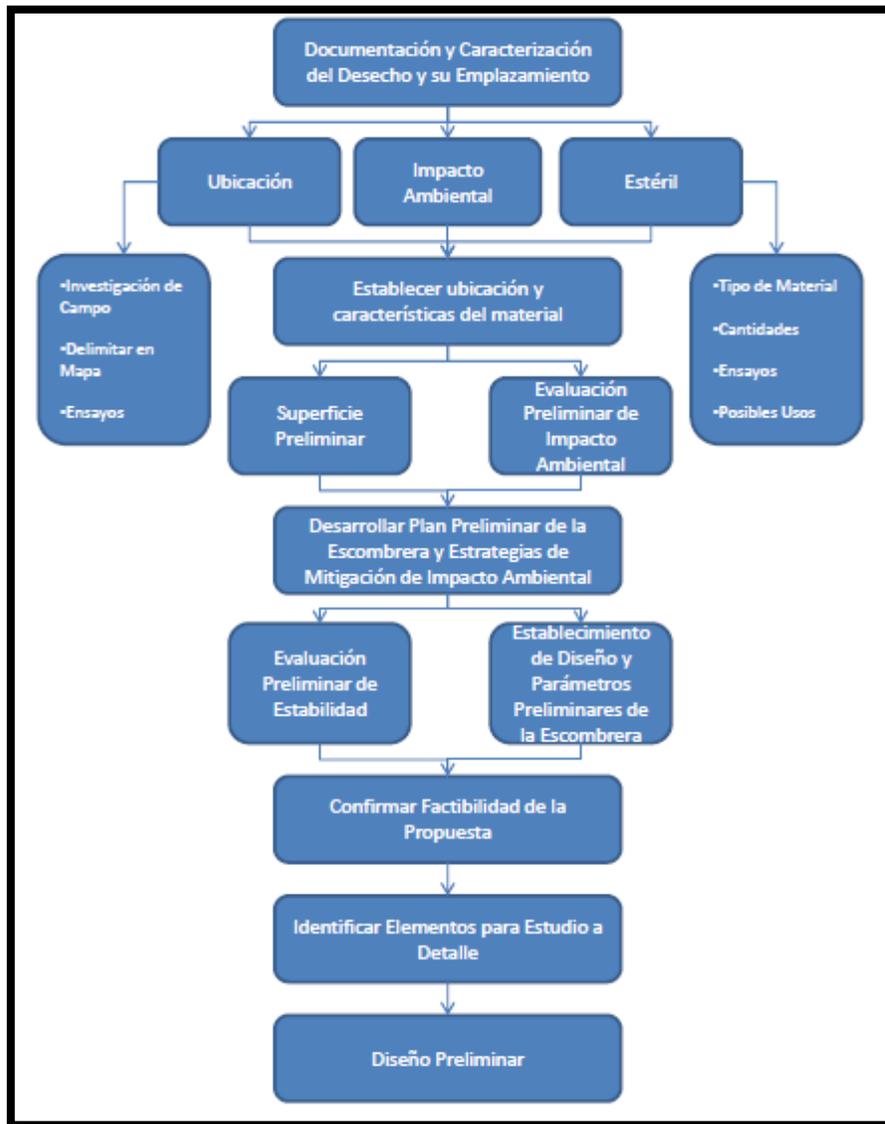


Figura 54: “Evaluación de factibilidad de escombreras”. Modificado de *British Columbia Mine Dump Committee* (1991).

Partiendo de la Figura 54, y mediante observaciones de campo indicadas durante el análisis del emplazamiento, se identifica el macizo donde yace el bote como un afloramiento de roca anfibolítica de textura esquistosa y apreciable meteorización, identificándose por poseer además contenido de cuarzo y micas de carácter moscovítico, el cual carece de valor comercial relevante para la empresa, además presenta un RQD *in situ* equivalente a 100%. Por otra parte, se evaluó la

resistencia del mencionado macizo de esquisto a través de ensayos de carga puntual, el cual arrojó un valor promedio de $I_s(50)$ de 2,16 MPa, lo cual equivale según el tipo de probetas ensayadas a 47,33 MPa de compresión simple o UCS, ambos datos al compararse con la condición en la que se encuentran las discontinuidades y habiéndose registrado dentro del *SMR* una ponderación de 62,5 se asegura que su comportamiento es bueno para brindar estabilidad a la escombrera.

Tras el ensayo de la granulometría, se determinó que el material considerado como estéril según la distribución granulométrica que presenta (considerando solo el material pasante de 2½”) puede clasificarse como grava pobremente gradada con limo. Esto se debe a que más del 50% del grueso es retenido en el tamiz No. 4 y más del 12% de finos pasan el tamiz No. 200 y no posee textura arcillosa al humedecerse dicho pasante, el mencionado comportamiento permite estimarla como competente para su compactación.

Según la Clasificación de Materiales para Subrasante de la *Highway Research Board* (H.R.B.) posee una categorización de A-1-a, lo cual permite que el material que se utilice en la escombrera, también pueda ser utilizado como subrasante; dependiendo de un análisis de costos previo por parte de la empresa para ejecutar dicha posibilidad. Desde el punto de vista de diseño de la escombrera, *British Columbia Mine Dump Committee* (1991) postula que la gradación general del material a integrar la escombrera tiene un impacto directo en la permeabilidad y características de resistencia al corte del botadero. En general, los materiales granulares con poca cantidad de finos, tienen mayor resistencia y conductividad hidráulica que los materiales con gran cantidad de finos. Donde el material de residuo tiene valores cercanos al 10% (material pasante tamiz No.200), los factores más importantes que controlan la gradación son la dureza y la resistencia a la compresión de los fragmentos de rocas. Escombreras de material granular generalmente originan su fuerza del contacto entre las partículas y exhiben características ingenieriles similares a una presa de escollera.

La densidad del material que compone la escombrera tras el ensayo de Proctor Modificado, se establece en un máximo de 2.193 kg/cm² para su compactación con un 6,71% de humedad.

Por otra parte, al analizarse los resultados del ensayo de resistencia al corte en contraste con la configuración propuesta de escombrera y sus resultados tras el análisis por el método de Bishop simplificado, Mogenstern-Price y Jambu simplificado, se obtienen valores de factor de seguridad de 2,174, 2,148 y 2,032 respectivamente, los cuales garantizan una estabilidad apropiada para ser una estructura diseñada para actividad minera. Estando el diseño de escombrera minera integrado por 2 terrazas cada una de 20 metros de altura y anchos de berma de 6 metros, en un frente de aproximadamente 80 metros de largo, para lo cual se estima un peso aproximado de la escombrera de 133.022 toneladas, siendo esta cantidad distribuida en los casi 8.000 m² en los cuales estará emplazada, generando un esfuerzo de aproximadamente 1,66 kg/cm², el cual está muy por debajo del valor de resistencia del macizo de 47,33 MPa o 482,63 kg/cm², garantizando la competitividad del basamento.

La determinación del volumen a ser manejado en la escombrera viene establecido por la relación existente entre la cantidad de roca de uso ornamental producida y el residuo generado durante este proceso, donde se maneja una relación de 1,5 a 1 m³ respectivamente, estimando un aumento anual en la producción del 2,9% según se viene registrando. En este estudio se ha considerado diseñar un sistema de bancos y terrazas que le permitan el aprovechamiento de 35.100 m³ de esquisto en banco, lo cual puede redundar en un esponjamiento de 20%, es decir 42.120 m³ de volumen suelto.

El plan de adecuación de la escombrera inicialmente consiste en el movimiento de aproximadamente 16.000 m³ del residuo presente actualmente en la zona, el cual permitirá definir el área para la creación del resto de la Terraza 1; posteriormente se planea verter desde la cota 180 msnm los residuos sobre la primera terraza construida, con la finalidad de definir la Terraza 2. Para ello se requiere un total de 273 horas de trabajo de máquina (con el uso de los equipos sugeridos en el aparte 3.3.4 del

Capítulo III) para la conformación integral de la escombrera. Se contempla que las horas de trabajo de las máquinas estén distribuidas hasta el año 2019 (Tabla 45), ya que se estima que para la mencionada fecha ocurra el final de las labores de generación de rocas ornamentales.

El sistema de drenaje establecido para el manejo de las aguas meteóricas consta de dos áreas, una primera definida para el macizo de esquistos y sus terrazas, y una segunda para las terrazas de la escombrera, esto permite el desalojo de las aguas con un diseño dimensionado para soportar el nivel máximo de lluvias registrado en la zona.

Según la Planificación de Cierre de Mina de Canteras Tacarigua, C.A., se ha establecido que el área de la escombrera sea destinada a actividades turísticas de largo plazo, en el que sea instalado un mirador y se practiquen deportes. Para ello se sugiere entre otros aspectos, emplear la vegetación adecuada para soportar las condiciones climáticas de la zona, de modo de garantizar una exitosa recuperación ambiental y para el nuevo uso que se le plantea dar.

El trabajo desarrollado bajo el esquema mostrado en la Figura 54 sugerido por *British Columbia Mine Dump Committee* (1991), tiene la intención de replantear las prácticas actualmente usadas en la planificación y desarrollo práctico de las escombreras en Venezuela, sugiriendo la aplicación de estudios al material estéril con la finalidad de conocer sus características y posibles usos. Además, se incita a la ejecución de ensayos granulométricos en el material de residuo, ya que aparte de permitir conocer aplicaciones para las cuales dicha característica física le podría favorecer, puede estimarse de forma más precisa los posibles factores de carga en los equipos mineros.

5.2 Reflexiones finales

Se considera como aporte fundamental el levantamiento geológico de las discontinuidades del cimiento de la escombrera, estudiando si realmente es recomendable proseguir con la construcción de la misma en su ubicación actual o es necesario replantear su ubicación.

La investigación además promueve el uso software minero en la planificación de la escombrera, ya que simplifica la obtención datos tales como el volumen y la extensión de la misma, respetando los ángulos de reposo del material de residuo. Por otra parte, se estimula el reconocimiento de la cuenca en la cual se encuentra la escombrera durante el proceso de desarrollo del sistema de drenajes.

Se considera como de vital importancia que en Venezuela se imite el ejemplo de otras latitudes y se genere una legislación que permita estandarizar los procedimientos de manejo de estériles mineros, manteniendo como principal objetivo la búsqueda de alternativas que permitan convertir un hipotético desperdicio de la minería en un activo para la industria mediante el reconocimiento de sus características tal como se promueve en el presente trabajo. Los resultados de los estudios mostrados en la investigación presentada están sujetos a revisión en la medida que nuevas condiciones tecnológicas permitan obtener observaciones más precisas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez cumplidos los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, donde se enmarca el diseño del plan de adecuación de la escombrera en Canteras Tacarigua, C.A. y analizados los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo del mismo, se presentan una serie de conclusiones específicas que se enlistan a continuación:

- El análisis del emplazamiento de la escombrera permite catalogarlo como de buena calidad ya presenta un $RQD_{in\ situ}$ de 100 y un SMR de 62,5.
- El tiempo de vida útil en el macizo de esquistos se estima hasta 2019, con un volumen total de reservas en banco de 35.100 m³.
- El volumen real de la escombrera es de 56.859 m³, sin embargo posee un sobredimensionamiento de 23,1% lo cual le permite albergar hasta un total de 70.000 m³.
- El diseño final propuesto para la escombrera consta de 2 bancos de 20 metros de altura cada uno, anchos de berma de 6 metros y ángulos de talud de 34°.
- El análisis de estabilidad de los taludes de la escombrera estimado mediante los métodos de Bishop simplificado, Morgenstern-Price y Jambu simplificado son de 2,174, 2,148 y 2,032 respectivamente, valores que se encuentra por encima del mínimo recomendado para minería (1,20), por tanto se considera como estable. La escombrera se considera inestable solo en presencia de fuertes sismos.
- La escombrera será adecuada definiendo con la retroexcavadora inicialmente, una terraza con altura de cota unificada, para luego mantener dicho nivel con el tractor. Una vez sea alcanzada la cota 160 msnm se procede a verter material bajo el método “*push dumping*” (empuje de montones) desde la cota 180 msnm hasta definir la terraza restante.

- El plan de adecuación de la escombrera se estima requiere para su ejecución una inversión de 273 horas de trabajo de máquinas entre el tractor CAT D8N y la retroexcavadora CAT 330L.
- La cuenca en la cual se encuentra la escombrera puede albergar un caudal total de 0,24 m³/s.
- El material de residuo que integra la escombrera (según la *Highway Research Board*) posee una clasificación de A-1-a lo cual lo califica como excelente para el uso como subrasante.
- Por pertenecer Puerto Cabello a la zona sísmica 5 se considera con probabilidades de riesgo sísmico bastante elevadas.

Finalizado el trabajo de investigación de adecuación de la escombrera en la empresa Canteras Tacarigua, C.A. se presentan las siguientes recomendaciones:

- Acatar el plan de adecuación de la escombrera tanto a nivel operativo como de planificación y alterarlo en caso de ser necesario, mientras exista alguna mejora operativa tras las modificaciones.
- Manejar el sistema de drenajes en al menos 2 cuencas con distintas salidas de agua, lo cual permitirá no colapsar el sistema.
- Realizar un estudio más amplio del despacho de lajas y el crecimiento en su demanda, lo cual permitirá estimar con mayor precisión el ritmo de producción y por tanto de generación de residuos.
- Ampliar el alcance de los ensayos de laboratorio acerca del material que integra la escombrera, para determinar si posee usos adicionales que le pueda brindar mayor valor económico.
- Introducir el material de residuo que integra la escombrera como subrasante dentro de los materiales que ofertan para la venta.
- Se propone la creación de una estación pluviométrica en Canteras Tacarigua, C.A. la cual les permita llevar estadísticas más actualizadas de las precipitaciones en la zona.
- La empresa Canteras Tacarigua, C.A. debe plantearse la necesidad de reperfilar y revegetar los taludes de su escombrera a aproximadamente 18° en caso de que la misma sea destinada a la perpetuidad con la finalidad de brindar un mayor factor de seguridad.

REFERENCIAS CONSULTADAS

Consultas Bibliográficas:

ACTIS, R. (2008). “Escombreras: Ubicación, Estabilidad y Contaminación Ambiental”. Fundación EMPREMIN. Argentina. 56 p.

AGUILAR, O. & ZUÑIGA, C. (2015). “Análisis comparativo de estabilidad de taludes mediante los métodos de equilibrio límite aplicado a taludes o laderas aledañas al Cerro de La Popa, casco urbano de Cartagena”. Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. 123 p.

AHMAD, S., et al. (2008). Mine Waste Dumping and Corresponding Environmental Impacts at Chinh Bac Waste Dump in Vietnam. Aachen, Alemania. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2012). “D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort”.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (1998). “D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). (2002). “D5731: Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock”.

APARICIO F., J. (1996). “Fundamentos de Hidrología de Superficie”. Editorial Limusa S.A. de C.V. Perú. 302 p.

ÁVILA, G. (2008). “Diseño y plan de desarrollo de escombrera para el área sur de la Mina Paso Diablo, municipio Mara, estado Zulia”. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 164 p.

BAÑÓN, L. (2000). “Manual de Carreteras”. Volumen II. Universidad de Alicante. Alicante, España. 328 p.

BELANDRIA Y BONGIORNO (2012). “Clasificaciones Geomecánica de los Macizos Rocosos según: Bieniawski, Barton, Romana, Hoek y Brown”. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela. 21 p.

BLANCO, E. (2014). “Escombreras y Presas de Residuos”. Trabajo presentado en clase de Tecnología Mineralúrgica. Universidad de Cantabria. España. 53 p.

- BRITISH COLUMBIA MINE DUMP COMMITTEE*. (1991). “*Investigation and Design of Mine Dumps*”. Columbia Británica, Canadá. 177 p.
- CANTERAS TACARIGUA, C.A. (2008). “Documentos Originales Canteras Tacarigua, C.A.”. Puerto Cabello, Venezuela.
- CARREÑO, J. (2008). “Diseño de escombreras de la mina de roca fosfática (Concesión Riecito), Cerro Riecito, municipio Jacura, estado Falcón”. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 203 p.
- CASTILLO, A. (2003). “Curso De Control de Sedimentos en Minería a Cielo Abierto”. Instituto Tecnológico de la Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas, Venezuela.
- CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS. CEDEX (1973). “Determinación del Índice de Resistencia a la Carga Puntual”. España.
- COTUMAPTE (CONSEJO DE TURISMO, MEDIO AMBIENTE Y POLÍTICA TERRITORIAL DE LA RIOJA). (2006). “Manual de Restauración de Minas a Cielo Abierto”. España. 172 p.
- EPA (*ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY*). (2005). “*The Design and Operation of Waste Rock Piles at Noncoal Mines*”. Estados Unidos. 57 p.
- GÓMEZ, A. Y MAYORA, M. (2006). “Caracterización geológica de la faja dolomítica de la zona ubicada entre Gañango y Patanemo, distrito Puerto Cabello, estado Carabobo”. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 117 p.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. (2002). “Ingeniería Geológica”. Edit. Pearson Educación. Madrid, España. 715 p.
- GRUPO DE GEOTECNIA. (2008). “Ensayo de Compactación Proctor Modificado”. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 16 p.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (2004). “Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería”. Madrid, España. 322 p.
- KUMAR, A. & KUMAR, A. (2005). “*Soil Mechanics and Foundations*”. Laxmi Publications. Nueva Delhi. 917 p.
- LEONI, A. (1987). “Apuntes De Resistencia al Corte”. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina.

- MCGINN, R., (1992). “*Documentation and Evaluation of Mine Dump Failures for Mines in British Columbia*”. 108 p.
- MENÉNDEZ, D. (2002). “Estudio Geológico y Geotécnico de un Área ubicada en la localidad de Carenero, Estado Miranda”. 192 p.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DE COLOMBIA. (2003). “Glosario Técnico Minero”. Bogota, Colombia. 168 p.
- NAVARRO, S. (2008). “Equipos y Técnicas Constructivas”. Madrid, España. 229 p.
- PASTOR, M., QUECEDO, M. & MERODO, J. (2002). “*Modeling Tailings and Mine Waste Dumps Failure*”. 591 p.
- ROMANA, M., SERÓN, J. & MONTALAR, E. (2003). “*SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation*”. ISRM. *Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy*. Johannesburgo, Sudáfrica. 4 p.
- RUIZ, C. (1966). “Clasificación de Materiales para subrasantes del *Highway Research Board* (H.R.B.) su correlación con el valor soporte de California e interpretación”. Buenos Aires, Argentina. 31 p.
- SANCHEZ, L. (2008). “Curso de Manejo de Residuos en Minería”. Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo. Sao Paulo, Brasil.
- TAPIA, A. (2009). “Comparativa de los métodos de cálculo en análisis de estabilidad de taludes”. Instituto Politécnico Nacional. México D.F., México.
- TOMAS, R., DELGADO, J., SERÓN, J. CANO, M. & CUENCA, A. (2009). “Propuesta metodológica para la aplicación del *Slope Mass Rating* Continuo (SMR-C) mediante un sistema de información geográfica”. VII Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables. Barcelona, España.
- TORREZ, M. (2000), “Guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos”. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Valparaiso. Valparaiso, Chile.

Consultas de Internet:

- CIEN (COMISIÓN DE INTERFILIALES DE ESTRATIGRAFÍA Y NOMENCLATURA). (s.f.). Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela INTEVEP-PDVSA. Consultado 23 de marzo de 2015, página web de: <http://www.pdv.com/lexico/a330w.htm>.

RITCHIE SPECS. (s.f.). “Equipos de Construcción”. Excavadoras Hidráulicas. Consultado 28 de mayo de 2015, página web de:
<http://www.ritchiespecs.com/specification?type=&category=Hydraulic+Excavator&make=Caterpillar&model=330B+L&modelid=104007>.

RITCHIE SPECS. (s.f.). “Equipos de Construcción”. Motoniveladoras. Consultado 3 de junio de 2015, página web de:
<http://www.ritchiespecs.com/es/specification?type=&category=Motor+Grader&make=Caterpillar&model=14G&modelid=91802>.

RITCHIE SPECS. (s.f.). “Equipos de Construcción”. Tractores de Oruga. Consultado 26 de mayo de 2015, página web de:
<http://www.ritchiespecs.com/es/specification?type=Construction&category=Crawler+Tractor&make=Caterpillar&model=D8N&modelid=90779>.

ANEXO I

Tablas de ensayos granulométricos

Tabla 49: “Ensayo granulométrico 1”.

ENSAYO 1												
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante					
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra		4"	101,6								
			3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%				
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%				
			2"	50,8	1.160,3	1.160,3	10,2%	89,8%				
			1 ½"	38,1	1.114,8	2.275,0	20,0%	80,0%				
			1"	25,4	2.127,1	4.402,1	38,7%	61,3%				
			¾"	19	864,5	5.266,6	46,3%	53,7%				
			½"	12,7	887,3	6.153,9	54,1%	45,9%				
	Grava	Fina	⅜"	9,51	466,4	6.620,3	58,2%	41,8%				
			¼"	6,5	375,4	6.995,6	61,5%	38,5%				
			No. 4	4,76	386,8	7.382,4	64,9%	35,1%				
			Arena		Gruesa		No. 8	2,38	523,2	7.905,6	69,5%	30,5%
					No. 10	2	79,6	7.985,3	70,2%	29,8%		
			Arena		Media		No. 16	1,18				
No. 20	0,841	614,3					8.599,5	75,6%	24,4%			
No. 30	0,6											
No. 40	0,42	443,6					9.043,1	79,5%	20,5%			
Limo + Arcilla		Fina		No. 50	0,3							
				No. 60	0,25	409,5	9.452,6	83,1%	16,9%			
				No. 100	0,149	420,9	9.873,5	86,8%	13,2%			
				No. 200	0,074	261,6	10.135,1	89,1%	10,9%			
		< No. 200	< 0,074	1.239,9	11.375,0	100,0%	0,0%					
TOTAL				11375								

Tabla 50: “Ensayo granulométrico 2”.

ENSAYO 2								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.092,0	1.092,0	9,6%	90,4%
			1 ½"	38,1	1.342,3	2.434,3	21,4%	78,6%
			1"	25,4	2.013,4	4.447,6	39,1%	60,9%
		¾"	19	887,3	5.334,9	46,9%	53,1%	
		Fina	½"	12,7	830,4	6.165,3	54,2%	45,8%
			⅜"	9,51	534,6	6.699,9	58,9%	41,1%
	¼"		6,5	443,6	7.143,5	62,8%	37,2%	
	No. 4	4,76	261,6	7.405,1	65,1%	34,9%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	477,7	7.882,9	69,3%	30,7%	
		No. 10	2	182,0	8.064,9	70,9%	29,1%	
	Media	No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	420,9	8.485,8	74,6%	25,4%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	557,4	9.043,1	79,5%	20,5%	
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	420,9	9.464,0	83,2%	16,8%	
		No. 100	0,149	307,1	9.771,1	85,9%	14,1%	
		No. 200	0,074	329,9	10.101,0	88,8%	11,2%	
	Limo + Arcilla	< No. 200	< 0,074	12.74,0	11.375,0	100,0%	0,0%	
	TOTAL				11.375			

Tabla 51: "Ensayo granulométrico 3".

ENSAYO 3								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.160,3	1.160,3	10,2%	89,8%
			1 ½"	38,1	1.365,0	2.525,3	22,2%	77,8%
			1"	25,4	1.569,8	4.095,0	36,0%	64,0%
			¾"	19	1.330,9	5.425,9	47,7%	52,3%
			½"	12,7	739,4	6.165,3	54,2%	45,8%
	Fina	¾"	9,51	341,2	6.506,5	57,2%	42,8%	
		¼"	6,5	625,6	7.132,1	62,7%	37,3%	
		No. 4	4,76	341,3	7.473,4	65,7%	34,3%	
	Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	386,7	7.860,1	69,1%	30,9%
			No. 10	2	125,1	7.985,3	70,2%	29,8%
Media		No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	511,9	8.497,1	74,7%	25,3%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	511,9	9.009,0	79,2%	20,8%	
Fina		No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	398,1	9.407,1	82,7%	17,3%	
		No. 100	0,149	432,3	9.839,4	86,5%	13,5%	
		No. 200	0,074	307,1	10.146,5	89,2%	10,8%	
Limo + Arcilla			< No. 200	< 0,074	1.228,5	11.375,0	100,0%	0,0%
TOTAL				11.375				

Tabla 52: "Ensayo granulométrico 4".

ENSAYO 4								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.148,9	1.148,9	10,1%	89,9%
			1 ½"	38,1	1.285,4	2.434,3	21,4%	78,6%
			1"	25,4	1.774,5	4.208,8	37,0%	63,0%
			¾"	19	1.228,5	5.437,3	47,8%	52,2%
			Fina	½"	12,7	841,8	6.279,0	55,2%
	⅜"	9,51		250,2	6.529,3	57,4%	42,6%	
	¼"	6,5		625,6	7.154,9	62,9%	37,1%	
No. 4	4,76	273,0		7.427,9	65,3%	34,7%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	557,4	7.985,3	70,2%	29,8%	
		No. 10	2	79,6	8.064,9	70,9%	29,1%	
	Media	No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	386,8	8.451,6	74,3%	25,7%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	477,8	8.929,4	78,5%	21,5%	
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	466,4	9.395,8	82,6%	17,4%	
		No. 100	0,149	375,4	9.771,1	85,9%	14,1%	
		No. 200	0,074	432,3	10.203,4	89,7%	10,3%	
	Limo + Arcilla	< No. 200	< 0,074	1.171,6	11.375,0	100,0%	0,0%	
	TOTAL				11.375			

Tabla 53: "Ensayo granulométrico 5".

ENSAYO 5									
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante		
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6						
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%		
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%	
			2"	50,8	1.205,8	1.205,8	10,6%	89,4%	
			1 ½"	38,1	1.262,6	2.468,4	21,7%	78,3%	
		Fina	1"	25,4	1.911,0	4.379,4	38,5%	61,5%	
			¾"	19	955,5	5.334,9	46,9%	53,1%	
			½"	12,7	932,8	6.267,6	55,1%	44,9%	
	Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Arena	Gruesa	No. 8	2,38	591,5	8.110,4	71,3%	28,7%
				No. 10	2	68,3	8.178,6	71,9%	28,1%
Media		No. 16	1,18						
		No. 20	0,841	364,0	8.542,6	75,1%	24,9%		
		No. 30	0,6						
		No. 40	0,42	375,4	8.918,0	78,4%	21,6%		
Fina		No. 50	0,3						
		No. 60	0,25	557,4	9.475,4	83,3%	16,7%		
		No. 100	0,149	329,9	9.805,3	86,2%	13,8%		
		No. 200	0,074	307,1	10.112,4	88,9%	11,1%		
Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1.262,6	11.375,0	100,0%	0,0%		
TOTAL				11.375					

Tabla 54: "Ensayo granulométrico 6".

ENSAYO 6								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.160,3	1.160,3	10,2%	89,8%
			1 ½"	38,1	1.285,4	2.445,6	21,5%	78,5%
			1"	25,4	1.820,0	4.265,6	37,5%	62,5%
			¾"	19	1.001,0	5.266,6	46,3%	53,7%
			Fina	½"	12,7	830,4	6.097,0	53,6%
	⅜"	9,51		534,6	6.631,6	58,3%	41,7%	
	¼"	6,5		477,8	7.109,4	62,5%	37,5%	
No. 4	4,76	307,1		7.416,5	65,2%	34,8%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Arena	Gruesa	No. 8	2,38	466,4	7.882,9	69,3%	30,7%
			No. 10	2	91,0	7.973,9	70,1%	29,9%
	Media	No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	591,5	8.565,4	75,3%	24,7%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	455,0	9.020,4	79,3%	20,7%	
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	398,1	9.418,5	82,8%	17,2%	
		No. 100	0,149	443,6	9.862,1	86,7%	13,3%	
		No. 200	0,074	227,5	10.089,6	88,7%	11,3%	
	Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1285,4	11.375,0	100,0%	0,0%
	TOTAL				11.375			

Tabla 55: "Ensayo granulométrico 7".

ENSAYO 7								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.160,3	1.160,3	10,2%	89,8%
			1 ½"	38,1	1.205,8	2.366,0	20,8%	79,2%
			1"	25,4	2.002,0	4.368,0	38,4%	61,6%
			¾"	19	705,3	5.073,3	44,6%	55,4%
	Fina	½"	12,7	1012,4	6.085,6	53,5%	46,5%	
		⅜"	9,51	534,6	6.620,3	58,2%	41,8%	
		¼"	6,5	443,6	7.063,9	62,1%	37,9%	
No. 4		4,76	307,1	7.371,0	64,8%	35,2%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	580,1	7.951,1	69,9%	30,1%	
		No. 10	2	68,3	8.019,4	70,5%	29,5%	
	Arena	Media	No. 16	1,18				
			No. 20	0,841	568,8	8.588,1	75,5%	24,5%
			No. 30	0,6				
			No. 40	0,42	386,8	8.974,9	78,9%	21,1%
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	409,5	9.384,4	82,5%	17,5%	
		No. 100	0,149	352,6	9.737,0	85,6%	14,4%	
		No. 200	0,074	227,5	9.964,5	87,6%	12,4%	
	Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1.410,5	11.375,0	100,0%	0,0%
	TOTAL				11.375			

Tabla 56: "Ensayo granulométrico 8".

ENSAYO 8								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.183,0	1.183,0	10,4%	89,6%
			1 ½"	38,1	1.148,9	2.331,9	20,5%	79,5%
			1"	25,4	1.911,0	4.242,9	37,3%	62,7%
			¾"	19	1.023,8	5.266,6	46,3%	53,7%
			½"	12,7	841,8	6.108,4	53,7%	46,3%
	Fina	⅜"	9,51	466,4	6.574,8	57,8%	42,2%	
		¼"	6,5	580,1	7.154,9	62,9%	37,1%	
No. 4		4,76	273,0	7.427,9	65,3%	34,7%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	580,1	8.008,0	70,4%	29,6%	
		No. 10	2	79,6	8.087,6	71,1%	28,9%	
	Media	No. 16	1,18					
		No. 20	0,841	534,6	8.622,3	75,8%	24,2%	
		No. 30	0,6					
		No. 40	0,42	398,1	9.020,4	79,3%	20,7%	
	Fina	No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	477,8	9.498,1	83,5%	16,5%	
		No. 100	0,149	261,6	9.759,8	85,8%	14,2%	
		No. 200	0,074	341,3	10.101,0	88,8%	11,2%	
	Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1.274,0	11.375,0	100,0%	0,0%
	TOTAL				11.375			

Tabla 57: “Ensayo granulométrico 9”.

ENSAYO 9								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.114,8	1.114,8	9,8%	90,2%
			1 ½"	38,1	1.330,9	2.445,6	21,5%	78,5%
			1"	25,4	1.945,1	4.390,8	38,6%	61,4%
		¾"	19	966,9	5.357,6	47,1%	52,9%	
		Fina	½"	12,7	841,8	6.199,4	54,5%	45,5%
			⅜"	9,51	466,4	6.665,8	58,6%	41,4%
	¼"		6,5	375,4	7.041,1	61,9%	38,1%	
	Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	568,7	7.973,9	70,1%	29,9%
			No. 10	2	136,5	8.110,4	71,3%	28,7%
		Arena	Media	No. 16	1,18			
No. 20				0,841	409,5	8.519,9	74,9%	25,1%
No. 30				0,6				
No. 40				0,42	489,1	9.009,0	79,2%	20,8%
Limo + Arcilla		Fina	No. 50	0,3				
			No. 60	0,25	455,0	9.464,0	83,2%	16,8%
			No. 100	0,149	352,6	9.816,6	86,3%	13,7%
			No. 200	0,074	261,6	10.078,3	88,6%	11,4%
		< No. 200	< 0,074		1.296,8	11.375,0	100,0%	0,0%
TOTAL				11.375				

Tabla 58: "Ensayo granulométrico 10".

ENSAYO 10									
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante		
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6						
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%		
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%	
			2"	50,8	1.092,0	1.092,0	9,6%	90,4%	
			1 ½"	38,1	1.365,0	2.457,0	21,6%	78,4%	
			1"	25,4	1.785,9	4.242,9	37,3%	62,7%	
			¾"	19	1.012,4	5.255,3	46,2%	53,8%	
			½"	12,7	1.023,8	6.279,0	55,2%	44,8%	
	Fina	⅜"	9,51	261,6	6.540,6	57,5%	42,5%		
		¼"	6,5	523,3	7.063,9	62,1%	37,9%		
No. 4		4,76	364,0	7.427,9	65,3%	34,7%			
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Arena	Gruesa	No. 8	2,38	466,4	7.894,3	69,4%	30,6%	
			No. 10	2	91,0	7.985,3	70,2%	29,8%	
		Media	No. 16	1,18					
			No. 20	0,841	523,3	8.508,5	74,8%	25,2%	
			No. 30	0,6					
			No. 40	0,42	455,0	8.963,5	78,8%	21,2%	
	Fina	No. 50	0,3						
		No. 60	0,25	557,4	9.520,9	83,7%	16,3%		
		No. 100	0,149	261,6	9.782,5	86,0%	14,0%		
		No. 200	0,074	329,9	10.112,4	88,9%	11,1%		
		< No. 200	< 0,074	1.262,6	11.375,0	100,0%	0,0%		
	Limo + Arcilla								
	TOTAL				11.375				

Tabla 59: "Ensayo granulométrico 11".

ENSAYO 11								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.069,3	1.069,3	9,4%	90,6%
			1 ½"	38,1	1.251,3	2.320,5	20,4%	79,6%
			1"	25,4	1.945,1	4.265,6	37,5%	62,5%
			¾"	19	1.057,9	5.323,5	46,8%	53,2%
			½"	12,7	910,0	6.233,5	54,8%	45,2%
	Fina	⅜"	9,51	318,5	6.552,0	57,6%	42,4%	
		¼"	6,5	625,6	7.177,6	63,1%	36,9%	
		No. 4	4,76	295,8	7.473,4	65,7%	34,3%	
	Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	386,7	7.860,1	69,1%	30,9%
			No. 10	2	125,1	7.985,3	70,2%	29,8%
Arena		Media	No. 16	1,18				
			No. 20	0,841	466,4	8.451,6	74,3%	25,7%
			No. 30	0,6				
			No. 40	0,42	591,5	9.043,1	79,5%	20,5%
Fina		No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	352,6	9.395,8	82,6%	17,4%	
		No. 100	0,149	477,8	9.873,5	86,8%	13,2%	
		No. 200	0,074	250,3	10.123,8	89,0%	11,0%	
Limo + Arcilla			< No. 200	< 0,074	1.251,3	11.375,0	100,0%	0,0%
TOTAL				11.375				

Tabla 60: "Ensayo granulométrico 12".

ENSAYO 12								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.160,3	1.160,3	10,2%	89,8%
			1 ½"	38,1	1.228,5	2.388,8	21,0%	79,0%
			1"	25,4	2.058,9	4.447,6	39,1%	60,9%
		¾"	19	955,5	5.403,1	47,5%	52,5%	
		Fina	½"	12,7	932,8	6.335,9	55,7%	44,3%
			⅜"	9,51	238,9	6.574,8	57,8%	42,2%
	¼"		6,5	523,3	7.098,0	62,4%	37,6%	
	Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Gruesa	No. 8	2,38	568,7	7.985,3	70,2%	29,8%
			No. 10	2	102,4	8.087,6	71,1%	28,9%
		Media	No. 16	1,18				
No. 20			0,841	364,0	8.451,6	74,3%	25,7%	
No. 30			0,6					
No. 40			0,42	523,3	8.974,9	78,9%	21,1%	
Fina		No. 50	0,3					
		No. 60	0,25	489,1	9.464,0	83,2%	16,8%	
		No. 100	0,149	284,4	9.748,4	85,7%	14,3%	
		No. 200	0,074	113,8	9.862,1	86,7%	13,3%	
Limo + Arcilla		< No. 200	< 0,074	1.512,9	11.375,0	100,0%	0,0%	
TOTAL				11.375				

Tabla 61: "Ensayo granulométrico 13".

ENSAYO 13								
Peso de muestra (g) 11375		Designación del tamiz	Designación del tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Acumulado	% Pasante	
Tamiz (Usando peso total de la muestra)	Piedra	4"	101,6					
		3"	76,2	0,0	0,0	0%	100,0%	
	Grava	Gruesa	2 ½"	63,5	0,0	0,0	0%	100,0%
			2"	50,8	1.148,9	1.148,9	10,1%	89,9%
			1 ½"	38,1	1.092,0	2.240,9	19,7%	80,3%
			1"	25,4	2.218,1	4.459,0	39,2%	60,8%
			¾"	19	955,5	5.414,5	47,6%	52,4%
			Fina	½"	12,7	978,3	6.392,8	56,2%
	⅜"	9,51		68,2	6.461,0	56,8%	43,2%	
	¼"	6,5		648,4	7.109,4	62,5%	37,5%	
No. 4	4,76	273,0		7.382,4	64,9%	35,1%		
Tamiz (fracción peso total de la muestra)	Arenita	Gruesa	No. 8	2,38	637,0	8.019,4	70,5%	29,5%
			No. 10	2	91,0	8.110,4	71,3%	28,7%
	Arenita	Media	No. 16	1,18				
			No. 20	0,841	364,0	8.474,4	74,5%	25,5%
			No. 30	0,6				
			No. 40	0,42	546,0	9.020,4	79,3%	20,7%
	Limo + Arcilla	Fina	No. 50	0,3				
			No. 60	0,25	432,3	9.452,6	83,1%	16,9%
			No. 100	0,149	318,5	9.771,1	85,9%	14,1%
			No. 200	0,074	170,6	9.941,8	87,4%	12,6%
			< No. 200	< 0,074	1.433,3	11.375,0	100,0%	0,0%
	TOTAL				11.375			