

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y ESTABILIDAD DE TALUDES
DE LA CELDA ESPECÍFICA FINAL
PARA DESECHOS TÓXICOS
EN EL RELLENO SANITARIO LA BONANZA
CHARALLAVE, EDO. MIRANDA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para Optar al Título de
Ingeniero de Minas
Por los Brs.
Pacheco P., Bartolomé
Gómez C., Rómulo

Caracas, Agosto 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y ESTABILIDAD DE TALUDES
DE LA CELDA ESPECÍFICA FINAL
PARA DESECHOS TÓXICOS
EN EL RELLENO SANITARIO LA BONANZA
CHARALLAVE, EDO. MIRANDA**

Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo C.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para Optar al Título de
Ingeniero de Minas
Por los Brs.
Pacheco P., Bartolomé
Gómez C., Rómulo

Caracas, Agosto 2001

AGRADECIMIENTOS

- ◆ A la U.C.V., la Facultad de Ingeniería, la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, muy especialmente al Dpto. de Minas.
- ◆ A nuestro tutor, el Profesor Miguel Castillejo C., por su apoyo en la realización de este trabajo.
- ◆ A mi compañero de tesis Rómulo Gómez, por su gran amistad durante toda la carrera.
- ◆ Al Ing. Ernesto D'Escriván Guardia, por su colaboración y ayuda.
- ◆ Al Ing. Ernesto D'Escriván Chiok, de Cotécnica La Bonanza, por poner las instalaciones y el personal a nuestra disposición, para la elaboración del proyecto.
- ◆ A María Teresa Espinoza, nuestra secretaria del Dpto. de Minas, por su ayuda y consejos oportunos.
- ◆ A Naty Pacheco, por su ayuda técnica en la elaboración de esta tesis.
- ◆ A mis compañeros de estudio: Gustavo Bertorelli, Miguel Requena, José Luis Rivas, Luis Bolívar, Carlos López, Miguel Granados, José Herrera, Miguel Silva, Jorge Bolívar, Pedro Castillo, Manuel Méndez, Luis Ríos, William Pérez.
- ◆ A las Profesoras Alba Castillo y Mónica Martiz, por los conocimientos impartidos y por su gran calor humano, manifestados en el transcurso de mi carrera.

Bartolomé Pacheco Pino

AGRADECIMIENTOS

- ◆ A mis padres, por haber sido ellos quienes aportaron la más grande de las ayudas.
- ◆ A Bartolomé Pacheco, mi compañero de tesis, porque sin su ayuda y amistad no hubiese podido alcanzar esta meta.
- ◆ Al Profesor Miguel Castillejo C., por ser el guía de este trabajo.
- ◆ Al Profesor José Luis de Abreu, por su amistad, consejos y ayuda, para así poder alcanzar este nivel de mis estudios.
- ◆ A mis compañeros: Manuel García, José G Brito, José Romero, Adrián Zambrano, Luis Bolívar, Gustavo Bertorelli, Franklin Tapias, Diana Mollegas, Carlos López, Miguel Requena, Juan José Páez y a todas aquellas personas que se me escapan de mi memoria.
- ◆ A Margarita Padrón, Jesús López, Jesús Obelmejías, Roberto Hernández, Leonardo Terán y Herlinda Morales.
- ◆ A los Profesores Ricardo Álvarez, Alonso Romero, Isabel Cruz y Sigfredo Leal.
- ◆ Al Servicio de Vigilancia de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.
- ◆ A la Sra. Carmen de Peña, Eunice Silva, Merlys Domínguez.
- ◆ A las familias Álvarez Duno, Álvarez Paz, Mata Álvarez.
- ◆ A la familia Herrera Espinoza, por su amistad y su incondicional ayuda.

A todos gracias.

Rómulo Gómez C.

Dedicatoria

A Dios y a los Ángeles, que siempre me guían.

A mis padres, por enseñarme a no abandonar, aunque el paso sea lento.

A Franly, para que sea constante y así pueda culminar sus estudios.

A mis hermanos, cuñadas y sobrinos, por estar siempre presentes.

A Mary Carmen, por estar aquí, apoyándome incondicionalmente.

A Julio, por alentarme a finalizar la carrera.

Bartolomé Pacheco P.

*A María, por haber sido la persona que más confió en mí,
incondicionalmente durante todos los años de estudio,
y la que nunca me dejó desmayar, para así poder
saborear con más gusto lo que siempre soñé.*

*A la memoria de José Eloy, quien siempre fue la ayuda
Incondicional y apoyo en esta fase de mi vida.*

*A: Christian Jesús, Christian, Jefferson, Dayanil,
Estefany, Javier Enrique y Javier Eduardo.*

Rómulo Gómez C.

**Pacheco P., Bartolomé
Gómez C., Rómulo**

**DISEÑO Y ESTABILIDAD DE TALUDES
DE LA CELDA ESPECÍFICA FINAL
PARA DESECHOS TÓXICOS,
EN EL RELLENO SANITARIO LA BONANZA.
CHARALLAVE, EDO. MIRANDA**

**Tutor Académico: Prof. Miguel Castillejo C.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería de Minas. Año 2001, 215 p.**

Palabras Claves: Taludes, Relleno Sanitario,
Lixiviados, Geosintéticos.

RESUMEN El objetivo principal de este trabajo, es realizar el Proyecto de Diseño y Estabilidad de Taludes de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos, en el Relleno Sanitario La Bonanza. Hacer el análisis de estabilidad del talud en rocas, por medio del comportamiento cinemático del macizo rocoso y realizar el análisis de estabilidad de los diques de soporte o de confinamiento de los desechos, usando los ábacos de fallas circulares. Explicar el uso de geosintéticos en los sistemas de impermeabilización de los taludes, fondo y tope de la celda, así como la normativa legal vigente sobre la operatividad de los rellenos sanitarios en Venezuela.

TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i> _____	<i>1</i>
1. GENERALIDADES _____	3
1.1. OBJETIVO _____	3
1.2. ALCANCE _____	3
1.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA _____	4
1.3.1. Ubicación _____	4
1.3.2. Acceso y Extensión _____	6
1.3.3 Fisiografía _____	6
1.3.4. Clima y Vegetación _____	9
1.3.5. Drenaje _____	10
1.4. TRABAJOS DE CAMPO _____	10
1.5. RELACIÓN ENTRE UNA MINA Y UN RELLENO SANITARIO _____	11
1.6. ANTECEDENTES _____	12
2. RELLENOS SANITARIOS _____	16
2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES _____	16
2.2. CLASIFICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS _____	21
2.3. RELLENO SANITARIO LA BONANZA _____	24
2.3.1. Generalidades _____	24
2.3.2. Antecedentes _____	24
2.3.3. Características y Tipología del Relleno Sanitario La Bonanza _____	30
2.3.4. Desechos Sólidos _____	35
2.3.5. Lixiviados _____	39
2.3.6. Gas _____	44
2.3.7. Tipos de Recubrimientos Utilizados en el Relleno _____	45
2.3.8. Impacto del Relleno Sanitario La Bonanza en el Medio Ambiente__	49
2.3.9. Proyectos a Desarrollar en el Futuro _____	51
3. GEOLOGÍA _____	54
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL _____	54
3.2. GEOLOGÍA LOCAL _____	58

3.3. HIDROLOGÍA	64
3.4. PERMEABILIDAD	67
3.4.1. Permeabilidad en Suelos	70
3.4.2. Permeabilidad en Rocas	71
3.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	73
3.5.1. Ensayos de Laboratorio	75
3.5.2. Resumen de los ensayos efectuados en campo y laboratorio	76
4. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO	80
4.1. TIPOS DE ROCAS QUE LO CONFORMAN	80
4.2 TIPOS DE SUELOS	81
4.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES	83
4.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS	84
5. DISEÑO DE TALUDES	88
5.1. ELEMENTOS DE DISEÑO	88
5.1.1. Características de las Alternativas Propuestas	94
5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO	96
5.2.1. Talud natural de la celda específica	96
5.2.2. Taludes artificiales o diques	98
5.2.3. Celda específica final	99
6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN ROCAS	107
6.1. TOMA DE MUESTRAS Y MANEJO DE DATOS	107
6.2. FALLA PLANA	111
6.2.1. Condiciones Generales para la Falla Plana	112
6.2.2. Análisis de Fallas Planas	114
6.3. PROYECCIONES HEMISFÉRICAS	126
6.4. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL TALUD	135
6.4.1. Concepto de Cono de Fricción	137
6.4.2. Prueba de Markland	140
7. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN SUELOS	143
7.1. PARÁMETROS DE DISEÑO	143
7.2. PARÁMETROS DE CÁLCULO	144

7.3. ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE LOS DIQUES	144
7.3.1. Condiciones de Apoyo y Fundación de los Diques de Soporte	145
7.4. ANÁLISIS DE FALLAS EN SUELOS	146
7.5. PRESENCIA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA	153
7.6. ÁBACOS O CARTAS DE FALLAS CIRCULARES	156
7.6.1 Forma de Utilizar los Ábacos de Fallas Circulares	156
7.7. LOCALIZACIÓN DEL CÍRCULO DE FALLA CRÍTICO Y DE LA GRIETA DE TENSIÓN	158
7.8. FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES DE LOS DIQUES	159
8. GEOSINTÉTICOS	160
8.1. DEFINICIÓN	160
8.2. CLASIFICACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS	160
8.2.1. Geomembranas	161
8.2.2. Geomallas	167
8.2.3. Geotextiles	171
8.2.4. Geocompuestos	177
8.2.5. Materiales utilizados en la colocación de los Geosintéticos	178
8.3. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS	180
9. NORMATIVA LEGAL	186
9.1. INTRODUCCIÓN	186
9.2. NORMATIVA LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL	187
9.3. NORMAS PARA RELLENOS SANITARIOS EN VENEZUELA	191
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	204
10.1. CONCLUSIONES	204
10.2. RECOMENDACIONES	208
11. BIBLIOGRAFÍA	211

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 1	Ubicación del Relleno Sanitario La Bonanza	4
Fig. N °2	Esquema Funcional de un Relleno Sanitario	19
Fig. N° 3	Esquema Estructural del Sistema de Cierre de un Vertedero	48
Fig. N° 4	Diques de Soporte	98
Fig. N °5	Ubicación de la Celda Específica para Desechos Tóxicos	99
Fig. N °6	Detalle de Colocación de Colectores de Lixiviado. Dren Francés	104
Fig. N° 7	Falla Plana	111
Fig. N° 8	Talud con Grieta de Tensión en la Parte Superior	113
Fig. N° 9	Diagrama de Densidad de Polos de Foliación	128
Fig. N° 10	Diagrama de Densidad de Polos de Diaclasas	129
Fig. N° 11	Histograma de Buzamientos (Foliación)	130
Fig. N° 12	Histograma de Buzamientos (Diaclasas)	131
Fig. N° 13	Roseta de Rumbos de Foliación	132
Fig. N° 14	Roseta de Rumbos de Diaclasas	133
Fig. N° 15	Proyección Hemisférica	134
Fig. N° 16	Talud Natural en Rocas	136
Fig. N° 17	Cono de Fricción	139
Fig. N° 18	Prueba de Markland	141
Fig. N° 19	Perfil del Talud en Rocas	142
Fig. N° 20	Estabilidad de los Diques. Fallas Circulares	148
Fig. N° 21	Patrones de Flujo de Agua Subterránea	155

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Plano aereo- fotogramétrico Nº 1	Ubicación de la Celda de Desechos Especiales	5
Fotografía Nº 1	Topografía Típica de Frentes de Montaña	7
Fotografía Nº 2	Elevaciones Montañosas con Pendientes Mayores de 25°	8
Fotografía Nº 3	Entrada Principal del Relleno Sanitario La Bonanza	25
Fotografía Nº 4	Piscina para Recolección de Lixiviados	32
Fotografía Nº 5	Aireadores en Piscina de Lixiviados	46
Fotografía Nº 6	Modernas Instalaciones en el Relleno La Bonanza	53
Fotografía Nº 7	Esquistos y Foliaciones Cerca de la Carretera	62
Fotografía Nº 8	Esquistos Intercalados con Vetas de Calcita	81
Plano aereo- fotogramétrico Nº 2	Interpretación Fotogeológica en el Área del Relleno La Bonanza	92
Fotografía Nº 9	Vista Parcial del Cerro Los Zamuros	97
Fotografía Nº 10	Falla Plana en el Relleno La Bonanza	110
Fotografía Nº 11	Colocación de Geomembranas	162
Fotografía Nº 12	Fijación de Geosintéticos en la Parte Superior del Talud	183

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1	Valores Típicos de Permeabilidad en Suelos y Rocas	68
Tabla N° 2	Permeabilidad de Diferentes Tipos Litológicos	79
Tabla N° 3	Clasificación Granulométrica	84
Tabla N° 4	Alternativa N° 1	94
Tabla N° 5	Alternativa N° 2	95
Tabla N° 6	Rumbos y Buzamientos	108
Tabla N° 7	Parámetros de Cálculo	144
Tabla N° 8	Factores de Seguridad de los Diques	159
Tabla N° 9	Características de algunos Geotextiles	177

INTRODUCCIÓN

Un talud, es un plano geológico, natural o excavado, inclinado con respecto a la horizontal (buzamiento), y orientado con respecto al norte (rumbo o azimuth del plano).

Su estabilidad, puede ser perturbada por fenómenos naturales o por la actividad humana, de allí la importancia que tiene la investigación sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales, que permiten realizar un diseño y construcción del talud efectivo. La estabilidad de taludes está controlada por una serie de parámetros como: fricción, cohesión, presión de agua, separación de diaclasas, etc.

El diseño y estabilización de los taludes, de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos, en el Relleno Sanitario La Bonanza, fue abordado desde dos puntos de vista. En primer lugar, desde el aspecto geológico, considerando su proceso natural de formación, y en segundo lugar, el aspecto inherente a la modificación a que debe ser sometido el talud, para lograr la estabilidad de acuerdo al factor de seguridad.

Las partes que constituyen el proyecto, básicamente son: las características generales del área de estudio, la geología tanto regional como local, la caracterización del macizo donde se incluyen los diferentes tipos de suelos y rocas, el uso de parámetros de resistencia de la roca, como cohesión y fricción, ya que la finalidad del coeficiente de seguridad es la de compensar la diferencia que existe entre la resistencia real y la considerada en el cálculo.

El talud en roca, se analizó por proyecciones hemisféricas, cono de fricción y prueba de Markland, resultando cinemáticamente estable. Los taludes de los diques de soporte se analizaron por ábacos de fallas circulares.

Se contempló el revestimiento de los taludes, con capas de geotextil y geomembranas, para lograr la estanqueidad de la celda y evitar la migración de los lixiviados al interior del talud. Todo esto forma parte del manejo y operación de un relleno sanitario, según la normativa legal vigente.

1. GENERALIDADES

1.1. OBJETIVO

Realizar el Proyecto de Diseño y Estabilidad de Taludes en la Celda Específica Final, en el área del Relleno Sanitario de la Bonanza. Se realizará el diseño y cálculo del factor de seguridad, tanto del talud natural en rocas, como de los diques de soporte construidos con material de suelo residual

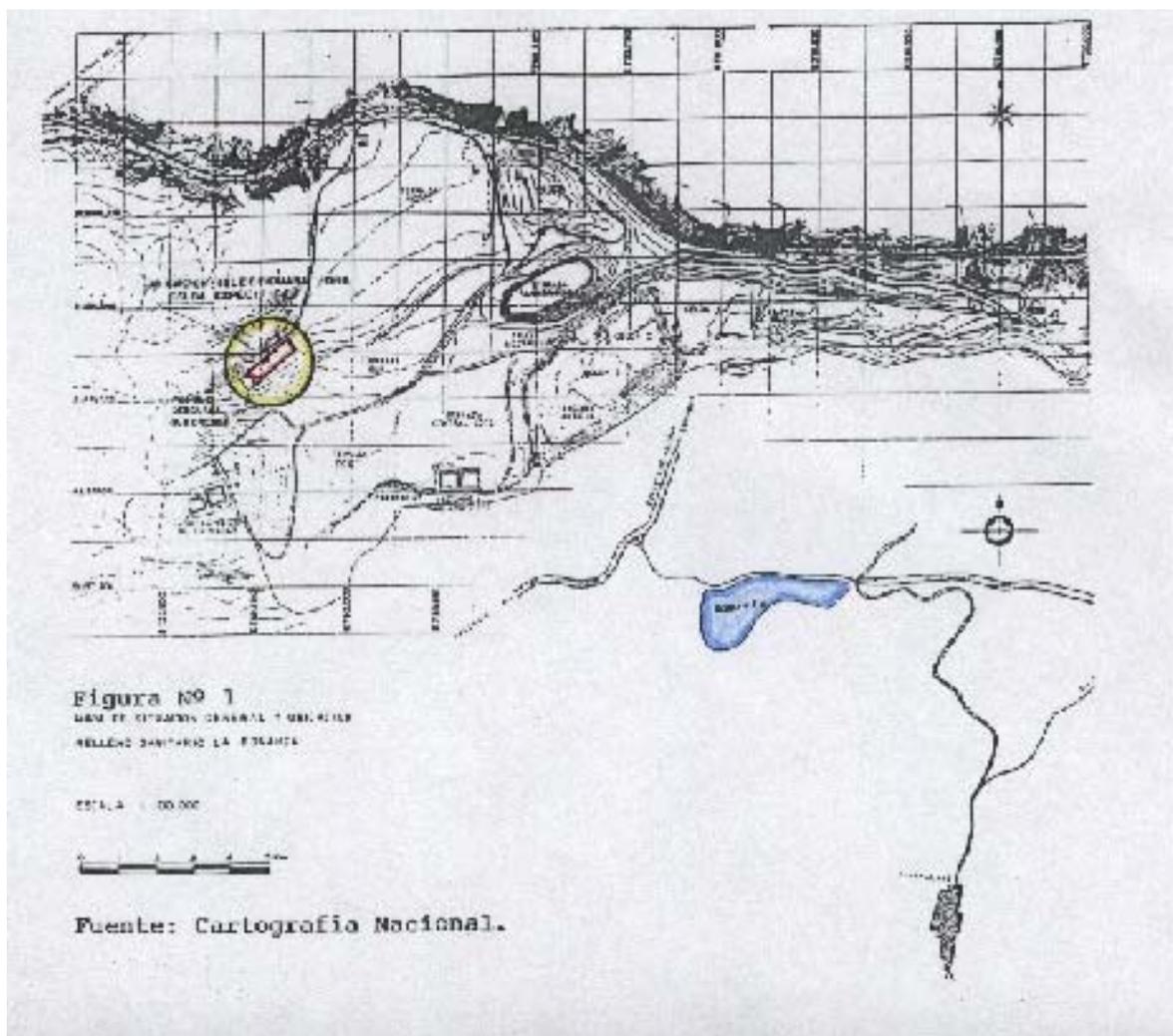
1.2. ALCANCE

La Celda Específica Final para Desechos Tóxicos, en el área del Relleno Sanitario La Bonanza, ha sido diseñada para contemplar un almacenamiento de aproximadamente 80.000 m³, para una vida útil entre 4 y 5 años, con una demanda por año de unas 20.000 toneladas.

1.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA

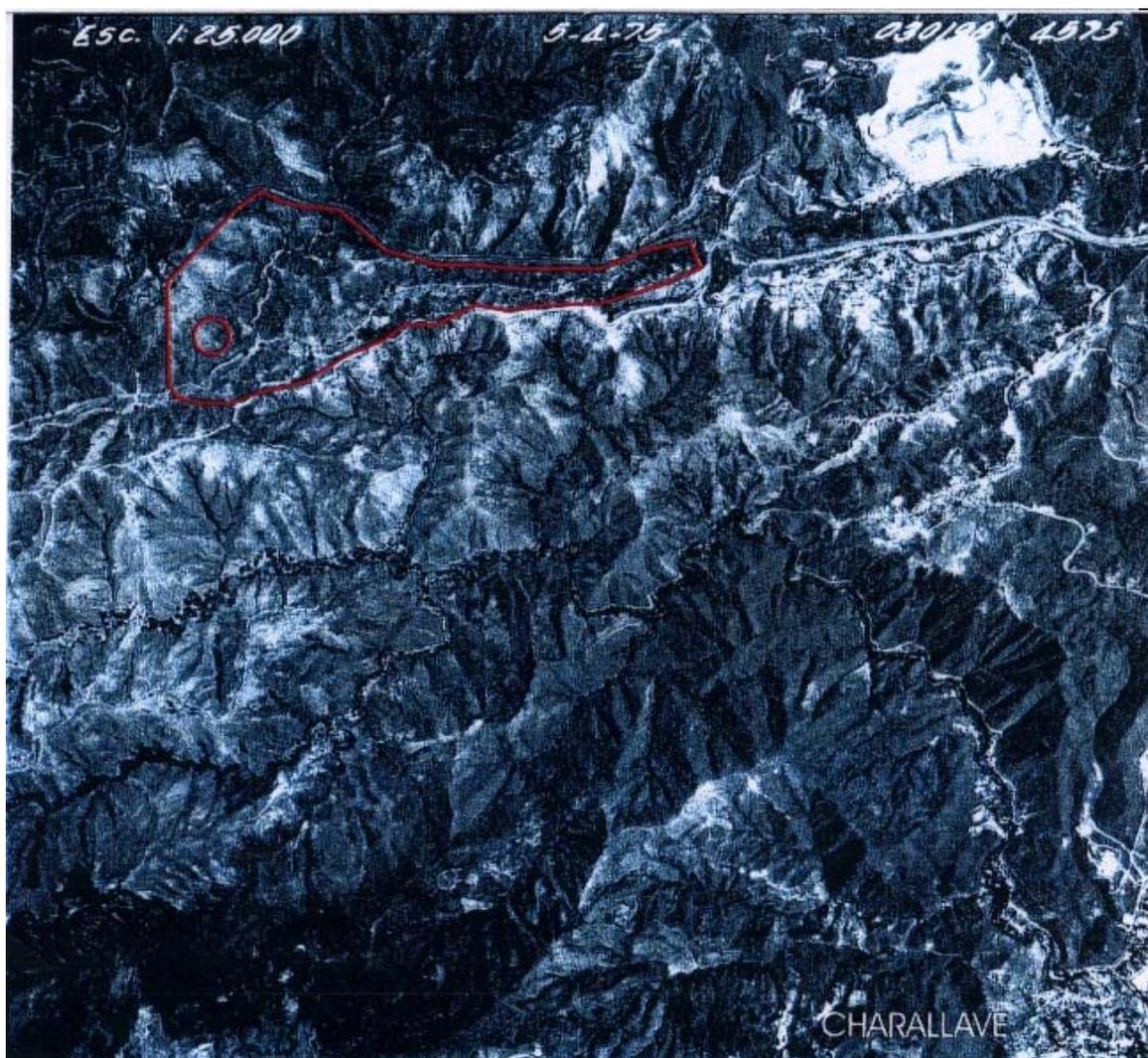
1.3.1. Ubicación

El Relleno Sanitario La Bonanza, se encuentra ubicado en el Distrito Cristóbal Rojas, del Municipio Charallave del Estado Miranda, al margen de la carretera nacional que comunica a la ciudad de Charallave con la autopista Caracas-Valencia. (Ver figura N° 1).



Entre los $10^{\circ} 17' 30''$ de latitud norte y $66^{\circ} 54' 30''$ de longitud oeste con un área aproximada de 190 Ha, pertenecientes a la antigua hacienda La Bonanza. (Ver plano aereofotogramétrico N°1).

UBICACIÓN DE LA CELDA DE DESECHOS ESPECIALES



Plano Aereofotogramétrico N° 1

Fuente: Cartografía Nacional

1.3.2. Acceso y Extensión

El acceso al Relleno Sanitario La Bonanza se realiza, por la autopista regional del centro por el distribuidor Los Totumos, hacia la vía de los Valles del Tuy, en el sector denominado La Bonanza.

Su funcionamiento comenzó en el año 1980, bajo la dirección del Instituto Metropolitano de Aseo Urbano (IMAU) y recibe en la actualidad aproximadamente unas 4000 ton/día de desechos sólidos provenientes de la ciudad de Caracas y su área metropolitana, (Municipio Libertador, Sucre, Chacao, El Hatillo y Baruta), así como de poblaciones circunvecinas, entre ellas Santa Lucía, Los Teques, Cúa, Charallave, Ocumare, Santa Teresa.

1.3.3 Fisiografía

El Relleno Sanitario La Bonanza está situado fisiográficamente en la provincia fisiográfica II, subprovincia 13A, presentando una topografía típica de frentes de montaña, de filas abruptas al norte y bajas y redondeadas al sur que corren con rumbos aproximados de este- oeste. (Ver fotografía N° 1)



Fotografía N° 1

**Topografía típica de frentes de montaña
en el área del relleno**

Dentro de la zona, se encuentra un pequeño valle de unas 36 Has., con elevaciones máximas ubicadas en la parte este con cotas superiores a los 600 msnm y mínimas en la parte oeste por encima de los 500 msnm, siendo las pendientes variables mayores de 25°. (Ver Fotografía N° 2).



Fotografía N° 2

**Elevaciones montañosas con pendientes mayores
a los 25°, con cotas entre 500 y 600 msnm.**

El eje del valle, está ocupado por la quebrada intermitente El Vegote, la cual constituye el drenaje principal. Esta quebrada junto a la quebrada Paracotos y otras quebradas menores forman la quebrada Charallave, afluente del río Tuy. (MARNR, 1985).

1.3.4. Clima y Vegetación

La región está comprendida, en una zona templada subtropical, caracterizada por vegetación abundante y bien desarrollada de bosque montano bajo, a premontano.

Se puede decir, que presenta una vegetación densa, producto del clima y del frente montañoso

La precipitación anual es de aproximadamente 1400 mm, siendo los meses de abril a septiembre los de mayor lluviosidad y el mes de marzo el de menor precipitación.

Presenta una temperatura: media anual entre 12° y 27°, media mínima: 16,37° y temperatura máxima de 31°, con una humedad relativa de 84,52% y una velocidad media anual del viento de 1,64 m/s. La evaporación máxima se manifiesta en el mes de marzo.

1.3.5. Drenaje

El drenaje de la región, se presenta en forma dendrítica entre los espacios de los planos de foliación y diaclasas.

El cauce principal de drenaje, esta constituido por la quebrada llamada El Vegote, la cual es de tipo intermitente desplazándose aguas abajo hacia el sur hasta llegar al río Tuy por medio de la quebrada Charallave.

Actualmente el curso de la quebrada El Vegote no existe, ya que fue canalizada por medio de subdrenes para aprovechar el área en la construcción de celdas para el depósito de desechos sólidos. Los cursos de agua generalmente son de poca trayectoria y poco caudal, sin embargo en época de lluvia, aumenta el cauce y se forman lagunas en diversas áreas del relleno.

1.4. TRABAJOS DE CAMPO

Se llevaron a cabo los trabajos de campo, siguiendo la metodología de acuerdo al tipo de investigación y al diseño de la misma.

- ◆ Se efectuaron mediciones de las principales estructuras geológicas utilizando instrumentos tales como la brújula Brunton para

determinar rumbos y buzamientos, así como el empleo del GPS para hallar la ubicación geográfica del área en estudio y así poder medir directamente por vía satelital, las coordenadas topográficas.

También se utilizaron mapas cartográficos de Cartografía Nacional, como referencia para la ubicación geográfica de la zona.

- ◆ Se tomaron muestras tanto de rocas como de suelo para su posterior análisis.
- ◆ Se realizaron observaciones de diversas estructuras geológicas como foliaciones, diaclasas, fallas, etc.

1.5. RELACIÓN ENTRE UNA MINA Y UN RELLENO SANITARIO

El manejo y operación de un relleno sanitario, presenta una gran similitud con las labores que se desarrollan en un área minera. Todos los aspectos, inherentes a las operaciones mineras: transporte, maquinarias pesadas, frentes de trabajo, drenajes, uso de geosintéticos, estabilización de taludes, impermeabilización de lagunas, vías de acceso, construcción de escombreras, canales, rampas, y toda aquella actividad que se genera regularmente en una mina, también se realizan en el manejo del relleno sanitario.

La compra de maquinaria pesada, camiones, compactadoras o cualquier otra adquisición que realiza la administración del relleno sanitario, bien sea directamente o por medio de licitaciones, las hace a las mismas compañías que surten a las empresas mineras.

Sin embargo hay que señalar que mientras en una mina se realizan labores de excavación con el fin de extraer el mineral, en el relleno sanitario se hacen excavaciones para construir celdas que van a albergar capas de desechos sólidos, intercaladas con capas de cobertura hasta el llenado total y cierre de la celda.

1.6. ANTECEDENTES

Este tipo de celda, ha sido utilizada por distintas empresas petroleras en las regiones del oriente del país, específicamente en zonas a las cuales se les ha hecho un estudio riguroso para proceder a depositar desechos tóxicos, provenientes de residuos de la refinación del petróleo en la obtención de aceites y gasolinas, así como desechos resultantes del complejo petroquímico en la elaboración de plásticos y sus derivados.

En el XIII Seminario Venezolano de Geotecnia, sobre Experiencias Venezolanas en Geotecnia Ambiental, realizado por la Sociedad Venezolana de Geotecnia en el año 1994, el Ingeniero Armando

Galaviz, presentó un trabajo denominado: “*Algunas Técnicas Para El Tratamiento Preventivo Y Correctivo De Problemas Relacionados Con La Contaminación Y Preservación Del Medio Ambiente Así Como En La Disposición De Desechos Tóxicos*”, en el cual, destacan tres etapas previas a la selección de una metodología aplicable a los problemas, relacionados con la preservación del medio ambiente y además desarrolla los medios utilizados comúnmente en Europa. (Ver anexo 1).

También el Ingeniero Pietro De Marco (1994), presenta en el mismo seminario el Trabajo: “*Reconocimiento de Suelos Contaminados En Áreas Industriales*”, en el cual se indican los principales aspectos, que deben tomarse en cuenta para la realización de estudios geotécnicos en áreas contaminadas. (Ver anexo 1).

En lo referente a la Estabilización de Taludes, el análisis de un bloque de roca que descansa sobre una discontinuidad, o de una cuña definida según dos planos de estabilidad, depende de la existencia de condiciones potencialmente inestables.

En 1979, De Marco, P. y Hernández, F., realizan la “Evaluación y Análisis de Algunos Problemas de Estabilidad de Taludes en Excavaciones en el Cerro Bolívar, Estado Bolívar”, donde utilizan el método de Bishop simplificado en suelos y la evaluación cinemática y análisis de los taludes en roca, mediante proyecciones hemisféricas.

Rivas P. (1987), estudia en “Análisis y Diseño de Estabilidad de Taludes Afectados de la Terraza L, Sector C de la Urbanización Nueva Tacagua, Parroquia Sucre”, el riesgo geológico en los cerros de Caracas, la problemática geotécnica de los taludes y la descripción teórica y práctica de las diferentes metodologías que utilizan el principio del equilibrio límite, para el análisis de la estabilidad de taludes.

Posteriormente, en 1990, Arcos M., investiga la “Influencia del Agua en la Estabilización de Taludes”. Se determinan las condiciones del terreno, las características y la influencia del agua en el fracturamiento de la roca.

Herrera, J. (1999), mediante el “Análisis Comparativo de Soluciones Geotécnicas en Estabilización de Taludes en el Área Metropolitana”, comprobó las condiciones litológicas existentes en las zonas para la evaluación de diferentes taludes.

En cuanto a los trabajos de protección del talud con geosintéticos (geomembranas, geotextil o geocompuestos), encontramos que en el año 1985, se realizaron dos trabajos que destacan el uso de este tipo de recubrimientos. Rambaldo, M., trabaja sobre la “Aplicación de Membranas Geotextiles a Drenajes y Subdrenajes” y Herrera A., realiza un “Análisis de la Aplicación de Geotextiles efectuados en Venezuela”, haciendo una amplia exposición de los diferentes usos de estos revestimientos.

2. RELLENOS SANITARIOS

2.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Desde principios de los años 80, el interés por solucionar los problemas que se generan por descuidos al medio ambiente, ha aumentado progresivamente hasta el punto de legislar, promulgando leyes y adecuándolas a las nuevas exigencias, haciéndolas cada vez más precisas y restrictivas, en beneficio de la sociedad.

En este orden de ideas, los rellenos sanitarios o de seguridad, también llamados depósitos de desechos, son instalaciones en las cuales, para su diseño y construcción necesita de la participación de una gran cantidad de técnicos y profesionales de diferentes sectores, debido a que un vertedero de desechos sólidos puede considerarse una obra muy compleja, que abarca aspectos diversos como: geología e hidrología, hidráulica, estudio del clima, geotecnia, tecnología de los materiales (geosintéticos), plantas de tratamiento de los lixiviados.

El proyecto debe prever varias fases, en las cuales se tienen en cuenta numerosos parámetros y aspectos técnicos:

- I - Fase de elección del sitio
 - a) análisis del territorio a servir
 - b) características geológicas e hidrogeológicas
 - c) análisis de las condiciones climáticas
 - d) morfología superficial
 - e) sismicidad
 - f) vínculos legales

- II- Diseño general del relleno
 - a) capacidad de recepción
 - b) geometría del relleno o vertedero
 - c) análisis de estabilidad
 - d) vías de acceso y de servicio
 - e) análisis del impacto sobre le medio ambiente

- III - Proyecto de los distintos aspectos
 - a) impermeabilización de la celda
 - b) sistema de contención de los desechos
 - c) sistema de colocación y compactación de los desechos
 - d) sistema de extracción del lixiviado
 - e) sistema de extracción y quemado de gas
 - f) instalación de planta de tratamiento del lixiviado
 - g) obras de recuperación ambiental

Los Rellenos Sanitarios o de seguridad son instalaciones que permiten la disposición de desechos domésticos y desechos tóxicos provenientes de industrias y de hospitales, los cuales son depositados en celdas y aislados del medio ambiente.

Los rellenos de seguridad se conciben dentro de un relleno sanitario (Celda Específica Final de Desechos Tóxicos), como parte de un sistema de gestión de los residuos tóxicos o peligrosos.

Hay que tener en cuenta, de acuerdo al tipo de desecho, su almacenamiento, aislamiento, reciclaje, tratamiento y transporte, de manera que los residuos que llegan al relleno de seguridad, sean exclusivamente los que representan un peligro por sus características, los que no pudieron ser eliminados de otra forma y que se encuentran aptos para su disposición en el relleno.

Un vertedero o relleno realizado con criterios de seguridad, puede considerarse como una envoltura estanco, de forma tal, que los desechos acumulados en él no puedan hallar ninguna vía de comunicación con el exterior, sino las que se hayan previsto expresamente. (Ver figura N° 2)

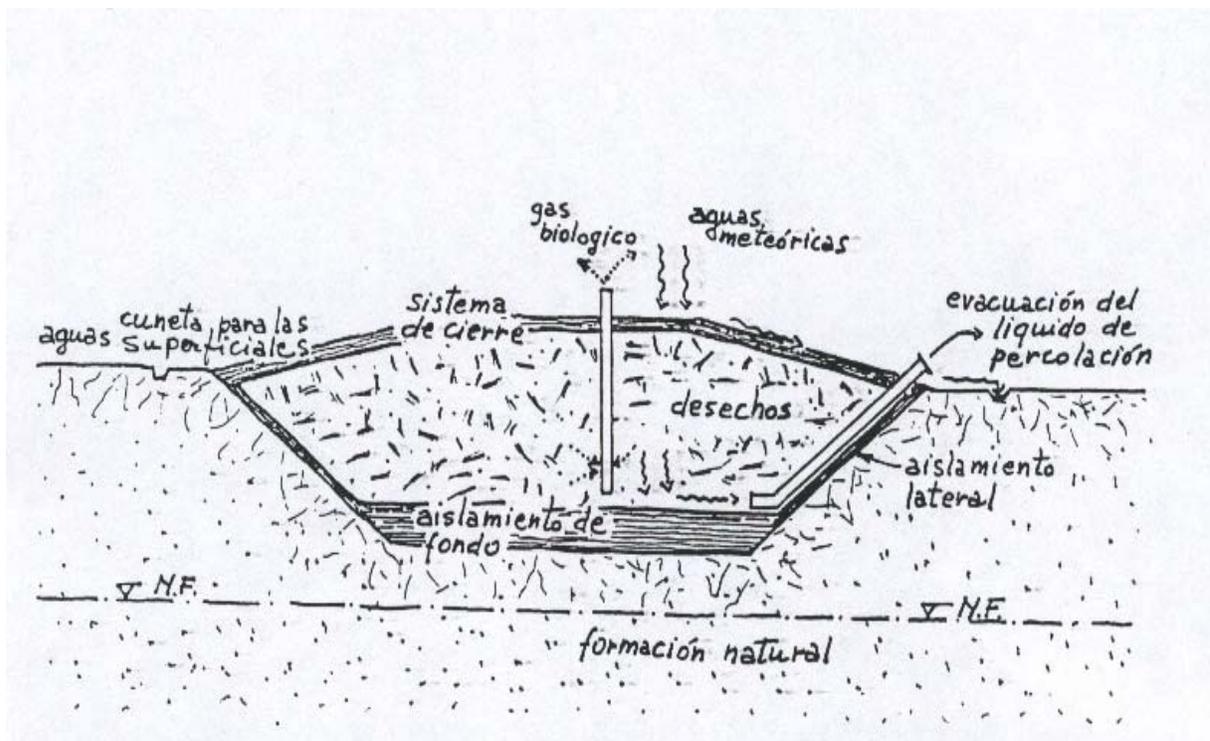


Figura N° 2: Esquema funcional de un relleno sanitario

Fuente: XIII Seminario Venezolano de Geotecnia (1994)

El diseño, construcción y operatividad de un relleno sanitario tiene ventajas y desventajas, que de alguna manera impactan en el medio ambiente y en las comunidades.

Entre las ventajas de poseer un relleno sanitario, en buenas condiciones de manejo de los desechos tenemos:

1. Disposición de los desechos de manera ordenada, sin causar problemas de salud pública por malos olores, desperdicios fuera de su sitio, o cualquier otro inconveniente que pueda causar potenciales focos de contaminación.
2. Una vez ocupada su capacidad totalmente, el área del relleno sanitario puede ser usada como parques, campos de golf, canchas deportivas, estacionamientos y áreas de esparcimiento.

Entre las desventajas tenemos:

1. Riesgo de contaminación, debido a infiltraciones del lixiviado al terreno natural provocando un gran daño al ambiente.
2. Riesgo de contaminación, debido a la producción de gas, el cual se genera por la descomposición de los desechos y que resulta ser gas metano, muy comburente por demás.

3. El libre acceso de personas al área del relleno, trae serios problemas de salud pública, lo cual debe ser combatido por el personal de vigilancia del relleno.

2.2. CLASIFICACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS

Se clasifican de acuerdo al sistema empleado para realizar la disposición de los desechos.

♦ Método de área o zona

Este sistema se emplea en áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para depositar la basura. La preparación del lugar se hace colocando revestimiento de geosintéticos para evitar la percolación de los lixiviados. El material de cobertura debe ser traído desde terrenos adyacentes o zonas de fosas de rellenos suplementarios.

♦ Método de celda o zanja excavada

Se utiliza principalmente en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas que varían aproximadamente de 60 a 300 m de largo, con pendientes laterales 1,5:1 a 2:1, de 1 a 3 m de profundidad y 4,5 a 15 m de ancho.

Se utiliza una retroexcavadora o tractor de oruga. La tierra que se extrae, se coloca a un lado de la zanja para utilizarla como material de cobertura. Los desechos son colocados dentro de la zanja, para luego compactarlos y cubrirlos con una capa de no menos de 30 cm de tierra. Este tipo de relleno es idóneo para zonas donde el nivel freático es bajo.

◆ **Método de vaguada o depresión**

Para este método, se utilizan depresiones naturales, hondonadas, área de canteras abandonadas, barrancos como sitios de vertido. Para este tipo de relleno, se utilizan algunas técnicas de colocación y compactación de los desechos, las cuales varían de acuerdo a la topografía de la región, de acuerdo al sistema de recolección y canalización de los lixiviados, de acuerdo al control de las instalaciones de gas y por el acceso al sitio.

El material de recubrimiento, se obtiene de excavar las paredes antes de instalar los geosintéticos. En algunos casos como las canteras, no contienen suficiente tierra para la cobertura, por lo que será necesario traer material de zonas aledañas.

◆ **Método de trinchera o fosa**

Es el más utilizado e indicado para rellenos de seguridad, debido a los factores de compatibilidad químicas y peligrosidad de los desechos tóxicos que serán depositados.

Consiste, en remover material del suelo, luego se coloca el revestimiento de impermeabilización, se colocan los desechos y posteriormente se agrega el material de cubrimiento diario y al final del llenado de la fosa, se coloca la cobertura final. Se utiliza en regiones con nivel freático relativamente profundo.

2.3. RELLENO SANITARIO LA BONANZA

2.3.1. Generalidades

En el siguiente aparte de este capítulo, nos referiremos al funcionamiento específico del Relleno sanitario La Bonanza, en algunos aspectos inherentes al impacto que se genera en el medio ambiente, en cuanto a su operatividad, manejo de los desechos y funcionamiento de los servicios, así como el cumplimiento de las Normas Venezolanas vigentes.

2.3.2. Antecedentes

El relleno sanitario La Bonanza, es uno de los más grandes del continente junto con el relleno EL Rutal en Chile. Ubicado en el Km. 27 desde el peaje de Tazón, en la carretera nacional que conduce a los Valles del Tuy, fue fundado en el año 1975, pero es en el año 1980, cuando es asumida la dirección por el Instituto Metropolitano de Aseo Urbano (IMAU), instituto autónomo adscrito al Ministerio de Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR). (Ver Fotografía N°3)



Fotografía N° 3

Entrada principal de las Instalaciones del Relleno Sanitario

“La Bonanza”

Al crearse la Ley de Supresión del IMAU, el relleno sanitario La Bonanza pasó a depender de MANCOSER METROLITANA, Mancomunidad creada el 28 de Enero de 1994, con el fin de prestar el Servicio de Disposición Final de los Residuos Sólidos del Área Metropolitana de Caracas y su Zona de influencia.

En el año de 1996, realizaban los trabajos de compactación y cobertura de los desechos, la Compañía Constructora GAL y MANCOSER (Mancomunidad de las Alcaldías del Área Metropolitana de Caracas), la encargada de administrar las operaciones del relleno sanitario. En esa época el volumen de basura diario proveniente de la capital era de unos 4500 toneladas, lo cual arrojaba un promedio de aproximadamente 500 a 800 gramos de basura por persona.

Para el año 1997, se amplió a tres empresas que laboraban en el relleno y que dependían de Mancoser. Una de las empresas realizaban trabajos de acarreo, compactación y cobertura de los desechos sólidos, otra empresa hacía el mantenimiento de los respiraderos o fumarolas, especie de tubo plástico recubiertos de grava, para el desalojo del gas metano y evitar la acumulación de este en cada terraza, y por último la empresa dedicada al

mantenimiento de todas las áreas del relleno, la cual no fue utilizada por la administración, lo cual trajo como consecuencia, tanquillas obstruidas por residuos y lodo producto de las lluvias.

Algunas áreas, requirieron ser despejadas por medio de maquinaria pesada, pero la administración no las tenía a su disposición, motivo por el cual las lluvias esparcieron los desperdicios por todas las terrazas.

No se ha realizado la canalización de las aguas de drenaje, por lo que se mezclan con el lixiviado, lo cual resulta altamente contaminante, las lagunas artificiales no han sido tratadas por falta de recursos.

A mediados de 1997, se genera una crisis, más de doscientas mil toneladas de basura no habían sido compactadas, se encontraban esparcidas por todas las terrazas, generándose un problema sanitario.

A finales de ese mismo año, se produce un incendio en el relleno sanitario, el cual se logró extinguir compactando con tierra el volumen de basura incendiado.

A comienzos del año 1998, se procede a realizar una licitación, a la cual concurren cinco empresas venezolanas y

extranjeras, las cuales presentaron sus propuestas para obtener una concesión por veinte años para operar el área de La Bonanza.

Entre las empresas que participaron, se encuentran: Fospuca-Consorcio FDS (Venezuela-España), Caabsa Eagle (México), Consorcio Sabempe Lirca (Venezuela), Cotécnica CGEA (Venezuela-Francia) y Rust Enviroment and Infrastructure (USA).

Cotécnica-CGEA, la empresa venezolana asociada a la francesa, obtuvo la concesión de operar por veinte años la disposición final de los desechos en el relleno sanitario La Bonanza.

La empresa francesa CGEA, tiene experiencia internacional, maneja unos 132 depósitos de basura a nivel mundial.

La CGEA, se formó en Francia en 1912, a partir de la empresa GRANDJOUAN, existente en Nantes a partir de 1867. Las actividades de Grandjouan en residuos sólidos comprendían recolección, transporte y disposición final, incluyendo sistemas de compostificación. Estas experiencias traspasadas a CGEA, permitieron al grupo expandir sus actividades en Francia, logrando alcanzar en 1921 los servicios de la ciudad de Paris.

A partir de 1922, las actividades se expandieron a los alrededores de París. En 1931 se incorpora a los servicios, la transferencia vía ferrocarril y aparecen las primeras barredoras mecánicas del mercado. La empresa USA, incorporada al grupo CGEA, opera desde 1931 una planta de incineración.

La recolección selectiva para sistemas de reciclaje, comienza a ser operada por CGEA en 1934. A partir del término de la Segunda Guerra Mundial, CGEA expande sus operaciones en Francia y comienza su proyección internacional, logrando constituirse a esta fecha, en la mayor empresa europea en manejo de residuos sólidos.

En 1980, la Compagnie Generale des Eaux, adquiere CGEA, integrándose así a la mayor empresa mundial en manejo de aguas, que además es la principal empresa privada de transporte en Europa, la mayor empresa constructora de Europa y presente en el campo inmobiliario, telecomunicaciones y multimedia.

En el año 1999, bajo la nueva administración de Cotécnica-CGEA, se aplicaron técnicas en el tratamiento de lagunas de lixiviado, lo que trajo como consecuencia la disminución en forma considerable del olor a basura que era percibido en las inmediaciones del relleno, la disminución de zamuros en la zona, lo que significaba un peligro para los usuarios del aeropuerto Caracas.

Actualmente, el relleno tiene un buen funcionamiento, las empresas Cotécnica, Sabempe y Fospuca, son las encargadas de la recolección de la basura en el área metropolitana, las cuales han implementado en los diferentes municipios, a través de instituciones educativas campañas de recolección para el reciclaje de envases de aluminio, cajas de cartón, vidrio, hierro en forma de chatarras, papel, plástico, textiles.

En el relleno, existe un personal ajeno a la empresa, debidamente identificado con carnet y vestimenta suministrada por la empresa y que se denominan recicladores, los cuales se encargan de seleccionar de los desechos, todo el material aprovechable y reciclable.

2.3.3. Características y Tipología del Relleno Sanitario La Bonanza

El Relleno Sanitario La Bonanza, conforme a la clasificación de rellenos sanitarios, le corresponde de acuerdo a su forma geológica y topográfica, un relleno tipo Vaguada/Depresión natural, el cual se van rellinando los desfiladeros y hondonadas, hasta convertirlos en celdas.

La Bonanza posee un área de 186 hectáreas, en la cuales se han diseñado celdas para la colocación de los desechos sólidos, actualmente se encuentra en fase de relleno la celda 1, y se encuentran en construcción las celdas 2 y 3, las cuales se encuentran divididas por diques diseñados y construidos para tal fin.

El proyecto de desarrollo del relleno pretende extender la construcción de celdas hacia el Este, para desechos adicionales, debido a que en la actualidad las terrazas norte, sur oeste y centro oeste, se encuentran rellena de desechos pero de manera directa sobre el terreno, depositados anteriormente por otros métodos, antes de la entrega de la concesión a la empresa Cotécnica.

Sobre la terraza norte se encuentran las tuberías de gas y los quemadores del gas metano, producido por la descomposición de los desechos.

Al sur oeste se encuentra la piscina de lixiviados (Ver fotografía N° 4), al cual llegan por medio de tuberías por gravedad y posteriormente por el mismo medio llegan a la piscina de tratamiento para luego ser vertidos al curso de la quebrada El Vegote.



Fotografía N° 4

Piscina para la recolección de lixiviados.

Al norte se encuentra una laguna de agua limpia, utilizada como reservorio para las plantas, en caso de incendio, para llenado de camiones cisternas para el regadío de las vías de acceso que no están asfaltadas.

En el centro se encuentra ubicado el taller mecánico, para la reparación y mantenimiento de maquinarias pesadas y vehículos de la empresa, y se encuentra además, el trailer para el personal que trabaja por turnos.

Al Este de la celda N°1, se encuentra la plataforma de reciclaje que es el único lugar permitido para la permanencia de las personas que trabajan como *recicladores*, dentro de las instalaciones del relleno. Un poco más hacia el Este, se encuentra la zona para el reciclaje de chatarra, tales como calentadores de agua, metales diversos, electrodomésticos, etc. También se encuentra aladaña el área de aseo personal de los recicladores, un logro realizado por la nueva administración.

En la entrada del relleno, en la vía principal de acceso, se encuentra una romana, donde los camiones son pesados cuando entran y cuando salen, a fin de establecer controles de la cantidad

de desechos que ingresan y que salen diariamente y el lugar de donde provienen.

Se creó un lugar tipo aula o mirador ambiental, la cual está ubicada en el límite norte de las instalaciones administrativas y cuyo objetivo principal es el de poseer un lugar donde dictar charlas, o recibir a grupos de personas provenientes de instituciones que deseen conocer el funcionamiento del relleno sanitario.

La oficina principal, está ubicada al noreste y cuenta con un equipo multidisciplinario conformado por ingenieros de distintas áreas y un personal técnico capacitado tanto para el desarrollo del proyecto, como para realizar un riguroso control de obras.

Además, cuenta con medidas de seguridad ejercidas por la Guardia Nacional y personal de vigilancia privada, los cuales protegen las instalaciones impidiendo la entrada de personas no autorizadas. También en la empresa se cumplen las normas de seguridad en cuanto al uso de cascos y chalecos.

2.3.4. Desechos Sólidos

Hasta el día de hoy, no existe una definición y terminología universalmente aceptada en lo que se refiere a los desechos sólidos y su manejo.

Para su denominación, generalmente suelen emplearse una serie de sinónimos, es así como indistintamente se habla de desechos sólidos, residuos sólidos, desperdicios o simplemente basuras, entendiéndose como tal “a todos aquellos materiales generados en las actividades de producción, transformación y consumo, que no han alcanzado en el contexto, en que se han generado, ningún valor económico o social”.

Lo dicho anteriormente, se puede deber a la imposibilidad de ser nuevamente utilizado, por no existir la tecnología adecuada de recuperación, de reciclaje o bien por no ser posible su comercialización.

En base a la definición anterior, los desechos sólidos urbanos están conformados por una mezcla heterogénea de elementos, cuyas características y contenidos están relacionadas con los hábitos del hombre.

◆ Tipos de Desechos

Domésticos: Proviene de los hogares en las distintas ciudades y municipios de la comunidad. Son de origen animal, vegetal, vidrios, papel, maderas, etc. En fin, materias orgánicas e inorgánicas en general.

Institucionales: Son los generados en universidades, ministerios, escuelas y otros, donde el mayor desechos sólido está constituido por papel, cartón y plástico.

Áreas libres: Estos desechos provienen de las calles y áreas recreacionales, campos deportivos, parques y playas y lo conforman en su mayoría materia orgánica como restos de alimentos, vasos de cartón y plásticos, restos de plantas, hierbas, cartón, vidrios, etc.

Especiales: Son desechos específicos de ciertas áreas; como hospitales, clínicas, clínicas veterinarias, plantas de tratamiento, industrias, construcción y demolición, industria agropecuaria, etc.

Tóxicos: Se refiere a todos aquellos desechos, que representan un peligro para la comunidad, bien sea de salud pública o de seguridad, los cuales provienen de hospitales e

industrias con características de toxicidad y peligrosidad, son inflamables, explosivos y/o bioacumulables a corto y largo plazo y por ello son clasificados de alto riesgo para las comunidades.

◆ **Características Físicas de los Desechos**

Humedad: Es el contenido de agua expresado en términos de porcentaje. Esta agua puede presentarse como agua libre, que se puede medir, y por el método de gravimetría determinarse su cantidad, o puede presentarse como agua de composición, que es el agua a nivel de molécula y que no se puede medir.

El grado de compactación de los desechos indica el grado de humedad, a mayor compactación menor humedad y viceversa.

Densidad: Es el peso por unidad de volumen de los desechos sólidos. La densidad real es la que poseen al originarse y la densidad aparente es la que muestran después de compactados.

Composición Porcentual: Se trata de los componentes que aparecen con más frecuencia, en cantidades medibles y de la proporción que presentan estos componentes dentro de una

cantidad de desechos mezclados. Es importante conocer la composición porcentual, para poder luego evaluar el método de disposición final que se va a utilizar.

Tamaño de partículas: Se refiere al diámetro equivalente, del material que pudiera ser susceptible de recuperación.

◆ **Características Químicas de los Desechos.**

Los desechos sólidos, representan una mezcla de materia orgánica e inorgánica que pueden ser algunos combustibles y no combustibles cuyas propiedades químicas es necesario conocer para la planificación de su manejo y disposición.

Las propiedades químicas son:

Material Combustible: Es el tipo de material, que al contacto con el oxígeno genera una combustión con desprendimiento de calor.

Material Volátil: Se refiere al material perdido, después de una combustión por encima de los 950 °C.

Carbón Fijo: Es el residuo producto de la combustión.

Punto de Fusión de la Ceniza: Temperatura a la cual se funde la ceniza.

En la composición química del material combustible se debe tener en cuenta el contenido de Carbón, Nitrógeno, Oxígeno, Hidrógeno, Azufre y Cenizas, ya que conocidos estos valores es posible estimar la cantidad de energía contenida en los desechos. (CASTRO 1993).

2.3.5. Lixiviados

Se define lixiviado, como una solución acuosa que se produce por la descomposición de los desechos, y por la disolución que se genera en contacto con el agua proveniente de escorrentía, producto de las lluvias, compuesta de sustancias orgánicas e inorgánicas solubles, y que percola a través de las capas de los desechos sólidos.

El lixiviado también se produce por el agua contenida originalmente en los desechos y por aguas subterráneas que se infiltran en las capas de residuos. Además contienen diversos elementos derivados de la solubilización de los materiales depositados en el relleno y de los productos de reacciones químicas y bioquímicas que se producen dentro del mismo. (Calvo et al. 1998).

Se denomina lixiviado intrínseco, al producido por la descomposición de los desechos sólidos, y se estima su volumen en función de los valores típicos de composición de los desechos sólidos provenientes de una determinada ciudad, así como los valores típicos de humedad de cada componente, y se puede establecer un promedio ponderado de la humedad de esa ciudad. (Castro 1993).

◆ **Características Físico-Químicas del Lixiviado**

Están presentes en la composición del lixiviado, compuestos orgánicos e inorgánicos, caracterizados por la alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (D.B.O.).

La composición química y las características físicas de los lixiviados, provienen de datos limitados, sin embargo se han reconocido tres variables que controlan esas características físicas:

◆ **Variabilidad en la composición de los desechos sólidos**

Dependiendo del sitio de donde provienen los desechos, es posible determinar un estimado aproximado de la composición que pueda presentar el lixiviado que se genera a partir de estos desechos y del agua que se infiltra en las capas.

El conocimiento de las características y de la composición química del lixiviado, como el pH y Eh, es muy importante para poder evaluar el riesgo de contaminación que corren los acuíferos.

◆ El clima

Las condiciones climatológicas, influyen en la composición y características del lixiviado. En época de lluvias, los desechos reciben una gran cantidad de agua, diluyendo el lixiviado y por ende se genera un gran volumen de éste, por otra parte en verano el lixiviado surge en poca cantidad y en mayor concentración, siendo los desechos la única fuente de lixiviado.

◆ El tiempo

El tiempo de depositación, actúa como estabilizador de las condiciones químicas de los desechos y de los lixiviados. Los lixiviados con valores de $\text{pH} \leq 7.0$, corresponden a *rellenos jóvenes*, y estos responden a tratamientos biológicos, mientras que los lixiviados con valores de $\text{pH} \geq 7.0$, corresponden a *rellenos viejos*, y responden a tratamientos físico-químicos. (CASTRO 1993).

La composición química de los lixiviados, tiene que ver directamente con la clase de desechos sólidos que los origina. Estos lixiviados, se afectan también en su composición química de acuerdo al sitio donde se depositan, las condiciones meteorológicas, la humedad, la pluviosidad y en caso de que el sitio donde se hizo la disposición final de los desechos no se haya impermeabilizado, la composición química de las aguas meteóricas, tendrá un papel influyente en la modificación del lixiviado.

Una vez que el lixiviado se infiltra en las capas de desechos y de cobertura de tierra, comienza a producirse en los desechos compuestos por materia orgánica e inorgánica, una serie de procesos como los de dilución, degradación, atenuación y precipitación, los cuales son controlados por las condiciones imperantes en los niveles saturados y no saturados del suelo.

Estas modificaciones en la composición química del lixiviado, se debe a la infiltración cada vez mayor en el terreno, donde ocurren reacciones entre sus componentes y partículas minerales que componen la roca.

Los iones que se producen de las diversas reacciones, pasan a formar parte de la composición química del lixiviado.

La nueva composición del lixiviado cambiará en el tiempo, en la medida que la fuente de estos iones se agoten y aparezcan nuevas fuentes. La composición química del lixiviado es variable en el tiempo y en el espacio.

◆ **Contaminación de los acuíferos por lixiviados**

La contaminación de los acuíferos, va a depender de la vulnerabilidad de éste, de sus condiciones geológicas e hidrogeológicas y de sus características intrínsecas que determinan el grado de sensibilidad de ser penetrado o no por diversos agentes contaminantes.

La cantidad de contaminantes que ingresan en el acuífero y que pueden afectarlo, se generan de la actividad diaria y cotidiana que realiza el hombre, en la que se producen grandes cantidades de desechos y aguas residuales. Proviene también, de su constante avance hacia la tecnología, el cual incluye procesos industriales, agrícolas, mineros, etc.

La posibilidad de que un acuífero sea penetrado por contaminantes, depende de dos factores importantes:

1.-La zona saturada sea inaccesible debido a condiciones hidrogeológicas.

2.-La capacidad de atenuación de los estratos por encima de la zona no saturada.

También es importante, nombrar otros factores como:

- ◆ Lo profundo que se encuentra la mesa de agua.
- ◆ El tiempo de ocurrencia del agua subterránea.
- ◆ Las características litológicas y el grado de consolidación de los estratos por encima de la zona saturada. Porosidad relativa, permeabilidad y/o fisuración. (CASTRO1993).

2.3.6. Gas

El gas se produce dentro de un relleno, por descomposición de los desechos sólidos, constituidos por materia orgánica e inorgánica. La mayor parte del gas producido, resulta de la mezcla de diferentes gases como Metano (CH_4) y Dióxido de Carbono (CO_2), Productos principales de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica por biodegradación de los desechos.

Otros componentes del relleno son: Nitrógeno y Oxígeno atmosférico, Amoníaco y compuestos orgánicos en trazas. CALVO (1998).

2.3.7. Tipos de Recubrimientos Utilizados en el Relleno

Para proteger el fondo y los taludes de las celdas donde se van a depositar los desechos sólidos, se utilizan una serie de recubrimientos necesarios para la protección del sitio, de la flora, de la fauna. Para realizar esta protección, se utilizan materiales naturales y fabricados.

Los recubrimientos suelen estar formados por capas de arcillas compactadas y/o geomembranas, diseñadas para prevenir la migración del lixiviado y del gas del relleno.

Las instalaciones para el control del Relleno Sanitario La Bonanza, incluyen recubrimientos, sistemas para la recogida y extracción del lixiviado, piscina de lixiviados con cuatro (4) aireadores, (Ver fotografía N° 5), sistemas de extracción y recogida del gas del relleno, colocación de capas diarias y finales de cubrimiento.



Fotografía N° 6

**Piscina de lixiviados donde se observan dos (2)
de los cuatro (4) aireadores que posee**

◆ Cobertura Final

Al llenarse la celda donde han sido depositados los desechos sólidos, hay que realizar un sistema de cobertura final, considerando varios aspectos como: higiene, seguridad, estética, unidos a requisitos ingenieriles como permeabilidad, compresibilidad y resistencia.

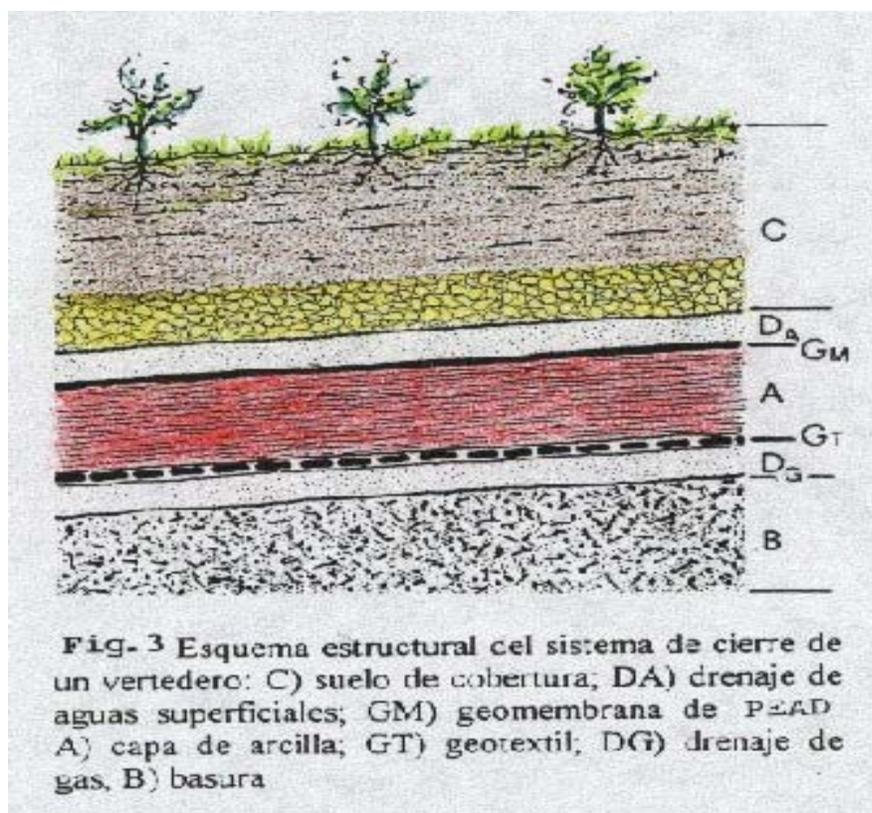
Hay que reducir al mínimo la infiltración de las aguas superficiales en el cuerpo del relleno, limitando la formación de líquidos de percolación.

Según las especificaciones del M.A.R.N.R. (1998), en el sistema de cobertura final, se debe colocar sobre los desechos una capa de material granular con espesor de 20 cm., a fin de facilitar la salida de los gases, luego una capa de arcilla compactada de 60 cm. de espesor. A continuación, una membrana de polietileno de alta densidad de 2,5 mm de espesor, posteriormente una capa de material granular de 30 cm. de espesor, para el drenaje de las aguas de lluvia. Por último, una capa de suelo vegetal de 50 cm. de espesor. (Ver figura N° 3).

La cubierta vegetal, por lo general consiste de material margoso-limoso orgánico, utilizado como soporte de la vegetación que resultan ser gramíneas.

La cobertura final, debe proporcionar un soporte estructural a la cubierta vegetal y soportar las cargas impuestas por el destino que tenga el área en cuestión como por ejemplo:

- .- el tráfico de vehículos propios del relleno
- .- estacionamientos y áreas de esparcimiento
- .- canchas deportivas.



Fuente: XIII Seminario Venezolano de Geotécnica (1994).

2.3.8. Impacto del Relleno Sanitario La Bonanza en el Medio Ambiente

El funcionamiento del relleno puede considerarse satisfactorio, ya que el proyecto previsto a realizarse por etapas, se ha cumplido fielmente, aunque con algunas situaciones que están por resolverse y que se espera puedan mejorarse y evitar en lo posible daños al medio ambiente.

Debido a terrazas rellenas con desechos en épocas anteriores, existen lixiviados producto de estos desechos. Actualmente se tratan de canalizar por medio de canales con menor pendiente y tratar de llevarlos al nivel de la piscina de tratamiento.

Se realizan monitoreos de aire, lixiviado y calidad del agua. La presencia de partículas en suspensión de polvo por el paso de maquinarias y vehículos, dificulta el estudio de la calidad del aire. Por otra parte se encuentra en estudio, la corriente de aire caliente que genera el quemador de gases y que esta podría afectar las condiciones ambientales alrededor del aeropuerto Caracas.

El control sobre los malos olores generados por los desechos ha sido mitigado eficientemente y prueba de ello, son las

opiniones de los usuarios de la Autopista Regional del Centro y los de la vía hacia los Valles del Tuy.

Se realizan frecuentemente las pruebas de control de lixiviados, que consiste en disminuir el D.B.O. o demanda biológica de oxígeno y además se está utilizando una nueva tecnología, que consiste en un polvo compuesto principalmente por una variedad de bacterias, que permite fijar vectores altamente contaminantes, que oxidan el material metálico en suspensión, sedimentándolo y posteriormente es extraído, para luego enviar finalmente los lixiviados tratados, previo análisis de calidad de aguas, al cauce del la quebrada El Vegote.

Otro aspecto muy importante es la presencia de animales, ya que abunda el zamuro y su control es muy complejo. Recomendaciones de la empresa francesa para ahuyentarlos es el uso de cohetes pirotécnicos, pero se presenta un inconveniente, ya que estos perforan los geosintéticos instalados ocasionando daños, resultando un costo adicional en la reparación y pruebas de estanqueidad.

Por otra parte, resulta beneficiosa la presencia de halcones, por la disminución casi por completo de roedores en las instalaciones del relleno.

Existe en la zona, una fauna representada por diversos animales como culebras, iguanas, diferentes tipos de aves, zorros. Estos animales son retirados de las instalaciones del relleno y llevados a otros ambientes sin ser maltratados.

2.3.9. Proyectos a Desarrollar en el Futuro

Dentro del desarrollo de la nueva administración por parte de la empresa Cotécnica, se encuentran una serie de proyectos a ser puestos en marcha en el futuro. De esta manera, se podrán solventar muchos de los problemas, que actualmente aquejan al proceso de saneamiento del relleno sanitario La Bonanza.

Entre los proyectos a futuro, se encuentran: la conexión de la terraza sur al sistema de gas de la terraza norte, y la creación del sistema de recolección de gases para las terrazas oeste y central-este.

También, existe un proyecto a desarrollar de gran importancia, y se trata de la re-inyección de los lixiviados en las capas de desechos, para generar mayor cantidad de gas, que permita de una manera más rápida la descomposición de los desechos.

Se pretende, crear un sistema de canales tipo cuneta en el área que anteriormente fue el cauce natural de la quebrada, en el que actualmente funcionan las celdas de desechos. Por razones conocidas, las aguas por escorrentía natural buscan acumularse en ese sitio, y además estimuladas por la presencia de las celdas mismas.

La administración del relleno sanitario La Bonanza, ha venido realizando las operaciones de acuerdo a la normativa legal venezolana vigente, utilizando para ello tecnología de punta a nivel mundial y un buen equipo de trabajo multidisciplinario, en modernas instalaciones que se han venido construyendo en los últimos años. (Ver fotografía N° 6).



Fotografía N° 6

**Modernas instalaciones del Relleno Sanitario
“La Bonanza”**

3. GEOLOGÍA

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El Sistema de la Cordillera de la Costa, limita por el oeste con la deflexión de Barquisimeto y por el este con la Península de Araya-Paria, por el sur con Guárico septentrional y Carabobo oriental; denominado también Napa de la Cordillera de la Costa, la cual posiblemente prolonga estos límites hasta Trinidad y Tobago al este, y la Goajira conjuntamente con la cordillera occidental de Colombia por el oeste.

El relleno sanitario La Bonanza, se encuentra ubicado en un valle intramontano perteneciente a la Formación Las Mercedes del llamado Grupo Caracas, el cual está conformado además por la Formación Las Brisas y La Formación Peña de Mora.

La Formación Las Mercedes, es de origen Mesozoico (jurásico-cretácico) y según AGUERREVERE Y ZULOAGA (1937), dan el nombre de Esquistos Las Mercedes a una extensa zona de esquistos calcáreos grafitosos en la región de Caracas. Posteriormente, al año siguiente lo llevan al rango de Formación.

Según SEIDER (1965), la Formación Las Mercedes consiste en filitas carbonáceas o grafiticas (70% más o menos), Caliza gris oscuro de estratificación delgada (15% más o menos) y presencia en poca cantidad de rocas arenosas y rudáceas (15% más o menos).

Las rocas rudáceas, son en su mayoría arenisca pura feldespática y arenisca pura de cuarzo con estratificación delgada a gruesa, incluidas capas conglomeráticas que gradan hasta areniscas impuras de cuarzo. Localmente existe un buen desarrollo de estratificación gradada.

Según WEHRMANN (1972), y la revisión de GONZALEZ DE JUANA *et al.* (1980), existe en la región un predominio litológico de esquistos cuarzo-muscovítico-calcítico-grafitoso, intercalados con lentes de mármoles grafitosos.

Existen horizontes de mármoles oscuros en capas delgadas sin posición estratigráfica definidas, que cuando alcanza gruesos espesores es denominada “Calizas Coloradas” o “Caliza de Los Colorados”. Las rocas presentan buena foliación y grano fino a medio con un color gris pardo, presentando una mineralogía con un 40% de cuarzo en forma de banda con mica, un 20% de muscovita en bandas lepidoblásticas, calcita con un 23% en cristales maclados, un 5% de grafito y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y plagioclasa sódica.

URBANI *et al* (1997), estudia mineralógicamente los mármoles de

esta formación en la zona de Barlovento en el Estado Miranda, hallando una baja concentración de dolomita y un predominio de calcita

La pirita es un mineral accesorio, característico de esta formación, común en todos los tipos de rocas donde se presentan vetas de cuarzo y calcita. La pirita se meteoriza dando un color de rosado a rojizo a su alrededor y de marrón a pardo en presencia de calcita blanca, a la cual se le denomina erróneamente calcita ferruginosa, ankerita o siderita. En muestras tomadas de perforaciones profundas no aparecen estas coloraciones.

La Formación Las Mercedes, presenta en su parte inferior un desarrollo bien marcado, de la textura metamórfica donde la mayoría de las capas arenosas son esquistos y las rocas pelíticas son localmente esquistos pelíticos en vez de filitas. En la parte superior de la formación, no se encuentran detritos de feldespatos, se encuentran en la parte inferior.

WEHRMANN (1972), señala que hacia su tope, la formación se hace cada vez más cuarzosa y menos calcárea. Según el mismo autor la base de la Formación es concordante con la Formación Antímano o transicional con la Formación Las Brisas, la cual es componente del Grupo Caracas.

El yeso se presenta en el área de la Formación Las Mercedes, en forma de películas en planos de estratificación y en diaclasas, el cual debe su origen a diversos ajustes superficiales activos actualmente. Este yeso se forma de la oxidación de la pirita y de la solución de calcita las cuales suministran los iones necesarios para su formación

Entre los principales tipos de rocas presentes en La Formación Las Mercedes, se encuentran los conglomerados arenisca pura y grauwaca, caliza y filita

Las rocas areniscas se presentan en capas, cuyo espesor varía entre láminas finas y unidades de más de dos metros de espesor, aunque comúnmente el espesor de las capas oscila entre unos centímetros y un metro. El tamaño del grano varía desde el limo y arena fina hasta guijarros de varios centímetros de diámetro. Los granos de medio centímetro no son frecuentes.

Las capas son gradadas, no se observan estructuras primarias dentro de estas ni se observan estratificación cruzada, rizaduras, estructuras de corte, ni estratificación lenticular.

En las areniscas puras calcáreas, la calcita está casi siempre recristalizada completamente; granos de cuarzo y feldespato fuertemente penetrados. En las areniscas más foliadas se presentan granos de cuarzo y feldespato achatados con pedazos de mica en los

bordes. Además de la calcita, los minerales que se presentan en mayor abundancia en los detritos son el cuarzo y la albita. Las turmalinas y la pirita son accesorios frecuentes, el zircón y la apatita en menor cantidad igual que los principales minerales metamórficos como la muscovita y la clorita.

Las rocas calizas en su mayoría son de color gris oscuro, el cual se debe a la presencia de grafito a lo largo de los bordes de los granos y en forma de hojas finas. En general la estratificación varía en algunos centímetros sin llegar al medio metro.

TALUKDAR Y LOUREIRO (1982), sugieren un ambiente euxínico en una cuenca externa a un arco volcánico. La estructura finamente laminada de las calizas, indica la sedimentación en un ambiente pelágico, mientras que los escasos restos de fósiles hallados, indican lo contrario.

3.2. GEOLOGÍA LOCAL

En la región afloran rocas pertenecientes a la Formación Las Mercedes, constituidas principalmente por filitas y esquistos grafitosos, calizas y metareniscas las cuales se encuentran intercaladas en los planos de foliación.

Las filitas y esquistos grafitosos calcáreos son principalmente sericíticos-grafitosos, de color gris oscuro presentando alto grado de meteorización. Son abundantes las vetas de calcita, tienen buena esquistosidad y por lo general están plegados. Son las rocas más abundantes de la zona en estudio.

Por lo general, los esquistos cuyos principales minerales presentes macroscópicamente son cuarzo, muscovita y sericita, presentan un intenso brillo con intercalaciones de mica color rojizo producto de capas de oxidación.

Las metareniscas son de color pardo grisáceo a marrón rojizo y color meteorizado ocre naranja a negro, de granulometría media y constituida predominantemente por cuarzo y feldespatos. Tienen aspecto masivo y están intercaladas con las filitas y esquistos calcáreos-grafitosos formando capas de hasta 35 cm de espesor, paralelas a la foliación.

Las calizas son de color gris, gris azulado y gris oscuro con presencia de gran cantidad de grafito. Las calizas se presentan en dos formas:

- 1) En capas delgadas (< 40 cm.) paralelas a la foliación e intercaladas con filitas y esquistos calcáreos-grafitosos.

2) En capas lenticulares en forma de horizonte discontinuo paralelos a la foliación.

También se encuentran en forma lenticular, mármoles de color gris claro a negro, que pueden variar de acuerdo a la proporción de minerales presentes como cuarzo, calcita y grafito ocasionalmente. De igual forma, se observan colores de meteorización gris-rojizo a pardo-rojizo.

Según Ramírez y D'Escrivan (2000), en el área existe un conjunto de rocas metamórficas, las cuales fueron discriminadas en unidades informales en base a criterios geográficos, texturales y mineralógicos. Se definen como unidades informales por razones de extensión.

De esta discriminación se definen las siguientes unidades:

♦ **Unidad Esquisto Cuarzo Micáceo (ECM)**

La unidad de Esquisto Cuarzo Micáceo (ECM), aflora en las inmediaciones del relleno sanitario hacia el norte vía Charallave, se ubican al lado de la carretera y en las instalaciones del relleno sanitario.

En la unidad, hay variaciones litológicas importantes como lo es la presencia de intercalaciones de bloques de mármoles de mayor competencia que los esquistos que caracterizan la unidad.

El contacto es transicional y definido por la presencia en mayor abundancia de grafito y calcita. La continuidad y extensión de la unidad hacia el sur se desconoce porque debe aflorar por debajo del relleno sanitario.

Entre los minerales presentes, se encuentra el cuarzo generalmente orientado paralelamente a la foliación, las bandas presentan diferentes espesores y diferente tamaño de grano. Por lo general es microcristalino, aunque también en menor proporción se presentan granos policristalinos, con bordes de regulares a irregulares, subhedrales y con extinción ligeramente ondulatoria. Es común encontrar vetas en dirección diferente a la foliación.

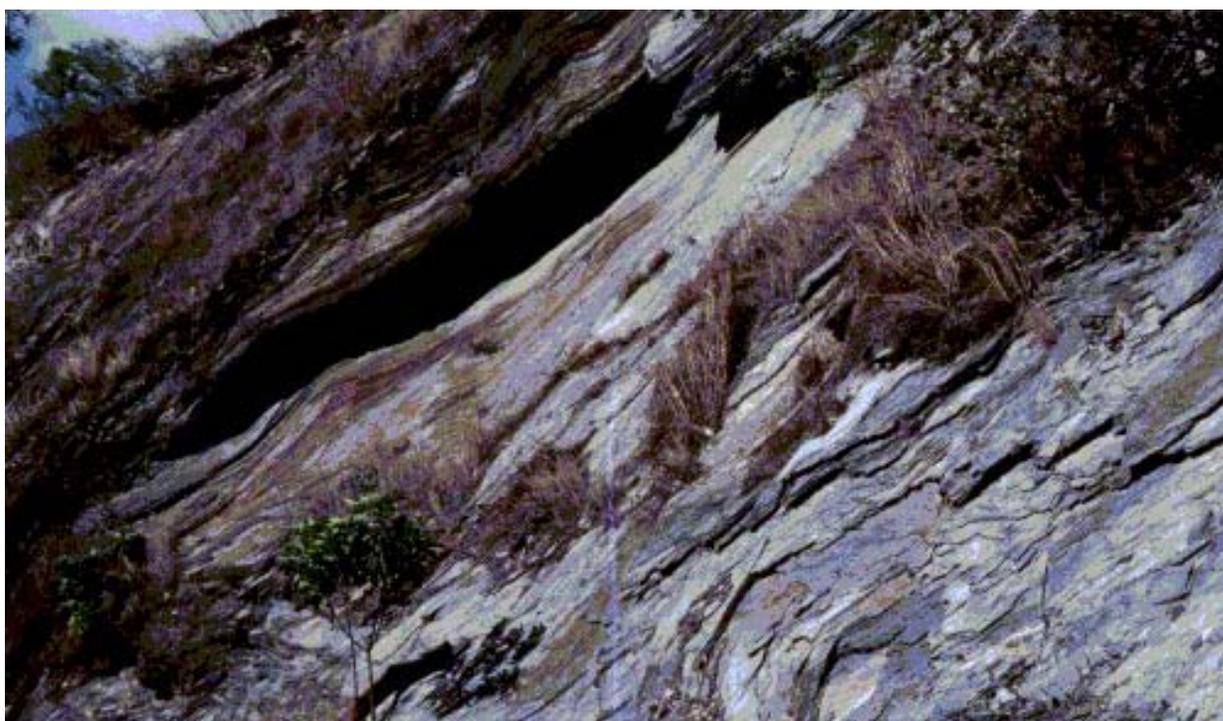
La Muscovita se presenta teñida con una coloración rojiza por la oxidación del hierro presente, paralela a la foliación, con granos alargados.

La biotita aparece en menor proporción en forma tabular y las micas también asociadas al microplegamiento.

La pirita está presente en pequeñas proporciones o como trazas, posiblemente meteorizada, originando gran parte del óxido de hierro.

◆ **Unidad Esquisto Grafítico Calcáreo (EGC)**

Esta unidad, aflora infrayacente a la unidad anterior de Esquistos Cuarzo Micáceos, y estos afloramientos se ubican en las inmediaciones del relleno sanitario y en los alrededores de la carretera. (Ver fotografía N° 7).



Fotografía N° 7

**Se observan los esquistos y las foliaciones en las
cercanías de la Carretera Nacional.**

Hacia el tope la unidad es más calcárea, y hacia la base más grafitosa. Las intercalaciones de mármoles son de mayor competencia que los esquistos.

Los contactos son transicionales con la unidad de Esquistos Cuarzo Micáceos, debido a la presencia de mayor cantidad de grafito junto con la calcita y disminución de las micas características de la Unidad suprayacente Esquistos Cuarzo Micáceos, pero en conjunto relacionable con la Formación Las Mercedes.

Los esquistos presentan una coloración gris-plata-rosado y meteorizado gris oscuro a negro, localmente microplegados y con orientación de foliación con rumbos variables.

Los principales minerales son: el cuarzo, sericita, calcita y grafito, con presencia de puntos de oxidación dándole una coloración rosada-rojiza a las micas.

Se observan vetas de cuarzo, que se caracterizan por ser paralelas a la foliación, y otras que con mucha frecuencia la cortan. También se aprecian vetas de calcita

DENGO (1951), afirma que las vetas de cuarzo son posiblemente el resultado de secreciones de cuarzo de las rocas sujetas a metamorfismo. También sostiene que las vetas de calcita se encuentran dentro de la foliación y posiblemente se formaron como segregación de las rocas con las que están asociadas.

La presencia de mármoles grafitosos, evidencian una mayor competencia de la roca y hacia la base de la unidad disminuye la proporción de cuarzo y las micas están ausentes. Presentan colores frescos gris-rosado-pardo y meteorizados pardos rojizos a negro.

3.3. HIDROLOGÍA

Para que exista el movimiento del agua subterránea a través de los intersticios, estos deben estar conectados, y cualquier gradiente de presión causará dicho movimiento.

Es primordial, la determinación de las condiciones en que se encuentran estas aguas subterráneas, la recarga y descarga del acuífero, la calidad del agua, las características hidráulicas, influencia del fracturamiento de las rocas en la contaminación de las aguas subterráneas, influencia de los materiales no consolidados, espesor de

estos materiales, tipo de manto rocosos y finalmente las fuentes de aguas subterráneas.

El ciclo hidrológico de lluvias, infiltraciones, evaporaciones, captación de las planta, efectos climáticos, escorrentía, es lo que permite la recuperación o recarga de los acuíferos, cuya velocidad de recarga dependerá de la permeabilidad y ésta a su vez de las características del suelo y rocas.

Los niveles piezométricos en pozos de observación, aguas abajo de la zona del relleno sanitario, fluctúan de acuerdo a las estaciones de lluvia y siguen el curso de la quebrada El Vegote, indicando que existe un pequeño flujo subterráneo, el cual coincide con el eje del valle del curso de la quebrada y que el gradiente hidráulico se adapta a la condición de la pendiente topográfica

La recarga del acuífero ocurre a lo largo del valle, fuera de las inmediaciones del relleno, en la zona de inundación de la quebrada, y la descarga ocurre en una zona muy alejada.

Debido a la constitución de las rocas metamórficas, a su litología y su grado de metamorfismo pertenecientes a la Formación Las Mercedes, por su origen, procesos orogénicos, plegamientos y fracturamientos, presentan una permeabilidad muy baja comprobada según ensayos realizados por Ramírez y D'Escriván (2000).

Según estudios realizados por DENGGO (1985), y en concordancia con perfiles geotécnicos suministrados por Cotécnica La Bonanza, Ramírez y D'Escriván (2000), llegan a la consideración de que a los fines hidrológicos existen dos unidades litológicas:

♦ **Aluviones medianamente densos a densos y en parte suelos residuales.**

Están constituidos por arenas limosas-arcillosas y limos pocos arenosos, con fragmentos alargados de esquistos, los cuales debido a su constitución y a lo irregular de su porosidad, la permeabilidad es baja e intergranular. El agua en estos acuíferos viaja a través de los poros existentes entre los granos del suelo, hasta alcanzar un estrato impermeable donde se deposita, creando una mesa de agua.

♦ **Rocas Metamórficas**

Descompuestas a muy meteorizadas superficialmente, duras y resistentes a mayores profundidades, pueden presentar permeabilidades debido al fracturamiento y disolución, formándose pequeños manantiales, los cuales se pueden observar en los alrededores de la autopista Regional del Centro en el tramo Hoyo De La Puerta-Cortada de Maturín, y en los taludes

de las celdas de desecho en el relleno sanitario La Bonanza, tomándose precauciones en ambos casos a fin de llevarlos por medio de subdrenajes a descargar fuera de la zona.

3.4. PERMEABILIDAD

La propiedad de transmitir el agua a través de los poros, se denomina *Permeabilidad*, y puede definirse como el volumen de agua que escurre a través de un área unitaria de acuífero bajo un gradiente hidráulico unitario, independientemente de las propiedades del fluido. La permeabilidad efectiva o conductividad hidráulica, es función de las características del medio poroso, es decir del tamaño y disposición de los granos y de las características del fluido tales como viscosidad y densidad, lo cual se puede escribir como:

$$K = C d^2 \frac{\gamma}{\mu}$$

C: coeficiente adimensional
d: diámetro de poros
 γ : peso específico
 μ : viscosidad del fluido.

El término $C d^2$ es conocido como permeabilidad intrínseca “k” o como conductividad hidráulica y depende exclusivamente de las características del medio y no de los efectos de viscosidad y densidad del fluido. (Ver tabla N° 1).

Material	Permeabilidad Meinzer	k (cm/s)	Permeabilidad Intrínseca
Arcilla	0,01	0,0004	0,0005
Arena	1.000	41	50
Grava	100.000	4.100	5.000
Grava y Arena	10.000	410	500
Arenisca	100	4,10	5
Limolitas y Lutitas	1	0,0410	0,05
Cuarcita y Granito	0,01	0,0004	0,0005

Tabla 1. Valores Típicos de Permeabilidad en Suelos y Rocas

Adaptada de Linsley, et al. 1975

Las aguas subterráneas, se originan básicamente como aguas superficiales, y la fuente principal son las precipitaciones, las cuales luego de ponerse en contacto con la superficie de la tierra sufre tres procesos:

- ◆ Evaporación
- ◆ Escorrentía
- ◆ Infiltración

El agua se infiltra, descendiendo por gravedad a través de los intersticios en los materiales, pasando a formar parte de la denominada agua subterránea. El volumen de esta agua, depende entre otras cosas de la humedad que posea el suelo y de la topografía del terreno.

El agua infiltrada se deposita en dos áreas bien definidas:

- ◆ **Zona de Aireación:** El agua contenida en esa zona se conoce como agua vadosa.
- ◆ **Zona de Saturación:** Donde se encuentra el agua subterránea propiamente dicha.

El nivel freático o mesa de agua, corresponde al nivel superior en la zona de saturación. Por encima de este nivel existe una zona saturada por ascenso capilar llamada zona capilar. TODD, D.K. (1967).

A los espesores de suelo o roca, que contienen aguas subterráneas y que permiten el movimiento de ésta a través de sus espacios intersticiales, con una permeabilidad de media a alta, se les denomina acuíferos. A los de una permeabilidad muy baja, se les llama acuícludos, y acuitardos a los intermedios.

El movimiento de las aguas subterráneas, está gobernado por principios hidráulicos. Para cualquier valor de la permeabilidad y del gradiente hidráulico, el movimiento de las aguas subterráneas es sumamente lento, por lo cual el régimen que se desarrolla es el laminar, que consiste en el desplazamiento de las partículas de fluido en capas paralelas, sin que ocurra transferencia de masa y de cantidad de movimiento entre ellas.

En 1856, Henry Darcy confirma la aplicabilidad de los principios de la Mecánica de los Fluidos, antes desarrollados por Hagen y Poiseuille, para el flujo en medio poroso, encontrando que para velocidades muy pequeñas, como las que se producen en el medio poroso, el caudal puede expresarse como sigue:

$$Q = A.K.\delta h/\delta l$$

Q: Caudal que circula a través de una sección transversal de un acuífero.

A: Área de la sección transversal del acuífero.

K: Constante de permeabilidad o conductividad hidráulica.

$\delta h/\delta l = i$: Gradiente hidráulico.

3.4.1. Permeabilidad en Suelos

Un suelo se dice que es permeable cuando tiene la propiedad de permitir el paso de agua a través de sus espacios intergranulares. Todos los suelos no tienen la misma permeabilidad, por lo que se dividen en:

♦ **Suelos permeables**

♦ **Suelos impermeables**

Se llaman suelos impermeables aquellos (generalmente arcillosos), en los cuales el factor de escurrimiento es pequeño.

El grado de permeabilidad de un suelo, viene dado por su coeficiente de permeabilidad, basado en la ecuación de Darcy.

$$Q = A \cdot K \cdot \delta h / \delta l$$

$$Q/A = V = K \cdot \delta h / \delta l \quad \rightarrow \quad \delta h / \delta l = i$$

$$V = K \cdot i$$

La velocidad de escurrimiento de un suelo, es proporcional a una cierta constante K, propia y característica de cada suelo, y al gradiente hidráulico **i**, que es la relación entre la diferencia de niveles H y la distancia L que el agua tiene que recorrer.

3.4.2. Permeabilidad en Rocas

La característica fundamental en la permeabilidad de las rocas, es la presencia de discontinuidades, de tal forma que el coeficiente de permeabilidad varía, siendo muy elevado en el macizo rocoso que presenta una masa muy fracturada.

En macizos muy fracturados, se utiliza para medir la permeabilidad, el ensayo de Lugeon, el cual arroja valores altos e independientes con leve aproximación a la dirección.

Consiste este ensayo, en introducir agua bajo presión en una perforación de 100 a 150 mm de diámetro. Se sella mediante un obturador o dos obturadores, inyectando el agua en el macizo rocoso. El ensayo puede ser realizado durante la perforación y a una distancia constante o variable al terminar la perforación.

En el transcurso de la prueba se miden: la presión de inyección y la cantidad de agua a régimen estacionario. Es usual realizar el ensayo para al menos cinco valores de presión de inyección, variable entre 3 y 10 Kg/cm².

El coeficiente de permeabilidad para rocas, calculado por el ensayo de Lugeon, es expresado en unidades convencionales (unidades de Lugeon), y se define como la presión de 10 Kg/cm² a la cual el agua es absorbida a la velocidad de 1 l/min. por m² de superficie de perforación. La unidad Lugeon vale aproximadamente 1×10^{-5} cm/s.

También se utiliza como prueba de permeabilidad en rocas, la de carga constante o variable, las cuales son realizadas en

perforaciones verticales, con un tubo de revestimiento con el extremo inferior de este por debajo de la cota del nivel freático.

El de carga constante, consiste en medir la cantidad de agua Q que hay que agregar por unidad de tiempo en la perforación, de forma que se mantenga el nivel de agua H_c en el tubo.

El coeficiente de permeabilidad constante $K = Q/F.H_c$

El de carga variable, consiste en inyectar una cierta cantidad de agua hasta obtener una altura, y luego se mide el tiempo que tarda el nivel de agua en igualar al nivel freático.

El coeficiente de permeabilidad $K = A/F (t_0 - t_1) \cdot \ln (H_1/H_2)$

3.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Según los resultados de los ensayos de permeabilidad realizados en campo, por Ramírez y D'Escrivan (2000), los cuales abarcan la mayor parte de la zona en estudio, y en algunas partes a través de calicatas de dimensiones de 2x1x1, para la toma de muestras. Se realizaron tomas de muestras adicionales para ensayos de laboratorio.

Por encontrarse el relleno sanitario en un pequeño valle, el nivel freático está cerca del fondo original de las vertientes y de la quebrada

El Vegote, siguiendo el gradiente su misma pendiente topográfica. Cuando se forman lagunas, estas influyen sobre el nivel freático, sin embargo el comportamiento de los suelos es impermeable, evidenciado por la presencia de las mismas.

En cuanto a los materiales obtenidos mediante la geología de campo para ser ensayados en sitio y en laboratorio para conocer su permeabilidad son:

- ◆ Material natural de la base de las celdas.

- ◆ Material arcilloso-limoso o limo arcilloso del fondo de las lagunas sur y norte.

- ◆ Los materiales anteriores mezclados con bentonita.

- ◆ Material proveniente de los alrededores (a 10 Km. del relleno) utilizado en alfarerías de la zona.

- ◆ Material a ser utilizado como cubierta de las capas de desechos (esquistos triturados y desintegrados a suelo).

3.5.1. Ensayos de Laboratorio

Se realizaron ensayos, según las normas y requisitos exigidos por el M.A.R.N.R., a fin de establecer:

- ◆ Las condiciones de permeabilidad, de los suelos naturales rocosos donde se apoyarán las celdas y en especial la celda de desechos específicos.
- ◆ La clasificación de los suelos.
- ◆ Los ensayos de permeabilidad sobre los materiales, que van a ser usados como cubierta del fondo de la celda.

Los materiales extraídos de los fondos de las lagunas sur y norte, cuyos sedimentos según ensayos anteriores realizados por Cotécnica no son tóxicos, ni contaminantes y pueden ser aprovechados, en su forma natural o mezclados con bentonita tienen una permeabilidad aceptable, según los datos de los ensayos efectuados en laboratorio y ensayos de arcillas realizados por las alfarerías a 10 Km. del relleno.

También, están incluidos los resultados de los ensayos realizados a los materiales utilizados como cubierta de los desechos compactados en las celdas, que consisten en un relleno,

con espesor mínimo de 1 m. Dichos materiales están constituidos en su mayoría por esquisto cuarzo micáceo, esquisto grafitoso calcáreo, los cuales fueron triturados y molidos hasta obtener una granulometría muy fina dentro del rango de suelo.

Los ensayos de permeabilidad de campo, se efectuaron por el sistema de carga variable y los de laboratorio, por tratarse de muestras arcillosas, son del tipo especial, hechos por el sistema de carga constante en cámara, similar a los ensayos triaxiales, saturando previamente en su totalidad la muestra, y sometiéndola luego a presiones laterales con cargas entre 2 y 4 Kg/cm², para tener seguridad que exista flujo de agua por la muestra, el cual se recicla con el equipo, para verificar el agua percolada en un tiempo aproximado de 4 a 6 horas con mediciones cada media hora.

3.5.2. Resumen de los ensayos efectuados en campo y laboratorio

1. Apoyo de las celdas, incluida la Celda Específica, en rocas metamórficas meteorizada con permeabilidad según los ensayos de campo, por el sistema de carga variable, que oscila entre $1,24 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ a $7,5 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.89 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ a $9.68 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, considerados aptos para ser

utilizados como base de las celdas incluyendo la celda específica.

2. Barreras de material arcilloso-limoso o limoso-arcilloso, provenientes del fondo de las lagunas sur y norte, en su forma natural, ensayada en laboratorio por el sistema de carga constante con unos valores que varían entre $1.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ a $9.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, inferior al establecido por las Normas M.A.R.N.R., pero que se considera posible de utilizar, tanto por la impermeabilidad de suelo natural rocoso, como, por el efecto que se lograría colocando previamente una lechada de bentonita al 6%, en el fondo y paredes de las celdas y en especial en la celda de desechos específicos.

3. Los mismos tipos de materiales anteriormente ensayados, bajo las mismas condiciones, pero mezclados con 10% de bentonita, cuyos ensayos dieron resultados satisfactorios variando entre $2,0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ y $3,8 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$, considerando aceptable de acuerdo a las normas del M.A.R.N.R.

4. Materiales arcillosos provenientes de las afuera del relleno sanitario, en la zona de explotación de las

alfarerías con resultados satisfactorios y permeabilidad de $9,5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$, pero deben ser triturados previamente, por encontrarse en forma de terrones.

5. Material proveniente de los esquistos excavados, triturados y molidos, transformados en suelo, utilizados como cobertura de las capas de basura, con permeabilidad entre $1,45 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,62 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

6. Los mismos materiales anteriores, ensayados en laboratorio, a la humedad óptima y densidad máxima de desechos, con resultados de permeabilidad entre $8,17 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ para el material grafitoso y entre $1,10 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, para el material cuarzo micáceo rojizo.

En la siguiente tabla aparecen los valores de permeabilidad para los diferentes tipos de rocas y suelos. (Ver tabla N° 2).

	Permeabilidad k(cm/s)	Unidad Lugeon aprox.	Roca Intacta	Roca Fracturada	Suelos
Impermeable	10 ⁻¹⁰	1L	Pizarra		Arcillas
	10 ⁻⁹		Granito		
Poco Permeable	10 ⁻⁸	1L		Rocas con juntas con rellenos arcillosos	Arenas Arcillosas, Limos
	10 ⁻⁷		Caliza y Dolomita		
Algo Permeable	10 ⁻⁶	10L		Roca algo fracturada	Arena Limosa
	10 ⁻⁵		Arenisca		
Permeable	10 ⁻⁴	10L		Roca bastante fracturada	Arena Fina
	10 ⁻³				
Muy Permeable	10 ⁻²	10L		Roca intensamente fracturada	Arenas Limpias
	10 ⁻¹				
Muy Permeable	1	10L		Roca intensamente fracturada	Arenas Gruesas Limpias, Gravas con Arenas Limpias
	10 ¹				
	10 ²				Gravas Limpias

Tabla 2. Permeabilidad de Diferentes Tipos Litológicos

Adaptado de Ramírez (1983)

4. CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO

4.1. TIPOS DE ROCAS QUE LO CONFORMAN

Está conformado por rocas pertenecientes a la Formación Las Mercedes, principalmente por filitas y esquistos grafitosos, calizas y metareniscas las cuales se encuentran intercaladas en los planos de foliación.

Los diferentes tipos de rocas pertenecen, tanto a la unidad de esquistos cuarzos micáceos, como a la unidad de esquistos grafitosos calcáreos.

Las filitas y esquistos grafitosos calcáreos, son principalmente sericíticos-grafitosos, de color gris oscuro presentando alto grado de meteorización. Son abundantes las vetas de calcita, tienen buena esquistosidad y por lo general están plegados. Son las rocas más abundantes de la zona en estudio. (Ver fotografía N° 8).



Fotografía N° 8

**Se observan los esquistos intercalados con vetas de calcita,
por lo general, plegados.**

4.2 TIPOS DE SUELOS

Los mayores efectos de la meteorización y erosión, tuvieron ocasión durante la Orogénesis del Caribe, donde concluyó el levantamiento de la Cordillera de la Costa. Las quebradas y ríos, que hoy existen iniciaron su acción erosiva, exponiendo superficies aledañas a la meteorización.

Las unidades metamórficas, de la Formación Las Mercedes, esquistos-cuarzo-micáceos-sericíticos, presentan más resistencia a la meteorización, y los esquistos-grafitosos-calcáreos, son más susceptibles a la meteorización, produciendo superficies untuosas y blandas.

En el área, además de estos efectos naturales, se encuentra la acción erosiva por parte del hombre, la cual realiza modificando el terreno generando material de suelos y rocas, que posteriormente utiliza como capa o cubierta sobre la basura, como relleno en la conformación de la vialidad de acceso a las celdas.

Los suelos son areno-limosos y arcillosos, con gravas de cuarzo.

- ◆ Suelos Residuales Rojizos: Arcillo limosos, suprayacentes a la unidad de esquistos cuarzo micáceos.

- ◆ Esquistos cuarzo micáceos meteorizados.
- ◆ Esquistos cuarzo micáceos duros poco meteorizados.
- ◆ Esquistos cuarzo grafitosos calcáreos meteorizados.
- ◆ Esquistos cuarzo grafitosos calcáreos duros poco meteorizados.

4.3. ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS PRESENTES

El área de estudio se encuentra en la parte centro-norte de Venezuela, dentro del macizo de La Cordillera de la Costa, al norte del poblado de Charallave, casi en contacto con rocas y suelos de la Cordillera del Interior en los Valles del Tuy, estas rocas, sedimentarias y causales de los fallamientos y corrimientos locales.

Las características litogeológicas, grado de metamorfismo y condiciones del área ubican la zona en estudio, dentro de la Formación Las Mercedes del Grupo Caracas, en contacto con fallas de corrimiento, al sur con rocas de la Formación Paracotos (Tucutunemo o Chuspita).

◆ *Estructuras Mayores*

La zona en estudio se sitúa en el complejo de fallas y corrimientos, principalmente longitudinales las primeras, con rumbos E-O las de corrimiento. N45E, las fallas de tipo normal, que

ponen en contacto rocas de las Formaciones del Grupo Caracas con rocas de la Formación Tucutunemo (anterior Formación Paracotos). El conjunto de esfuerzos generadores de estas estructuras, se considera que actúan en dirección NN0-SSE, y de carácter compresional.

♦ *Estructuras Menores*

Las capas esquistosas muestran plegamientos y volcamientos locales, con abundancia de diaclasas y pequeñas fallas locales, que alteran la geología del conjunto en general. Igualmente los esquistos grafitosos presentan en parte, una foliación muy fina y sistemas de diaclasas, por donde se alojan pequeñas capas o lentes marmóreos y boudines de cuarzo y calcita, paralelos a la foliación.

4.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS SUELOS

1. **Granulometría:** es la determinación de los tamaños de las diversas partículas que componen el suelo permitiendo su clasificación.

Clasificación I.T.M.							
Grava	Arena	Arena	Arena	Limo	Limo	Limo	Arcilla
	Gruesa	Media	Fina	Gruoso	Medio	Fino	
100	2	0,6	0,2	0,006	0,02	0,006	0,002 (mm)

Tabla 3. Clasificación Granulométrica

2. Contenido de humedad:

$$W = \frac{\text{Peso del agua en la muestra}}{\text{Peso de la muestra seca}}$$

Es una característica bastante significativa en los suelos coherentes, porque define el grado de resistencia y de cohesión.

3. Porosidad y Relación de vacíos:

$$\text{(Porosidad)} \quad \eta = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen de la muestra en estado natural}}$$

$$\text{(Relación de vacíos)} \quad e = \frac{\text{Volumen de poros}}{\text{Volumen de la muestra seca}}$$

$$\eta = \frac{e}{1 + e}$$

Son características muy importantes, que inciden directamente en el asentamiento y sobre la permeabilidad del suelo.

4.-Peso específico absoluto y aparente:

$$\text{(Absoluto)} = \frac{\text{Peso de la muestra seca}}{\text{Volumen de la muestra seca}}$$

$$(\text{Aparente}) = \frac{\text{Peso de la muestra en estado natural}}{\text{Volumen de la muestra en estado natural}}$$

5.- Compacidad: es la variación de volumen del suelo (prevalentemente granular), causada por la expulsión del aire de los poros. Se cuantifica por el grado de compacidad que es:

$$D_r = \frac{e_{\text{máx.}} - e}{e_{\text{máx.}} - e_{\text{min.}}}$$

$e_{\text{máx.}}$ = relación de vacíos del suelo en su estado más suelto.

$e_{\text{min.}}$ = relación de vacíos del suelo en su estado más compacto.

e = relación de vacíos del suelo in situ.

6.- Consolidación: es la variación de volumen del suelo, causada por la expulsión del agua de los poros.

7.- Resistencia a la penetración: Es la que presenta un suelo a ser penetrado por un elemento cortante (escarificador, perforadora, varilla de perforación). Aumenta debido a la compactación o al rellenarse los vacíos con partículas mas finas.

8.- Límites de Atterberg: Determinan el estado de consistencia de los suelos de granos finos y son:

- ◆ Límite líquido: es el contenido de agua con el cual el suelo pasa del estado líquido al estado plástico.

- ◆ Límite plástico: es el contenido de agua con el cual el suelo pasa del estado plástico al estado semi-sólido.
- ◆ Límite de retracción o Contracción: es el contenido de agua con el cual el suelo pasa del estado semisólido al estado sólido.

9.- **Ángulo de fricción del suelo:** denominado ángulo de reposo del material.

10.- **Cohesión:** es la resistencia a separarse que tienen los diferentes materiales, originada por fuerzas moleculares entre sus partículas y a las películas de agua. La cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad.

11.- **Permeabilidad:** es la facilidad con que el agua puede fluir a través del suelo. Se cuantifica por el coeficiente de permeabilidad deducido de la Ley de Darcy:

$$K = \frac{Q}{t \cdot A \cdot i}$$

K = coeficiente de permeabilidad del suelo.

Q = cantidad de agua que fluye.

A = área a través de la cual fluye el agua.

t = tiempo empleado.

i = gradiente hidráulico.

5. *DISEÑO DE TALUDES*

5.1. ELEMENTOS DE DISEÑO

Para el diseño de taludes, debe tenerse en cuenta ciertas combinaciones que resultan de las diferentes discontinuidades geológicas que se observaron en campo. Entre estas discontinuidades tenemos fallas, diaclasas, planos de estratificación o cualquier otra superficie que permita el movimiento, la geometría del talud y las condiciones de agua subterránea que presenta.

Existen varios factores en el diseño de taludes:

- ◆ *Geometría del talud*
- ◆ *Factor hidrológico*
- ◆ *Fuerzas externas*
- ◆ *Posibles técnicas de protección*

La Geometría del talud, está altamente relacionada con las operaciones de excavación o con los denominados movimientos de tierra. Estas excavaciones, se pueden llevar a cabo para modificar la pendiente del talud o la conformación de ésta en escalones o terrazas que conduzcan a disminuir el peso de la parte superior.

También suele utilizarse, para eliminar porciones del talud que se encuentran en estado de inestabilidad, o simplemente reducir las componentes activas de las fuerzas de gravedad (deslizamientos).

El factor hidrológico, presente en el terreno en el cual se va a diseñar el talud, actúa siempre en sentido desfavorable a la estabilidad, generando una presión hidrostática que acentúa considerablemente el deslizamiento entre las superficies en contacto (grietas).

Por otra parte, el factor hidrológico repercute negativamente en el cálculo del factor de seguridad del talud, lo que conlleva a realizar un estudio sobre el drenaje superficial y profundo del talud, que llevaría a mejorar sustancialmente las condiciones de estabilidad a largo plazo, evitándose la erosión y el deterioro de la superficie del terreno.

La manera más determinante de estabilizar un talud, es la aplicación de fuerzas externas artificiales que se opongan al deslizamiento activo o en forma pasiva incrementar las potenciales componentes de estabilidad del factor de seguridad.

En el sistema de estabilización activa tenemos como ejemplos: los anclajes y pernos pretensados, aislados o en combinaciones con estructuras de concreto o acero en forma de vigas, columnas, pantallas.

Los contrafuertes, muros de gravedad, micropilotes y anclajes del tipo “Perphos”, son ejemplos clásicos de sistemas de estabilización pasivos, ya que actúan con una reacción mecánica en contra del movimiento de todo o de una porción del talud, pero solamente a consecuencia de una suficiente deformación que debe inducirle el terreno movilizado del talud.

En cuanto a las protecciones, el concreto proyectado es el que se utiliza en mayor cantidad, para conformar paredes ancladas estabilizantes, en capas delgadas de 2,5 a 5 cm de espesor eventualmente combinado con una malla metálica que garantiza una mejor adherencia y continuidad de la superficie del talud, preservándola del impacto y escorrentía de las aguas superficiales, previniendo la meteorización de paredes rocosa y contrastando el aflojamiento superficial entre bloques con el consecuente desprendimiento local de los mismos

También, es importante considerar en el diseño como una medida de protección, la reforestación, la cual siguiendo técnicas específicas que se ajusten al clima y a las características del terreno dan excelentes resultados.

El tipo de reforestación, va desde simples gramíneas hasta arborificación, pasando por los enfajinados, algunas veces

complementados con elementos metálicos para el sostenimiento de la fajina en paredes muy inclinadas.

También, son usados como elementos de protección, los revestimientos lapideos o de materiales como asfaltos y toda la amplia gama de productos geotextiles dentro del contexto de saneamiento ambiental o paisajístico.

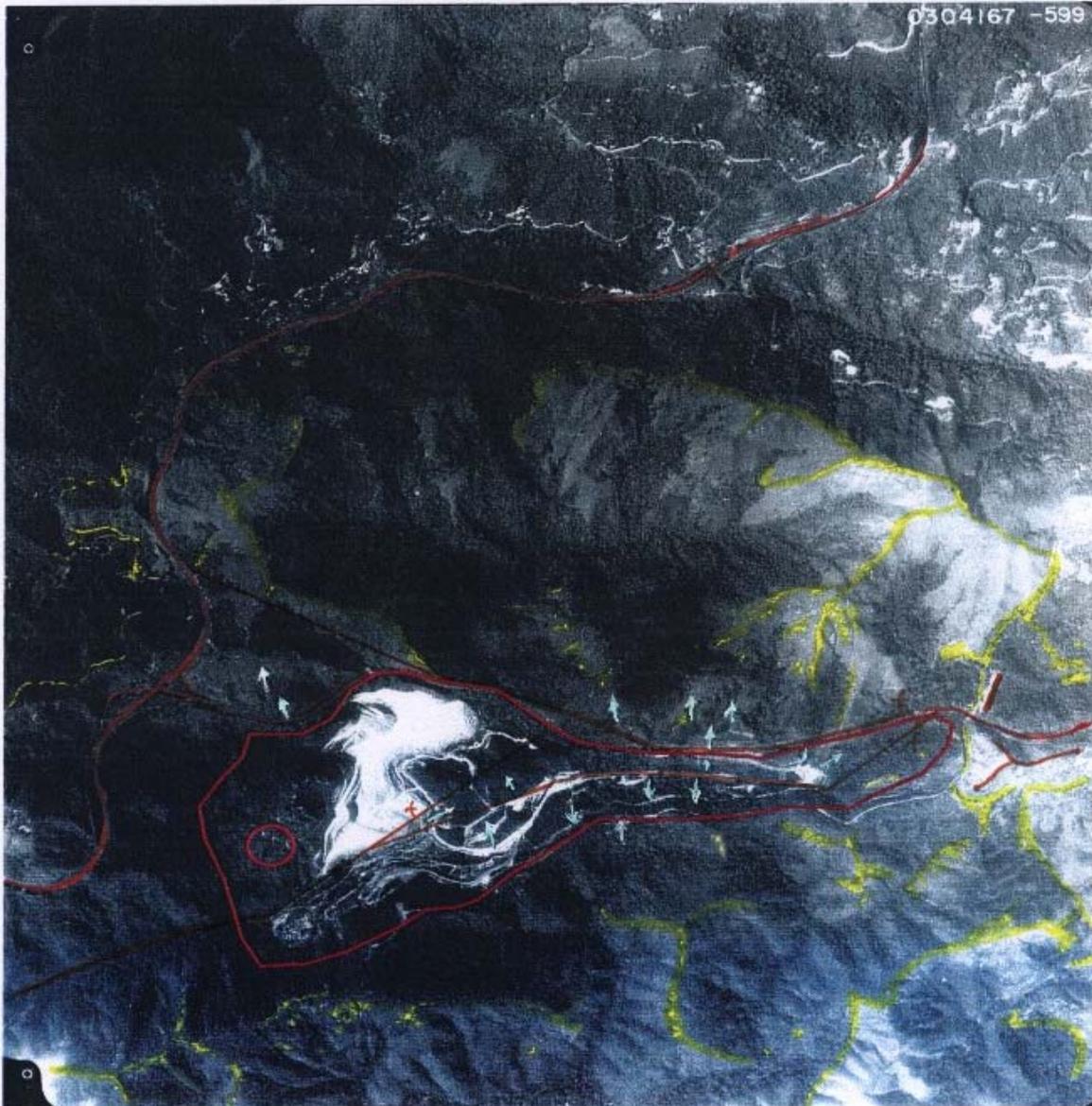
El talud a ser diseñado, se consideró dentro del área del Relleno Sanitario La Bonanza, un lugar ubicado en la denominada zona del “Cerro de los Zamuros”, al centro oeste del relleno, de acuerdo a los diferentes aspectos que influyen en la escogencia del sitio para la Celda Específica Final de Desechos Tóxicos, el cual cumple con los siguientes aspectos geológicos

- ◆ No estar ubicado dentro de zona de fallas regionales.
- ◆ No interceptar cursos de aguas.
- ◆ El área no debe presentar zonas de derrumbe.
- ◆ Asegurarse de no contaminar aguas subterráneas.
- ◆ No estar localizado en áreas altamente sensitivas como pantanos y zonas inundables.

Sin embargo, se encuentran algunas fallas regionales asumidas por fotogeología (ver plano aereofotogramétrico N°2), y corroborados por la presencia de milonitas, pero estas fallas no son fallas activas que

podieran generar algún tipo de perturbación en la zona de la Celda Específica Final, ni existen registros que así lo compruebe.

PLANO AEROFOTOGRAMÉTRICO Nº 2
INTERPRETACIÓN FOTOGEOLÓGICA
ÁREA DEL RELLENO SANITARIO "LA BONANZA"



LEYENDA:

— VÍAS
— FALLAS INFERIDAS

— FILAS
— BUZAMIENTOS

De acuerdo a lo anterior, surgen dos alternativas sobre la ubicación de la Celda Específica:

1. Ubicación de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos en el tope del Cerro de los Zamuros, efectuándose una excavación aproximada de unos 15 m de profundidad, que permita una fosa con capacidad de 80.000m^3 .(Ver alternativa N°1, tabla N°4).

2. Ubicación de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos en la ladera del talud, tipo pie de cerro, conformando el volumen mediante diques de soporte, colocando el fondo de la celda a una cota que permita la descarga del lixiviado mediante subdrenajes. (Ver alternativa N°2, tabla N°5).

5.1.1. Características de las Alternativas Propuestas

ALTERNATIVA N° 1

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Zona aislada	Dificultad de acceso con vehículos pesados
Excavación protegida por los taludes naturales del cerro	No se llevaría a cabo el aprovechamiento del material del cerro en las labores de cubrimiento del relleno, construcción de diques, vialidad y capas impermeables
Taludes con altura máxima de 30 m	Dificultad para la disposición final del posible efluente del subdrenaje y del efluente de los lixiviados
Fondo en esquistos impermeables	Necesidad de ejecutar toda la excavación de una sola vez
Facilidad de cerramiento y control	
Facilidad de control de drenajes superficiales	
No se encuentra ubicada en zona de fallas	
No intercepta cursos de drenaje natural	

Tabla N° 4

ALTERNATIVA N° 2

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Zona de fácil acceso	Taludes muy altos en esquistos y suelos residuales poco cohesivos.
Permite el aprovechamiento casi total del material del cerro a ser utilizado en las labores de cubrimientos de rellenos, construcción de diques, vialidad y capas impermeables.	Taludes en materiales diferentes que obligarán a bermas de protección
La construcción de diques se hará a medida que avance el relleno de la celda.	Detalles constructivos especiales en las esquinas de los diques.
Fondo en esquistos impermeables	
Facilidad de control de drenajes superficiales	
Excavación en laderas para llegar a la cota prevista de fondo, con menores volúmenes de excavación	
Facilidad de construcción de los sistemas de subdrenaje	
Facilidad de construcción del colector de lixiviado	
La celda quedará protegida hacia el oeste por el cerro	
No se encuentra ubicada en zona de fallas	
No intercepta cursos de drenaje natural	

Tabla N° 5

5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

5.2.1. Talud natural de la celda específica

El talud natural existente, previamente cortado para extracción de material de cobertura, está constituido por materiales pertenecientes a la Formación Las Mercedes.

En la parte del talud afloran:

- ◆ Suelos Residuales Rojizos: Arcillo-Limosos, con grava de cuarzo, poco cohesivos a partir de la cota 660.

- ◆ Esquistos Cuarzo Micáceo con vetas de cuarzo, a partir de la cota 640.

Entre la cota 640 y la cota 660, del Cerro Los Zamuros se efectuaron las observaciones de campo y se realizaron las mediciones de las diferentes discontinuidades, tales como foliaciones, diaclasas, buzamientos, rumbos, características litológicas. (Ver fotografía N° 9).



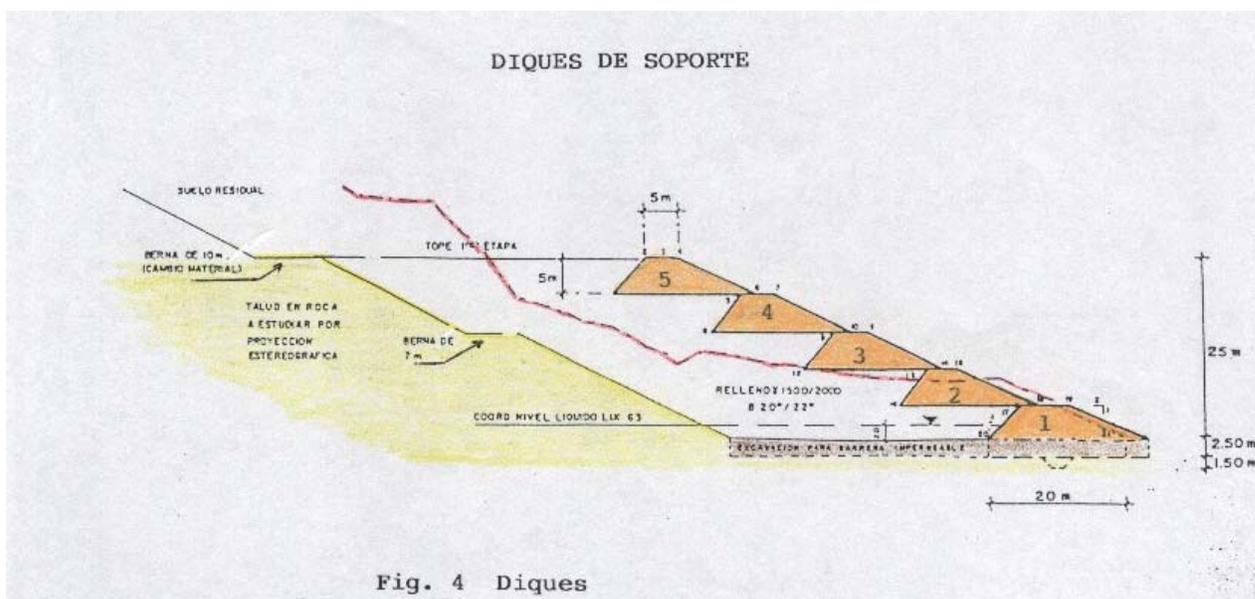
Fotografía N° 9

**Vista parcial del Cerro de Los Zamuros, donde va a estar
enclavada la Celda Específica**

5.2.2. Taludes artificiales o diques

Los diques son taludes de 5 metros de altura, con pendientes de 2:1 en la cara exterior y pendiente 1:1 en la cara interior, conformados por material compactado proveniente de las excavaciones realizadas para la construcción de la Celda Específica.

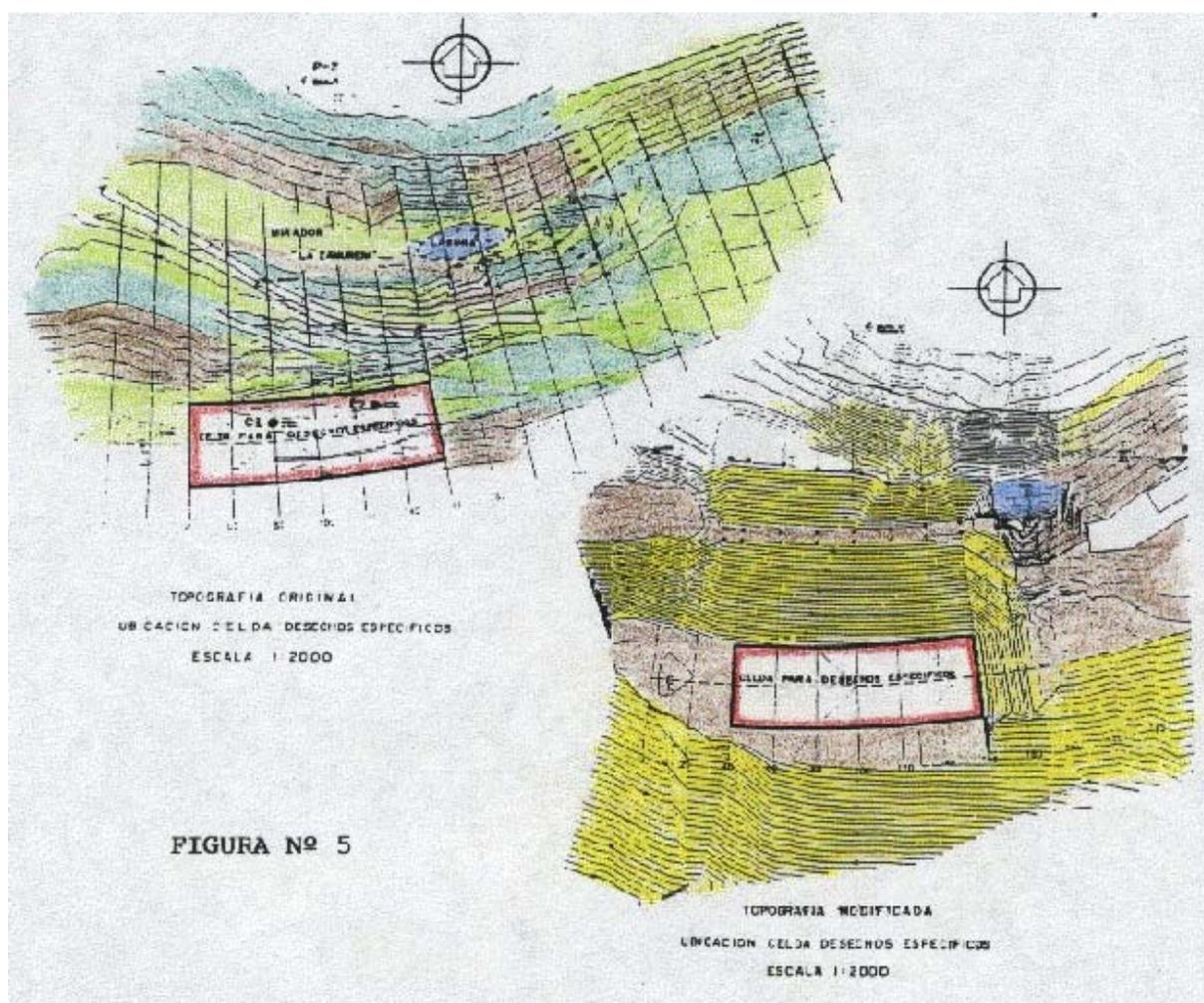
En total son cinco diques que alcanzan una altura de 25 m. El dique N° 1 debe quedar apoyado y empotrado 2 metros en el terreno natural. Los otros diques estarán apoyados una parte sobre el dique anterior y la otra parte sobre la cobertura colocada sobre los desechos especiales. (Ver figura N° 4).



5.2.3. Celda específica final

Teniendo la ubicación, de acuerdo a lo indicado en la Alternativa N° 2, las características principales de la Celda, son las siguientes:

- ♦ Estaría enclavada en la ladera sur oeste del Cerro de los Zamuros, al centro oeste del Relleno Sanitario de la Bonanza (Ver figura N° 5), para una capacidad de almacenamiento promedio de 80.000 m³ para la primera etapa.



- ◆ Con un fondo en forma semirectangular, con curvatura para adaptarla a la topografía del terreno natural, y tener los menores movimientos de tierra.
- ◆ Las dimensiones en su base son de 120 m x 40 m, con cota de fondo 580 a la mitad de la celda, y pendiente hacia el sur del 2%. (Ver apéndice).
- ◆ La Base tendrá pendiente transversal del 2% hacia el centro de la celda y altura de 25 m.

En la zona que ocupará el fondo de la celda, cuyo centro estará en la cota 580 afloran rocas metamórficas muy meteorizadas, friables y deleznales a presión manual, constituidas por materiales de la Formación Las Mercedes, como los son los esquistos cuarzo micáceos sericíticos muy foliados, fracturados y plegados.

En el punto mirador cota 637, se observó el afloramiento de una cuña de la Unidad de Esquistos Grafitosos Calcáreos, igualmente muy meteorizada, friable, con abundantes intrusiones de cuarzo en forma de vetas paralelas a la foliación.

Es posible que en el fondo de la celda aparezcan, junto con los esquistos cuarzo-micáceos y sericítico, vetas de cuarzo y calcita que generen algunas cavernas por disolución, y que de constatarse, se verificará que la permeabilidad de las rocas in situ sea la requerida por las Normas del MARNR, y se procederá a los correctivos que sean necesarios.

◆ **Subdrenajes.**

Debido a la necesidad y seguridad de evitar subpresiones, en el fondo de la Celda Específica, y aunque este se encuentra a una cota de 580 m, con presiones de 25 m de desechos y cubiertas de tierra, se considera necesario, para garantizar, que la base donde se van a depositar los desechos tóxicos específicos, esté seca y no existan subpresiones, se debe establecer un sistema de subdrenajes, en los bordes de la celda, que permita eliminar el posible flujo de aguas subterráneas o de manantiales que pudieran aflorar y efectuar la descarga hacia la parte sur-oeste, que permite por razones de niveles y cotas una facilidad para la descarga de cualquier efluente del sub dren.

♦ **Colectores de Líquidos de Lixiviados.**

Los líquidos de lixiviados, y los que se infiltren a través del relleno de la Celda de desechos tóxicos, se recolectarán en el fondo de la celda por un sistema de tuberías con diámetro interno no menor a 12", perforadas a 30° del eje horizontal del tubo con cuatro perforaciones de diámetro 2", en línea al tresbolillo (como forma práctica, estas líneas podrán estar en la posición del reloj en las horas 2 - 10 en la línea superior y 4-8 en la línea inferior).

Los tubos de subdrenajes, se revestirán con un geotextil muy permeable, por las características de la grava que se dispone para el trabajo. El tubo quedará dentro de una capa de grava, de dos veces el diámetro del tubo, del tipo redondeada o subangular, con coeficiente de uniformidad no menor de 4" y tamaño máximo de partículas de 2".

Estos tubos tendrán, la misma pendiente longitudinal que el fondo de las celdas del 2%, y la celda tendrá inclinación en su sección transversal del 2%, para facilitar la descarga de subdrenes tipo espina de pescado hacia el subdren central. (Ver planos en apéndice).

Se podrán utilizar tubos plásticos especiales de doble pared, ranurados, que hagan la misma función de los tubos perforados e igualmente revestidos del geotextil permeable. Los líquidos lixiviados y los infiltrados, se recolectarán fuera de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos y se llevarán a los estanques especiales para su tratamiento.

En el fondo de la Celda Específica, y a los fines de cumplir con las Normas del MARNR, artículo 103, se recomienda colocar previamente a la capa de arcilla un riego de Bentonita, que tendrá como función el sello de las grietas y fracturas de la roca, par luego colocar una capa el material arcilloso, proveniente de las lagunas norte y sur, con espesor no menor de 1,5 m en seis capas de 25 cm, debidamente compactadas y luego, sobre ella, las capas de geotextiles y membranas, sobre las cuales se colocará la capa de grava con permeabilidad 10^{-3} m/s. Con un espesor de 30 cm.

El tubo recolector de lixiviados, será recubierto en todo su alrededor con grava de dimensiones $\frac{1}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ", en dimensiones de dos veces el diámetro del tubo, 24" (60cm), que facilitará el escurrimiento de los líquidos lixiviados e infiltrados, hacia las tuberías colectoras, o por la misma capa de recubrimiento tipo "***Dren Francés***", que servirá de escurrimiento en caso de obstruirse el tubo colector del lixiviado. (Ver figura N° 6).

◆ Especificaciones Especiales

- 1) El material impermeable a colocar en el fondo de la celda, servirá como nivelación a ser colocado por debajo de la rasante de fondo de la celda, en un espesor no menor de 1,5 m, deberá ser lo más impermeable que se consiga, preferiblemente que todo el material pase el cedazo #4, y con permeabilidad no menor a 10^{-9} m/s.

- 2) El material a ser colocado como filtro en el fondo de la celda, para acelerar el flujo de los líquidos lixiviados a los subdrenes colectores, deberá tener una permeabilidad de 10^{-3} , y preferiblemente de 10^{-2} cm/s, la grava debe ser redondeada a subredondeada, limpia, lavada, no contener caliza, con tamaños entre ¼” y un máximo de 2”, con un espesor mínimo de 30 cm.

- 3) El material a ser colocado como “Dren Francés”, alrededor de los tubos colectores de los líquidos lixiviados debe ser grava limpia, lavada no contener caliza, con coeficiente de uniformidad no menor de 4 y con tamaño mínimo de ¼” y máximo de ½”.

- 4) La pendiente entre el eje longitudinal, y los drenes colectores será de 2%, lo cual se indica tanto en el plano de planta general de ubicación de drenes, como en los planos de secciones transversales típicas.

- 5) El subdrenaje colocado por debajo de la rasante y de la capa impermeable, para aliviar posibles subpresiones será de diámetro 8" con huecos de $\frac{3}{4}$ " separados cada 15 cm en dos líneas y a 30° del eje horizontal del tubo de subdrenaje, tendrá igualmente una pendiente del 2%, y descargará en una tanquilla o pozo hacia el sur-oeste.

- 6) La colocación de geotextiles y geomembranas, sobre la capa de arcilla impermeable, primero una capa de geotextil, luego una membrana y luego nuevamente un geotextil, para continuar con el filtro de grava y sobre este podrá colocarse un geotextil de mayor permeabilidad.

6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN ROCAS

6.1. TOMA DE MUESTRAS Y MANEJO DE DATOS

Se llevaron a cabo los trabajos de campo, siguiendo la metodología de acuerdo al tipo de investigación y al diseño de la misma.

La investigación va dirigida en primera instancia a la recolección y al manejo de datos, mediante los diferentes instrumentos de medición.

Estudio geológico y geotécnico de la superficie, lo cual comprende la separación de las distintas unidades con diferente comportamiento geotécnico.

El tipo de foliación, distribuida a lo largo de la zona de estudio, se encuentra bien desarrollada en las dos unidades geológicas: Esquisto cuarzo micáceo y Esquisto grafitoso calcáreo.

Se empleó un GPS, para hallar la ubicación geográfica del área de estudio, ya que éste determina las coordenadas directamente por vía satelital. Además se utilizaron mapas cartográficos como referencia para la ubicación de la zona.

Se tomaron muestras, tanto de rocas como de suelo para su respectivo análisis.

Se utilizaron instrumentos como; la brújula Brunton en la medición de rumbos y buzamientos. (Ver tabla N° 6).

FOLIACION			DIACLASA		
Punto	Rumbo	Buzamiento	Rumbo	Buzamiento	Frecuencia
1	N80W	25N	N50E	40S	8 x m
			N45W	40S	5 x m
2	N60E	60N	N-S	Vertical	25 x m
3	N40W	10S	N40W	Vertical	15 x m
			N80W	Vertical	15 x m
4	N60W	30S	N15W	80S	30 x m
			N70W	50N	35 x m
5	N60W	10S	N05W	60N	8 x m
			N80W	60S	35 x m
6	N50W	50S	N15E	70S	15 x m
			N85W	40N	10 x m
7	N15W	05N	N80W	50N	15 x m
			N30W	70S	15 x m
8	N30W	10N	N40W	Vertical	20 x m
			N50W	85N	10 x m
9	N30W	40S	E-W	85S	5 x m
10	N60E	10N	N30E	60N	10 x m
			N95W	80N	5 x m
			N60E	75S	6 x m
			N25W	80N	8 x m

Tabla N° 6 Rumbos y Buzamientos de Foliaciones y Diaclasas

Observación de diversas estructuras geológicas, tales como foliaciones, diaclasas, fallas, etc.

Observación de las características físicas de las discontinuidades, en el macizo rocoso tales como frecuencia, desarrollo y profundidad, continuidad, separación, relleno (tipo y espesor).

Se observaron diaclasas lisas, cerradas, limpias, secas, en algunos casos rellenas con material proveniente de la meteorización.

Existen una gran cantidad de pequeñas fallas, en diferentes direcciones, producto posiblemente de la variación de movimientos o fuerzas producto del metamorfismo que se ha generado en el área.

En algunas partes, dentro del área del Relleno Sanitario La Bonanza, se pudo observar un tipo de falla denominada falla plana, la cual se aprecia en la fotografía N° 10. Este tipo de falla es difícil que ocurra, debido a que son solamente ocasionales, por todas las condiciones geométricas que deben cumplirse para que se produzca la falla en un talud.



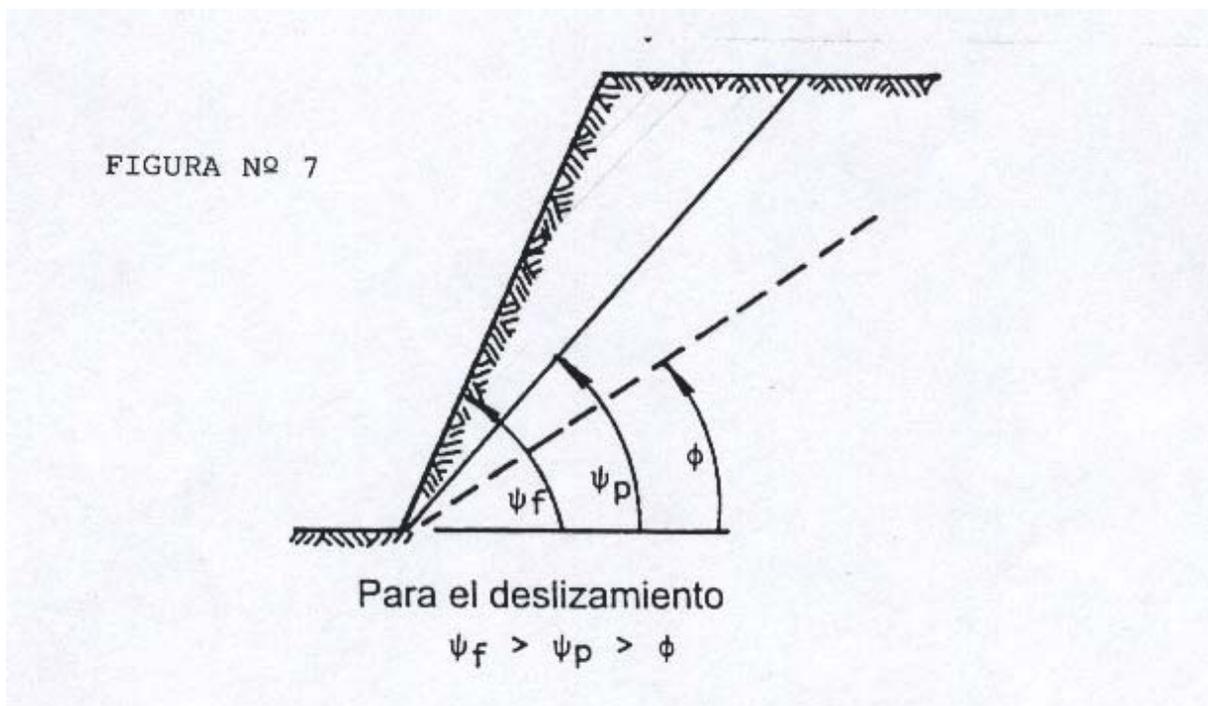
Fotografía N° 10

**Falla Plana observada en el Relleno Sanitario
“La Bonanza”**

6.2. FALLA PLANA

La Falla plana ocurre en un macizo rocoso cuando un bloque de roca que descansa sobre una discontinuidad, se desplaza por gravedad sobre un solo plano.

El plano de esta discontinuidad debe tener una pendiente menor que el talud natural. Para que ocurra el movimiento, es necesario que la inclinación del plano de deslizamiento sea mayor que el ángulo de fricción en ese plano. $\psi_f > \psi_p > \phi$. (Ver figura N° 7).



6.2.1. Condiciones Generales para la Falla Plana

Para que pueda ocurrir el deslizamiento, deben satisfacerse las siguientes condiciones geométricas:

- ◆ El plano de deslizamiento debe tener un rumbo aproximadamente paralelo o casi paralelo ($\pm 20^\circ$) al plano del talud.
- ◆ El plano de falla debe aflorar en la cara del talud, es decir, el buzamiento de la discontinuidad o plano de falla (ψ_p), debe ser menor que la pendiente del talud (ψ_f), por lo tanto $\psi_f > \psi_p$.
- ◆ El buzamiento del plano de falla, debe ser mayor que el ángulo de fricción en ese plano, es decir $\psi_p > \phi$.
- ◆ Las superficies libres, las cuales suministran la resistencia al deslizamiento, deben estar presentes en el macizo rocoso, de forma de definir los límites laterales del deslizamiento.

El análisis en dos dimensiones, considera una rebanada de espesor unitario en ángulos rectos con la cara del talud, por lo tanto el área de la superficie que desliza, se puede representar como la longitud de la superficie visible en una sección vertical a través del talud y el volumen del bloque que desliza, es representado por el área de la figura que representa ese bloque en la sección vertical. (Ver figura N° 8).

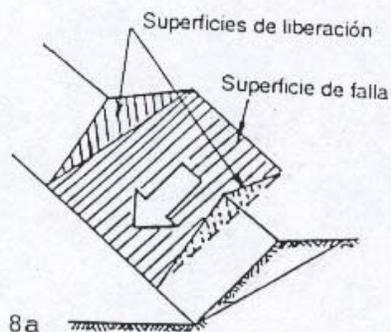
FIGURA N^o 8

Fig. 8a

Las Superficies libres las cuales suministran la resistencia al deslizamiento, deben estar presentes en la masa rocosa de manera de definir los límites laterales del deslizamiento.

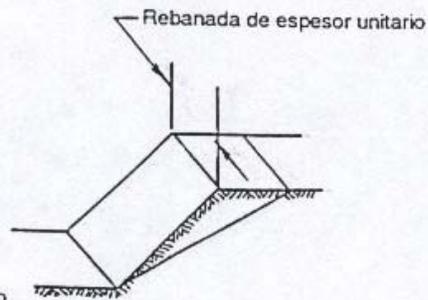


Fig. 8b

En el análisis bidimensional de los problemas de taludes, es usual considerar una rebanada de espesor unitario tomada en ángulos rectos con la cara del talud.

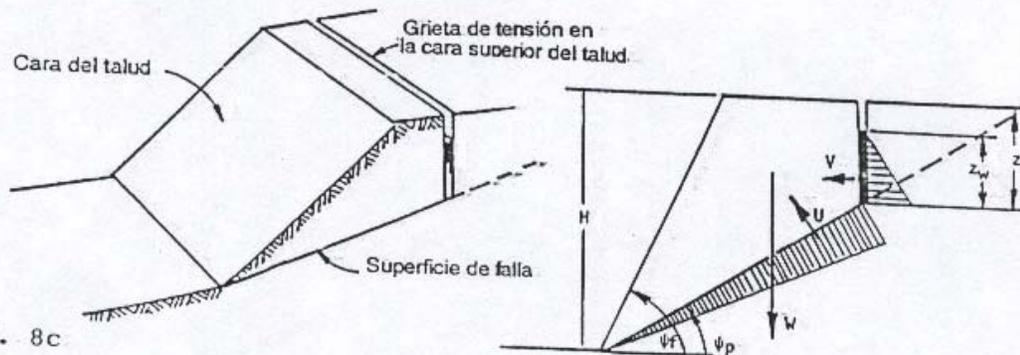


Fig. 8c

Geometría de un talud con grieta de tensión en la parte superior.

6.2.2 Análisis de Fallas Planas

Para este análisis, es importante considerar dos tipos de geometrías, que puede presentar el talud en caso de una falla plana.

1. Geometría de un talud con grieta de tensión en la parte superior de la superficie.
2. Geometría de un talud con grieta de tensión en la cara del talud.

Cuando la grieta de tensión coincide con la cresta del talud, ocurre lo que se denomina una transición de un caso a otro, es decir cuando

$$Z/H = (1 - \cotg \psi_f \cdot \tan \psi_p) \quad (6.1)$$

Para realizar el análisis, se hacen las siguientes suposiciones:

- a) Ambas superficies de deslizamiento y la grieta de tensión poseen un rumbo paralelo al de la superficie del talud.
- b) La grieta de tensión es vertical y esta llena con agua hasta una profundidad Z_w .

c) El agua, entra a la superficie de deslizamiento a lo largo de la base de la grieta de tensión y se filtra en toda la superficie de deslizamiento hasta donde aflora en la cara del talud, escapando a la presión atmosférica.

d) Las fuerzas W , U y V (peso del bloque deslizante, fuerza hacia arriba debida a la presión del agua en la superficie de deslizamiento y fuerza debido a la presión del agua en la grieta de tensión respectivamente), actúan todas a través del centroide de la masa deslizante, es decir, se asume que no hay momentos, los cuales pueden tender a causar rotación del bloque, de modo que la falla sea solamente por deslizamiento.

Debido a que esta suposición no es estructuralmente verdadera para los taludes. Los errores introducidos por despreciar los momentos, son pequeños e insignificantes. Sin embargo, en taludes con la misma inclinación que las discontinuidades, la posibilidad de que pueda ocurrir una por volcamiento debe tenerse en cuenta

e) La resistencia al corte de la superficie de deslizamiento es definida por la cohesión c y el ángulo de fricción ϕ , los cuales están relacionados por la ecuación $\tau = c + \sigma \tan\phi$.

En el caso de una superficie rugosa, que tenga una curva de resistencia la corte no lineal (curvilínea), la cohesión aparente y el ángulo de fricción aparente definido por una tangente a la curva es usado. Esta tangente, debe tocar a la curva en el valor de esfuerzo normal que corresponde al esfuerzo normal actuante en la falla plana. En este caso, el análisis es sólo válido para la altura del talud usada para determinar el nivel de esfuerzo normal.

f) Una rebanada de espesor unitario es considerada y se asume que las superficies laterales de liberación están presentes y que esta no ofrecen resistencia al deslizamiento en los límites laterales de la falla.

El factor de seguridad, que relaciona las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento con respecto a las fuerzas que tratan de resistirlo:

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (6.2)$$

De la figura c del gráfico N° 5, tenemos:

$$A = (H-Z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (6.3)$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot Z_w (H-Z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (6.4)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot Z_w^2 \quad (6.5)$$

Para la grieta de tensión en la parte superior de la superficie del talud:

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \{ [1 - (Z/H)^2] \cotg \psi_p - \cotg \psi_f \} \quad (6.6)$$

Para la grieta de tensión en la cara del talud:

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \{ [1 - (Z/H)^2] \cotg \psi_p (\cotg \psi_p \cdot \tg \psi_f - 1) \} \quad (6.7)$$

Cuando se conoce la geometría del talud y la profundidad del agua en la grieta, el factor de seguridad es simple. Sin embargo en algunos casos es necesario la comparación de un rango de geometrías de taludes, profundidades del agua y la influencia de diferentes resistencia al corte.

En estos casos, la resolución de la ecuación del factor de seguridad y peso del bloque cuando la grieta de tensión se encuentra en la cara del talud, resultan tediosas. Para simplificar los cálculos, la ecuación del factor de seguridad se puede reescribir en forma adimensional de la manera siguiente:

$$FS = \frac{(2C/\gamma H) \cdot P + \{ Q \cdot \cotg \psi_p - R (P+S) \} \tg \emptyset}{Q + R \cdot S \cotg \psi_p} \quad (6.8)$$

$$\text{Siendo: } P = (1 - Z/H) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (6.9)$$

Para la grieta de tensión en la parte superior de la superficie del talud:

$$Q = \{ [1 - Z/H^2] \cotg \psi_p - \cotg \psi_f \} \text{sen } \psi_p \quad (6.10)$$

Para la grieta de tensión en la cara del talud:

$$Q = \{ [1 - (Z/H)^2 \cdot \cos \psi_p] (\cotg \psi_p - \text{tg } \psi_f - 1) \} \quad (6.11)$$

$$R = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{Z_w}{Z} \cdot \frac{Z}{H} \quad (6.12)$$

$$S = \frac{Z_w}{Z} \cdot \frac{Z}{H} \text{sen } \psi_p \quad (6.13)$$

Las relaciones P, Q, R y S, son todas adimensionales, lo cual significa que ellas dependen de la geometría, pero no del tamaño del talud. El importante principio de agrupamiento adimensional, ilustrado en estas ecuaciones, es una herramienta útil en la mecánica de rocas y el uso extensivo de este principio puede ser hecho al estudio de fallas en cuña y circulares.

♦ **Influencia del agua subterránea en la estabilidad**

Anteriormente, se asumió que sólo el agua presente en la grieta de tensión y a lo largo de la superficie de falla, influyen en la estabilidad del talud, lo cual equivale a suponer que el resto de la masa rocosa es impermeable, esto no siempre se justifica. Se debe por lo tanto considerar otra distribución de presión de agua sobre el cual el análisis tenga basamento.

Actualmente, la ingeniería de rocas no cuenta con una definición precisa de la distribución del agua subterránea en la masa rocosa. La única posibilidad abierta para los diseños de taludes es considerar un número de extremos realísticos en un intento de cerrar el rango de posibles factores de seguridad y asegurar la sensibilidad del talud a las variaciones de condiciones de agua subterránea.

♦ **Estabilidad en Taludes Secos**

Un talud completamente drenado, puede ser considerado el caso más simple. En términos prácticos, significa que no existe ninguna presión de agua en la grieta de tensión, o a lo largo de la superficie de deslizamiento, ahora el talud puede estar húmedo, pero no genera presión alguna, lo cual no influirá en la estabilidad del talud.

Bajo estas condiciones, las fuerzas $U=0$ y $V=0$, la ecuación se reduce a:

$$F = \frac{c \cdot A}{W \cdot \text{sen } \psi_p} + \text{cotg } \psi_p \cdot \text{tg } \emptyset \quad (6.14)$$

Alternativamente la ecuación (5.8) se reduce a

$$F = \frac{2c}{\gamma H} \frac{P}{Q} + \text{cotg } \psi_p \cdot \text{tg } \emptyset \quad (6.15)$$

◆ Agua en la grieta de tensión únicamente

Luego de una gran escorrentía producto de una copiosa lluvia, puede generar un alto incremento en la presión de agua en la grieta de tensión, la cual ofrecerá poca resistencia al flujo de agua en la superficie a menos que una superficie efectiva de drenaje sea inmediatamente realizada. Asumiendo que el resto de la masa rocosa es relativamente impermeable, sólo la presión de agua generada durante e inmediatamente después de la lluvia, será debido a la presión de agua en la grieta de tensión. En otras palabra la fuerza de empuje $U=0$.

La fuerza de empuje U , puede también ser reducida a cero o cerca de cero si la superficie de falla es impermeable, como resultado de rellenarse de arcilla. En este caso, el factor de seguridad del talud es dado por:

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - V \sin \psi_p) \tan \emptyset}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (5.16)$$

o, alternativamente:

$$FS = \frac{(2C/\gamma H).P + (Q. \cotg \psi_p - RS)\} \operatorname{tg} \emptyset}{Q + R.S \cotg \psi_p} \quad (5.8)$$

♦ Agua en la grieta de tensión y en la superficie de deslizamiento.

La distribución de presión a lo largo de la superficie de deslizamiento, se ha asumido que disminuye linealmente de la base de la cara del talud. Esta distribución de la presión de agua es probablemente mucho más simple que la que ocurre en un talud real, pero ya que, la distribución de la presión real es desconocida, esta distribución asumida es razonable como cualquier otra que pueda ser hecha.

Posiblemente resulta mucho más peligrosa, una distribución que exista en la cara de un talud que se congelara en el invierno, en lugar de la condición de presión cero, la cual ha sido asumida en la cara del talud, tendría que considerarse a la altura completa. Sin embargo, para el diseño general, esta presión de agua resulta en un talud excesivamente conservativo.

◆ **Taludes saturados con una recarga alta**

Cuando el macizo rocoso, está muy fracturado, su comportamiento es relativamente permeable, resulta un patrón de flujo de agua subterránea muy similar al que se produce en un sistema poroso. La mayoría de las condiciones peligrosas, que se pueden presentar en este caso, son las que se llegarían a producir luego de una prolongada lluvia.

La red de flujo, para taludes saturados con una superficie de recarga muy alta ha sido construida y la distribución de presiones de agua, obtenidas de estas redes de flujo han sido empleadas, para calcular los factores de seguridad de una gran variedad de taludes.

El proceso involucrado es también tedioso, pero los resultados pueden ser el factor de seguridad, para un talud permeable, saturado por una gran lluvia y sometido a una recarga

continua, puede ser aproximado por la ecuaciones 5.2 y 5.8 asumiendo que la grieta de tensión esta llena de agua, es decir que $Z_w = Z$.

◆ La grieta de tensión como indicador de inestabilidad

Frecuentemente, se han encontrado grietas de tensión en la superficie superior de los taludes excavados en roca, que no han fallado. Algunas de estas grietas han estado visibles y expuestas a la intemperie por muchos años y no parecen tener ninguna influencia adversa sobre la estabilidad del talud. Es importante, considerar como se forman estas grietas y si ellas pueden dar alguna información sobre la inestabilidad del talud.

En una serie de estudios, realizados en modelos muy desarrollados, Barton encontró, que la grieta de tensión fué generada como resultado de pequeños movimientos de corte dentro de la masa rocosa.

A través de estos movimientos individuales, los cuales son muy pequeños pero con efectos acumulativos, producen un desplazamiento significativo de las superficies de los taludes, suficiente para causar la separación de diaclasas verticales detrás de la cresta del talud y formar grietas de tensión. El hecho que la

grieta de tensión es causada por movimientos de corte en el talud, es importante debido a que esto sugiere que, cuando una grieta de tensión se hace visible en la superficie del talud, puede asumirse que la falla por corte se ha iniciado dentro de la masa rocosa.

La presencia de una grieta de tensión, debe ser tomada como un indicador de inestabilidad potencial y que, en el caso de un talud importante, ésta será la señal, de que es necesario una investigación detallada de la estabilidad de este talud en particular.

◆ Refuerzo de un talud

Cuando se ha detectado, que un talud en particular es inestable, resulta necesario, si es posible, estabilizarlo por drenaje o por la aplicación de cargas externas.

La forma mas contundente y directa, para estabilizar un talud es la de recurrir a la aplicación de fuerzas externas artificiales que se opongan al deslizamiento activo, o pasivamente, incrementando las reales o potenciales componentes estabilizantes del factor de seguridad.

El factor de seguridad de un talud con una carga externa de magnitud T , inclinada un ángulo \emptyset , con respecto al plano de falla,

es aproximado por la ecuación:

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p + T \cos \emptyset) \tan \emptyset}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p - T \sin \emptyset} \quad (6.2)$$

Esta ecuación satisface para la condición de equilibrio límite (FS = 1).

6.3. PROYECCIONES HEMISFÉRICAS

Uno de los aspectos, más importantes del análisis de estabilidad de taludes, es el levantamiento sistemático y la representación de datos geológicos, de manera tal que puedan ser evaluados fácilmente e incorporarlos al análisis de estabilidad de taludes o de la masa rocosa circundante.

El análisis de la estabilidad, de un bloque de roca que descansa sobre una discontinuidad, o de una cuña definida según dos planos de estabilidad, depende de la existencia de condiciones potencialmente inestables.

La representación de los datos geológicos, se realizó por medio de proyecciones hemisféricas, ya que éste método de representación nos da la ventaja de tener relaciones tridimensionales de los planos directamente.

El análisis cinemático de taludes, consiste en el estudio del movimiento o del deslizamiento de una masa rocosa sin tomar en cuenta las fuerzas que causan que dicha masa se mueva. Este análisis combinado con las proyecciones hemisféricas, resulta de gran utilidad en la evaluación de estabilidad de macizos rocosos.

Entre los tipos de proyecciones hemisféricas que se utilizaron, tenemos la de igual área, llamada proyección de Lambert o la red de Schmidt para realizar los diagramas de contorno de polos.

El método de representación, de los datos geológicos estructurales consistió, en la representación de las trazas de los planos en la superficie de una esfera de referencia, la cual es empleada para definir los rumbos y buzamientos o los azimuths e inclinaciones de los planos. En las figuras N°9, 10, 11, 12, 13,14 y 15, se observa el procedimiento utilizado para el diseño y estabilidad del talud en rocas.

La recolección mínima adecuada, de los datos geológicos ayuda a definir las características geométricas del macizo rocoso, y esto a seleccionar el modelo de falla. Ésta es una de las decisiones, más importantes en el proceso de investigación de estabilización de taludes, ya que una decisión incorrecta del mecanismo de falla invalida el análisis.

En los macizos rocosos duros, en los cuales dos o tres grupos de discontinuidades se desarrollan, usualmente fallan por el deslizamiento de uno o de dos planos. Una sola discontinuidad tal como una falla puede jugar un papel dominante en la estabilidad de un talud y es importante que tales características no se pierdan en el conteo de los polos.

En los macizos rocosos blandos, los cuales si están en capas horizontales con fracturas verticales, o un macizo rocoso en el cual las orientaciones de las discontinuidades aparezcan aleatorias, la falla será circular, similar a la que ocurre en los suelos.

Diagrama de Densidad de Polos de Foliación

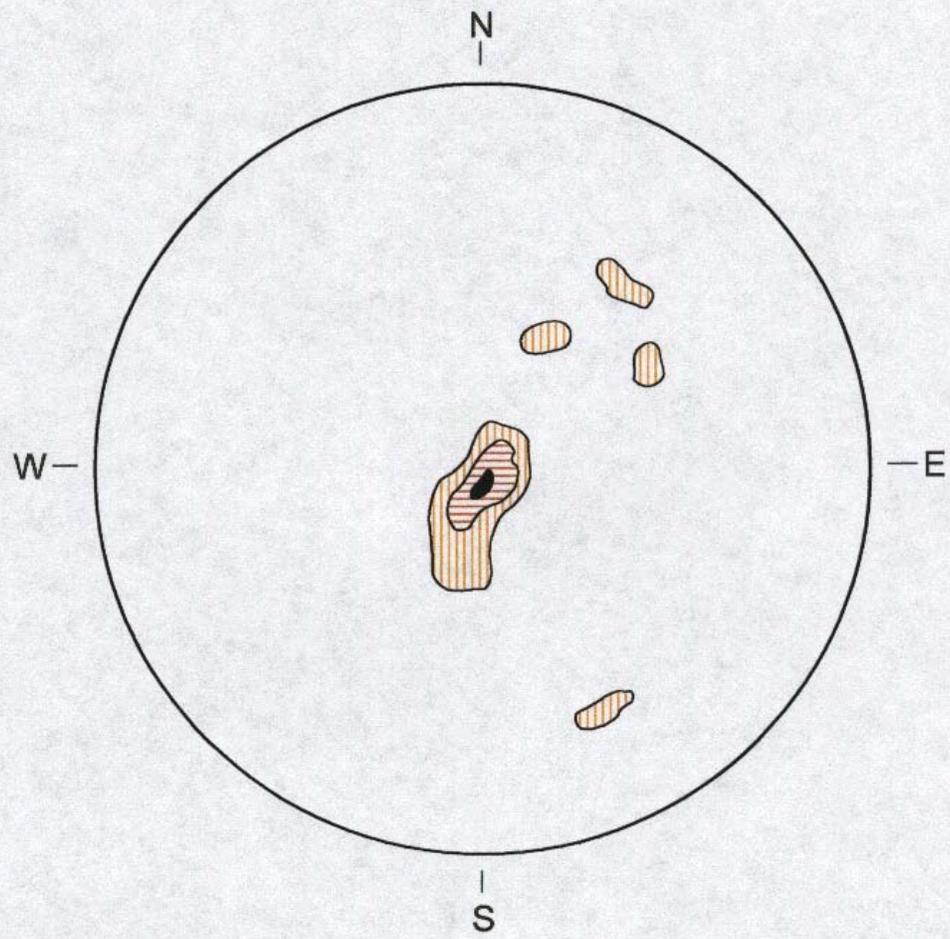


FIGURA Nº 9

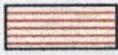
-  1 Polo= 10%
-  4 Polos= 40%
-  7 Polos= 70%

Diagrama de Densidad de Polos de Diaclasas

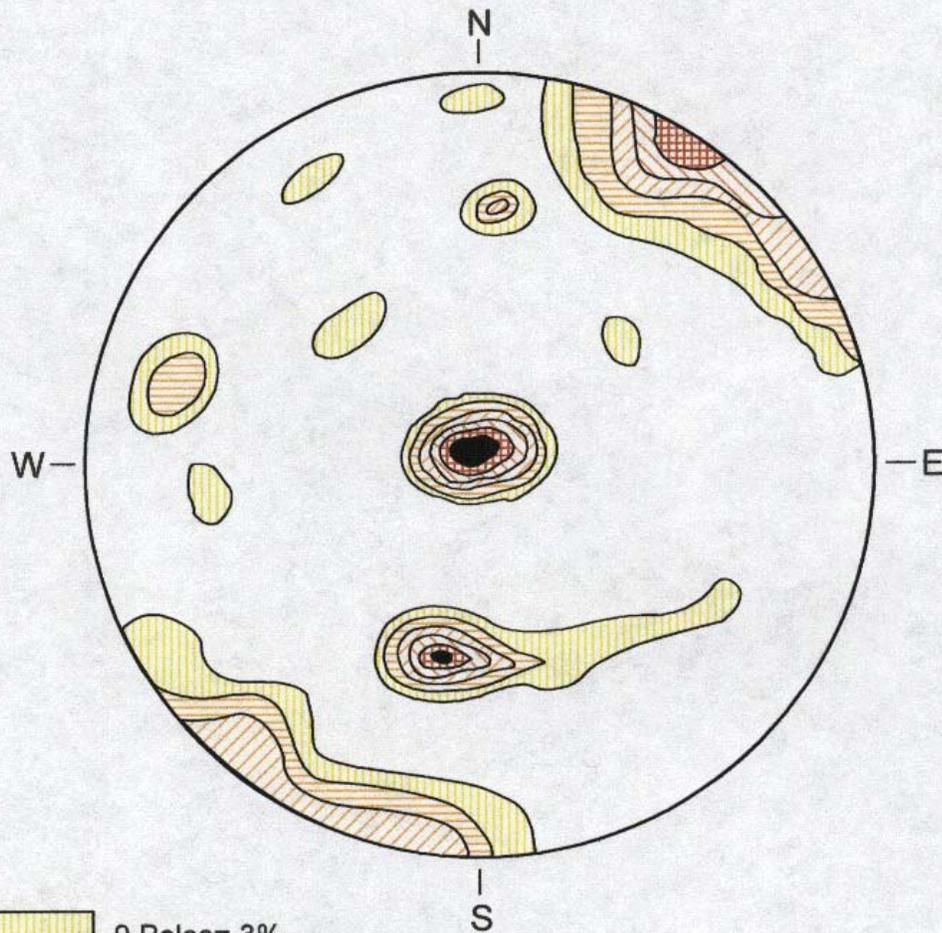


FIGURA Nº 10

	9 Polos= 3%
	15 Polos= 5%
	23 Polos= 8%
	35 Polos= 12%
	55 Polos= 19%
	75 Polos= 26%

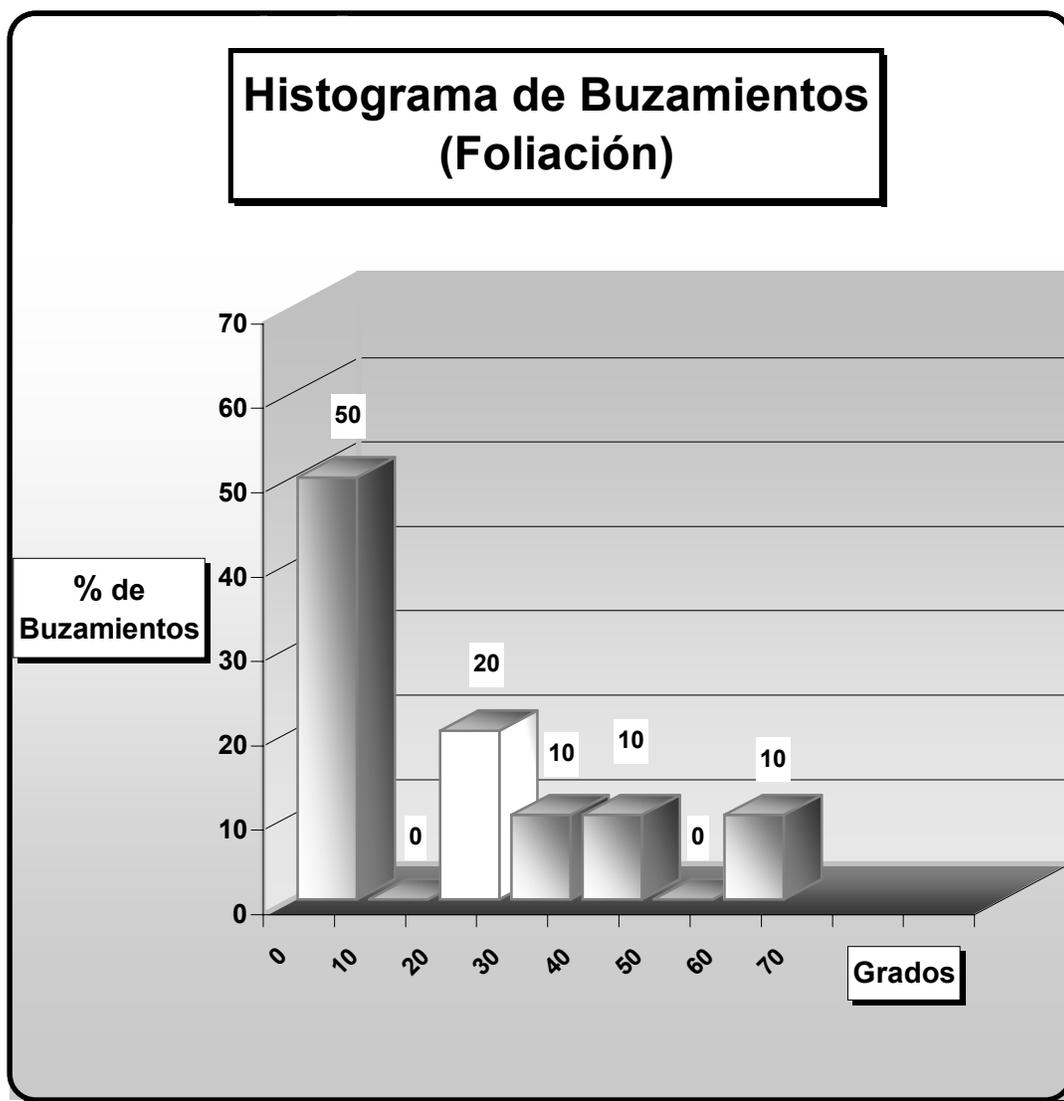


Figura N° 11

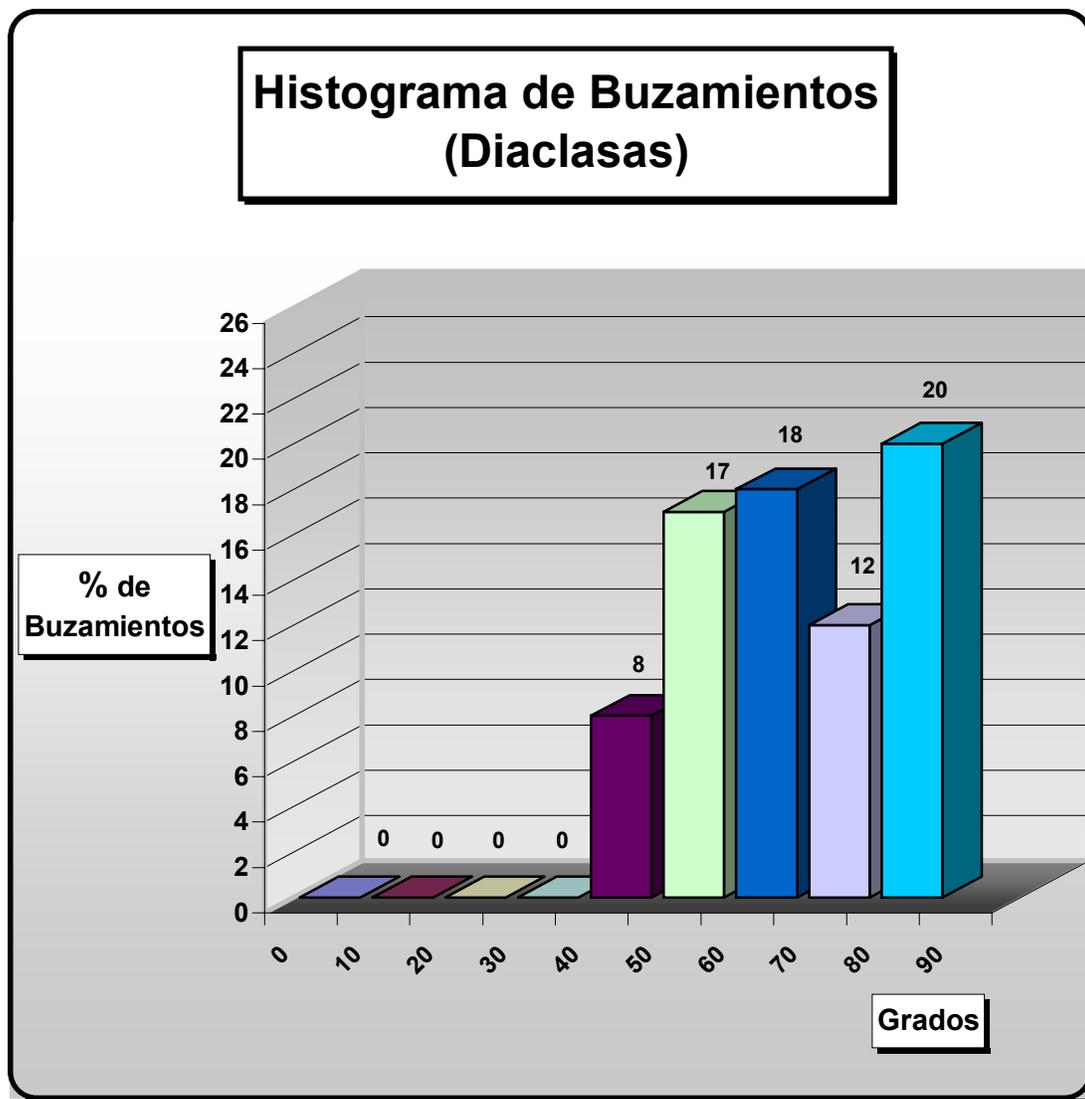


Figura N° 12

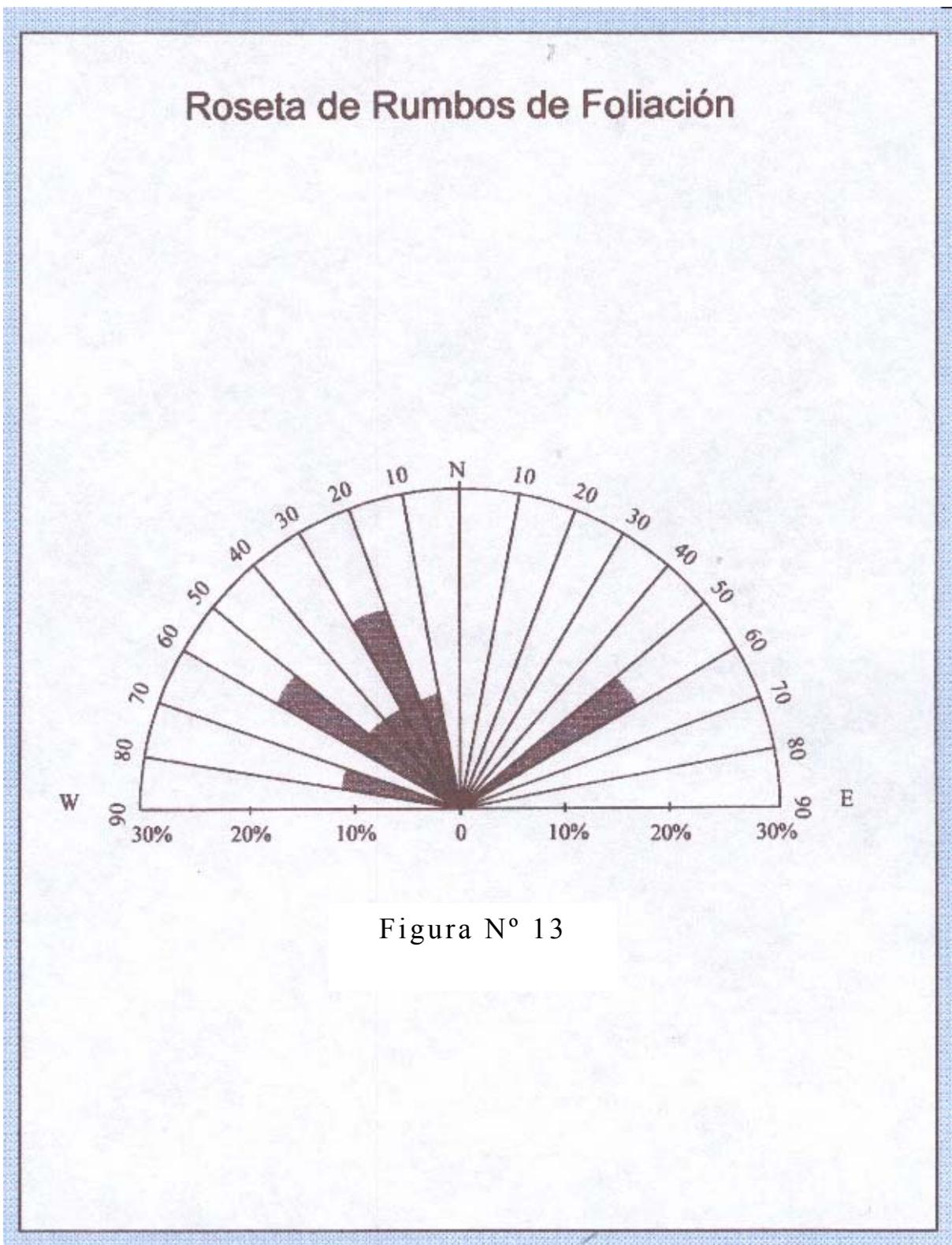


Figura N° 13

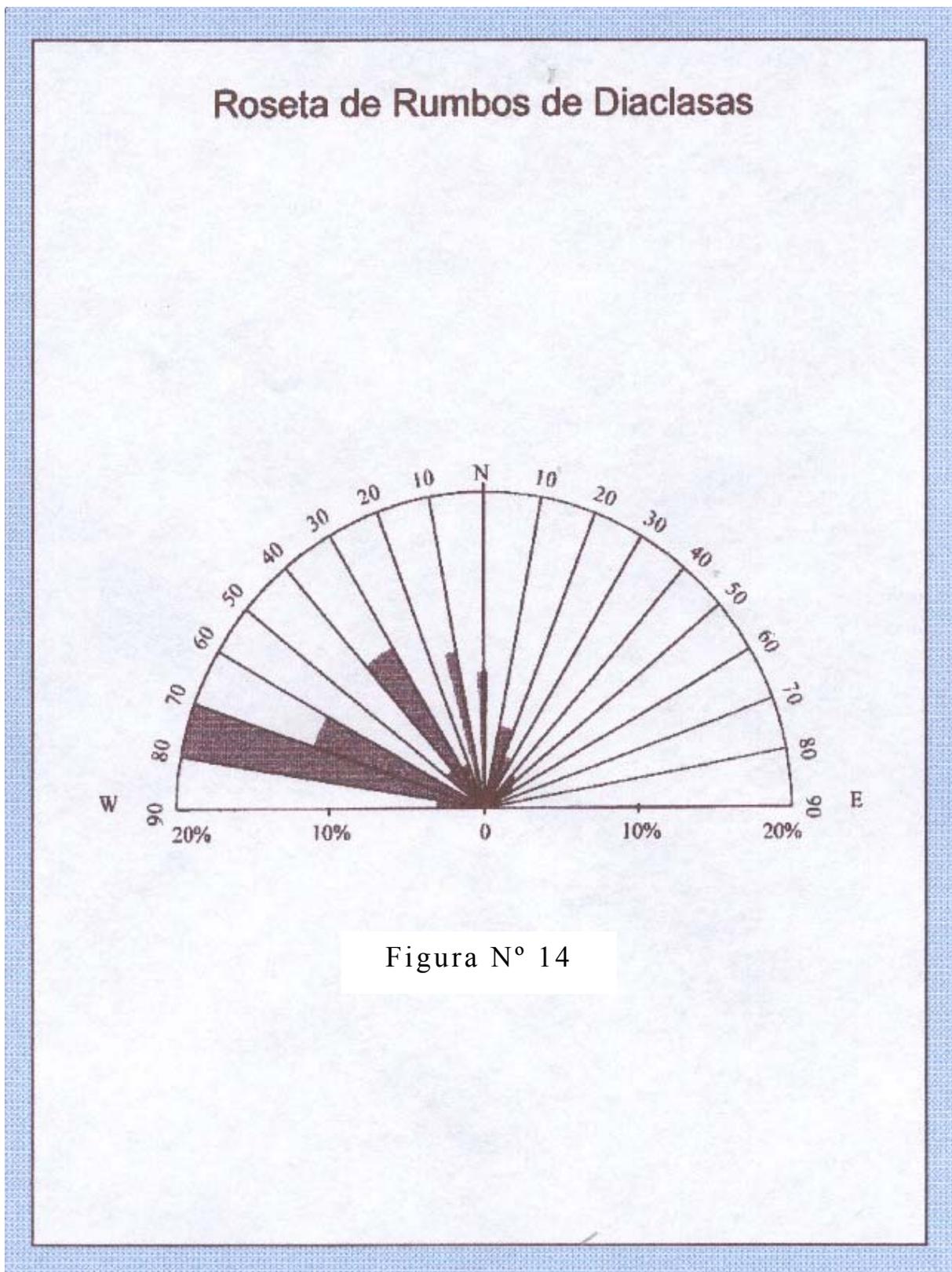


Figura N° 14

Proyección Hemisférica

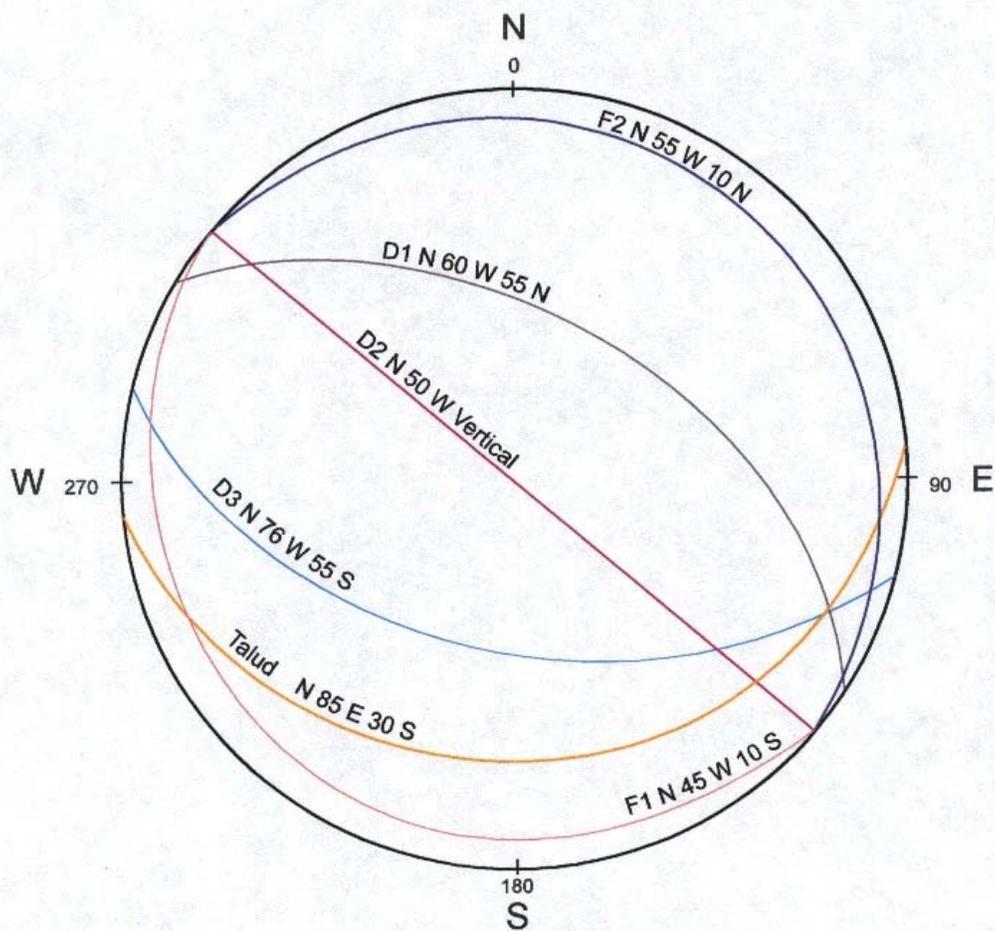


FIGURA Nº 15

6.4. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL TALUD

Se entiende por cinemática, el estudio del movimiento de cuerpos, sin tomar en cuenta las fuerzas que causan el movimiento de dicho cuerpo.

En Geotecnia, el análisis cinemático de taludes, consiste en el estudio del deslizamiento de masa rocosa, sin tener en cuenta que dicha masa se desplaza.

El análisis del **talud natural en roca** de la Celda Específica, para Desechos Tóxicos, se hizo por **Proyecciones Hemisféricas**, (Ver figura N° 16) en las cuales se muestran las características de la roca y las características del talud, resultando cinemáticamente estable de acuerdo a la siguiente evaluación:

- ◆ Con las combinaciones de las discontinuidades D_1 , D_2 , F_2 , el talud T, es cinemáticamente estable, debido a que D_2 es vertical y D_1 y F_2 tienen buzamiento opuesto al del talud.
- ◆ El ángulo con que aflora la foliación F_1 en la cara del talud, es demasiado bajo para que se genere movimiento.
- ◆ La combinación T con D_3 , resulta también cinemáticamente estable, ya que el ángulo es superior al del talud.

Talud Natural en Rocas

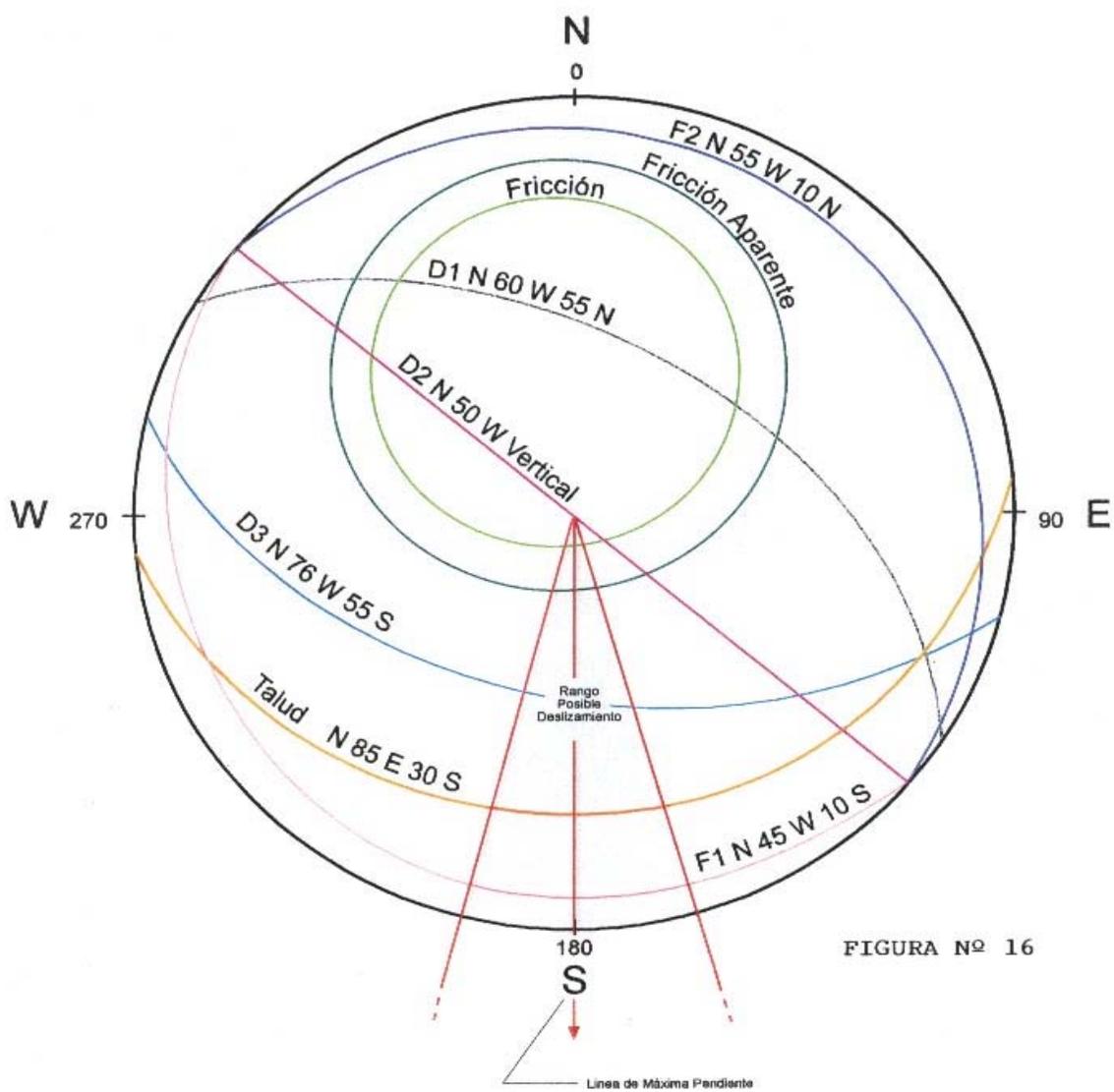


FIGURA Nº 16

6.4.1. Concepto de Cono de Fricción

Constituye una valiosa herramienta para el análisis de la estabilidad de taludes en macizos rocosos.

Se considera un bloque de peso W que descansa sobre un plano con pendiente ψ_p .

La fuerza S está representada por $S = W \sin \psi_p$.

y la fuerza normal N por $N = W \cos \psi_p$.

Si la resistencia al corte de la superficie entre el bloque y el plano es debida solamente a la fricción ($\emptyset \neq 0$, $C=0$), la fuerza R_f que tiende a resistir el deslizamiento viene dada por:

$$R_f = N \tan \emptyset = W \cos \psi_p \cdot \tan \emptyset, \quad \emptyset: \text{ángulo de fricción.}$$

Para que ocurra el deslizamiento del bloque se requiere que $S > R_f$, es decir,

$$W \sin \psi_p > W \cos \psi_p \cdot \tan \emptyset$$

Esta inecuación se puede simplificar resultando

$$\psi_p > \emptyset,$$

siendo esta última la condición de deslizamiento.

Si se asume, que la resistencia a la fricción en la superficie es igual en todas las direcciones, se puede trazar un cono de fricción, alrededor de la fuerza normal N .

Este cono tiene un círculo de base, cuyo radio es R_f , y una altura vertical N , y un ángulo semiapical \emptyset .

La condición para el deslizamiento ($\psi_p > \emptyset$) es que el vector W caiga fuera del cono de fricción.

◆ Análisis del talud en rocas por cono de fricción.

Se evaluó el Talud Natural en roca de la Celda Específica para Desechos Tóxicos, resultando estable, no hay deslizamiento, ya que el vector W cae dentro del cono de fricción. (Ver Figura 17.a).

CONO DE FRICCIÓN

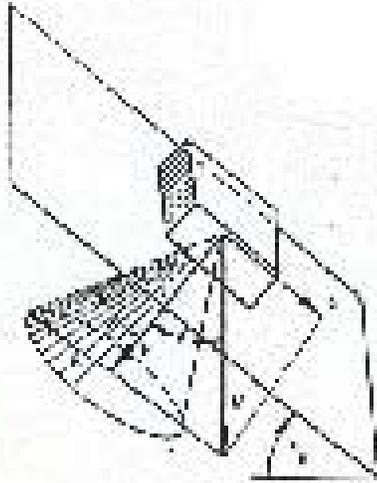


Fig.17a

Bloque deslizante sobre un cono, debido a su propio peso. El deslizamiento del bloque ocurre cuando el ángulo de inclinación del cono es mayor que el ángulo de fricción del cono de fricción.

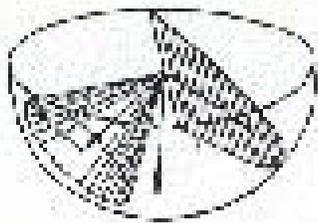


Fig.17b

Representación gráfica del concepto del cono de fricción en un sistema de coordenadas.

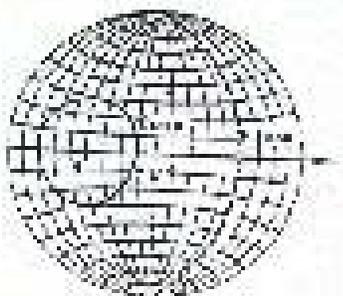


Fig.17c

Representación del cono de fricción en la red cartográfica.

6.4.2. Prueba de Markland

Una de las pruebas cinemáticas más conocidas, es la prueba de Markland. Se trata de establecer la posibilidad de fallas de borde según la línea de intersección de dos discontinuidades.

Markland, sugiere asumir un ángulo de fricción (entre 20° y 30° , dependiendo del tipo de material), para evaluar si la recta de intersección excede el ángulo de fricción \emptyset .

En la Proyección Hemisférica esto se realiza construyendo un círculo de fricción con centro igual al centro de la proyección, inclinado a un ángulo \emptyset respecto a la horizontal ó $90^\circ - \emptyset$ respecto a la vertical. Este círculo contendrá todas las líneas más abruptas que el ángulo de fricción \emptyset .

◆ Análisis del talud en rocas según la Prueba de Markland

En la Proyección Hemisférica se representa el círculo de fricción, con centro igual al de la proyección, para un ángulo de 25° . (Ver figura N° 18).

Se puede observar que ningún punto de intersección de las posibles combinaciones de las diferentes discontinuidades, cae dentro del área formada por el círculo mayor correspondiente al plano del talud y el círculo de fricción. Por lo tanto podemos decir que el talud es cinemáticamente estable.

Prueba de Markland

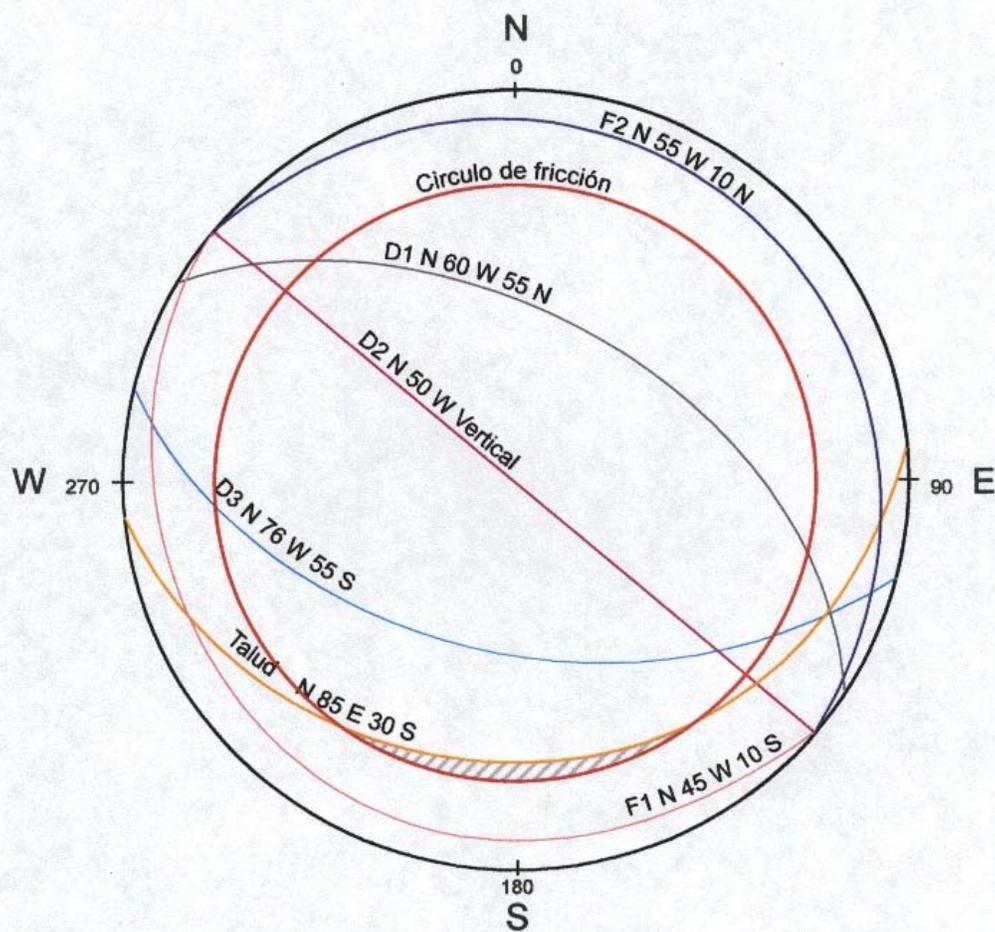


FIGURA Nº 18

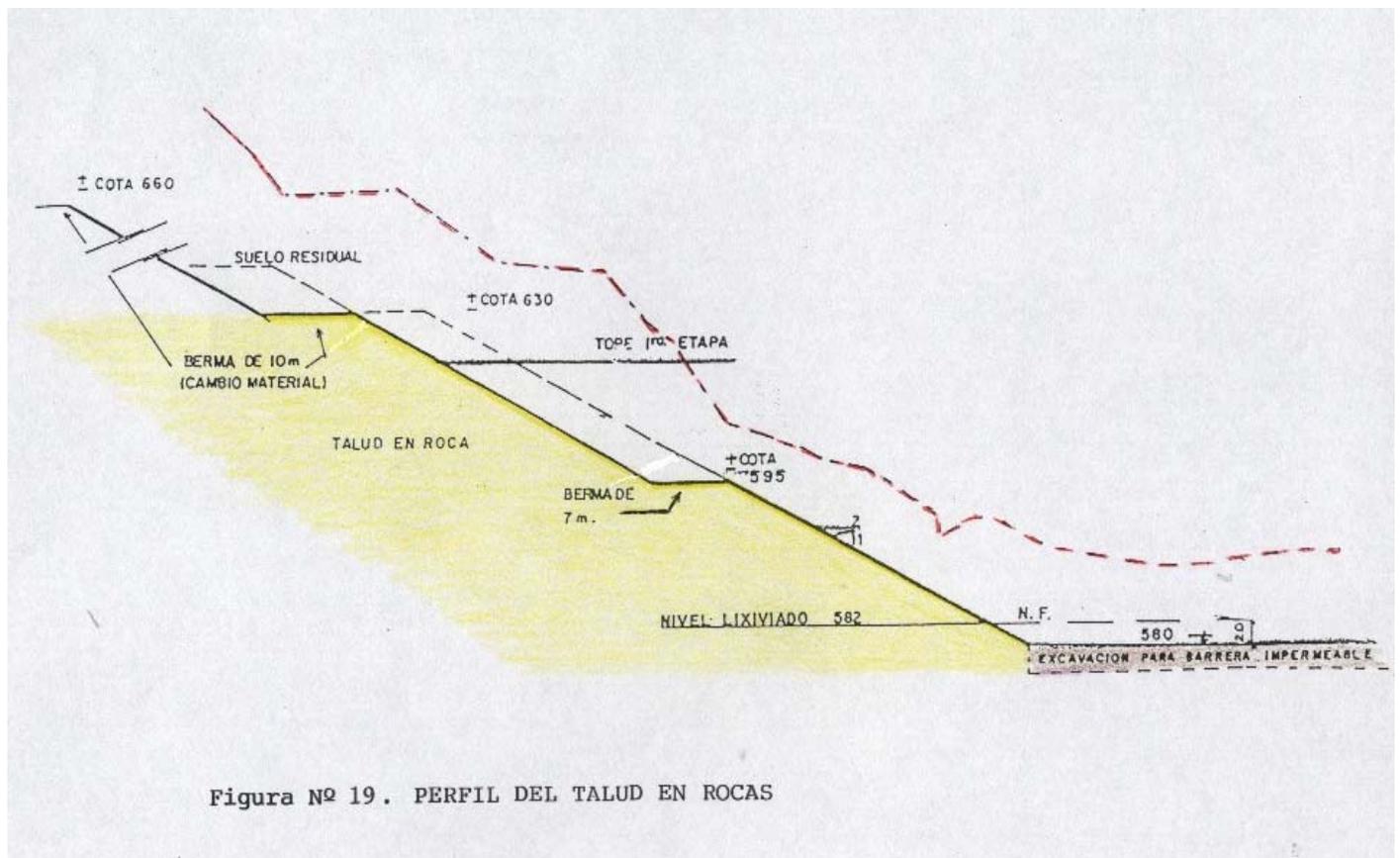


Figura Nº 19. PERFIL DEL TALUD EN ROCAS

7. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN SUELOS

7.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

De acuerdo a las observaciones de campo, efectuadas para la realización de los informes 1944 *“Estudio geotécnico para verificación de suelos en el relleno sanitario La Bonanza”*, el 1946 *“Verificación de suelos y ensayos de permeabilidad in situ y laboratorio”* y el 1961 *“Ensayos de permeabilidad in situ y laboratorio en el área de construcción de la celda para desechos especiales”*, realizados por el Ing. Ernesto D’Escriván G, de los requisitos de los materiales para la construcción de diques de soporte de los desechos especiales, de las características de los desechos, de los apoyos de los diques y de las condiciones geológicas del área, se establecen los siguientes parámetros de cálculo, recomendados para verificar la estabilidad de los taludes naturales y de los diques contenedores de los desechos tóxicos.

7.2. PARÁMETROS DE CÁLCULO

ESTRATO	ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ) (Grados)	COHESIÓN c (Kg/cm ²)	PESO UNITARIO γ (Kg/m ³)
Materiales para construcción de los diques, principalmente suelos residuales Arcillosos	25° - 28°	0,1 - 0,5	1800 - 2000
Desechos Especiales	18° - 22°	0,1 - 0,4	2000 - 2400 *
Terreno natural de Apoyo	25° - 35°	0,1 - 1,5	1800 - 2100
Material de los Taludes	25° - 30°	0,1 - 1,5	1800 - 2000

* Material saturado. Tabla N° 7

7.3. ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE LOS DIQUES

De acuerdo a los parámetros anteriores, se realizaron para las condiciones mas desfavorables los cálculos para fallas circulares y determinación de factores de seguridad para cinco diques con altura de 5 m cada uno, para una altura total de 25 m, con talud externo 2:1, y

talud interno 1:1, con berma superior de 5 m, empotrado el primero 2m en el terreno natural, el segundo sobre el dique inicial y parte de los suelos que cubren los desechos y los sucesivos apoyados sobre el anterior y parte de los desechos tóxicos especiales.

Estos desechos, quedarán apoyados en el terreno excavado, constituido por las dos unidades de los esquistos cuarzo micáceo-sericíticos y grafitosos calcáreos, teniendo una capacidad suficiente para resistir el peso de los desechos especiales que transmitirán una presión estimada entre 5 y 6 Kg/cm².

7.3.1. Condiciones de Apoyo y Fundación de los Diques de Soporte

DIQUE N° 1 - SECTOR SUR

La base de estos diques, se encuentra en la cota 578,80 en el centro del extremo Sur de la celda especial, con pendiente ascendente del 2% hacia los extremos y cota 579,20 y según el perfil por el eje 40, la rasante se encuentra a nivel del terreno natural, por lo que será necesario excavar para llegar al esquisto, por lo menos 2 m para fundar el dique base de los otros cuatro diques, para que en número de cinco lleguen a una altura de 25 m.

DIQUE N° 2 - SECTOR SUR

Estos diques van a tener una base en la cota 581,20 en el extremo

Norte de la celda especial, con una pendiente ascendente del 2% hacia los extremos y cota de 581,60 según el perfil por el eje 120, en este caso, la rasante se encuentra por debajo del terreno natural, por lo que será necesario conformar el borde de la excavación en el esquivo en forma de cuña, tal y como se muestra en la figura N° 20

DIQUE N° 3 - SECTOR ESTE (FRONTAL)

Los diques que pertenecen a este sector, se encuentran entre las cotas 581,20 en el extremo Norte a la cota 579,20 en el extremo Sur, con pendiente longitudinal del 2%, según el perfil por el extremo Este.

7.4. ANÁLISIS DE FALLAS EN SUELOS

En el análisis de taludes en roca, se asume que el control de las fallas se debe a las características geológicas que están presentes, tales como planos de foliación y planos de diaclasas, las cuales hacen que el macizo rocoso sea una masa discontinua.

En el caso de taludes que involucran materiales blandos, como recubrimientos de suelos o escombreras (en nuestro caso estos materiales van a estar constituidos por suelos residuales arcillosos), la falla ocurre a lo largo de una superficie que se

aproxima a una forma circular, no existe un patrón estructural claramente definido y la superficie de falla es libre de encontrar la línea de menor resistencia a través del talud.

Observaciones de fallas de taludes en suelo, sugieren que estas superficies generalmente ocurren en una forma circular, y en su gran mayoría las teorías de estabilidad están basadas en estas observaciones.

Las condiciones bajo las cuales, ocurre normalmente la falla circular, es cuando las partículas de suelo o roca son muy pequeñas comparadas con el tamaño del talud y cuando además estas partículas no están bloqueadas en cuanto a su forma. En el caso de las escombreras, la roca triturada tiende a comportarse como un suelo generando grandes fallas en forma circular.

Este tipo de fallas se pueden observar más claramente en taludes de poca altura, en las escombreras de material fino proveniente del proceso de molienda y recuperación de metales.

Los taludes de soporte del relleno van a estar conformados por material arcilloso, igualmente de poca consistencia, compactados mediante tracto-rodillos, por lo tanto tendrá tendencia a generar fallas circulares, motivo por el cual se aplica el método de cálculo de fallas circulares en este tipo de taludes.(Ver figura N° 20).

CALCULO DE ESTABILIDAD DE LOS DIQUES. FALLAS CIRCULARES

LA CELDA SERA CONSTRUIDA POR ETAPAS, SEGUN LA DEMANDA DE DESECHOS ESPECIALES.

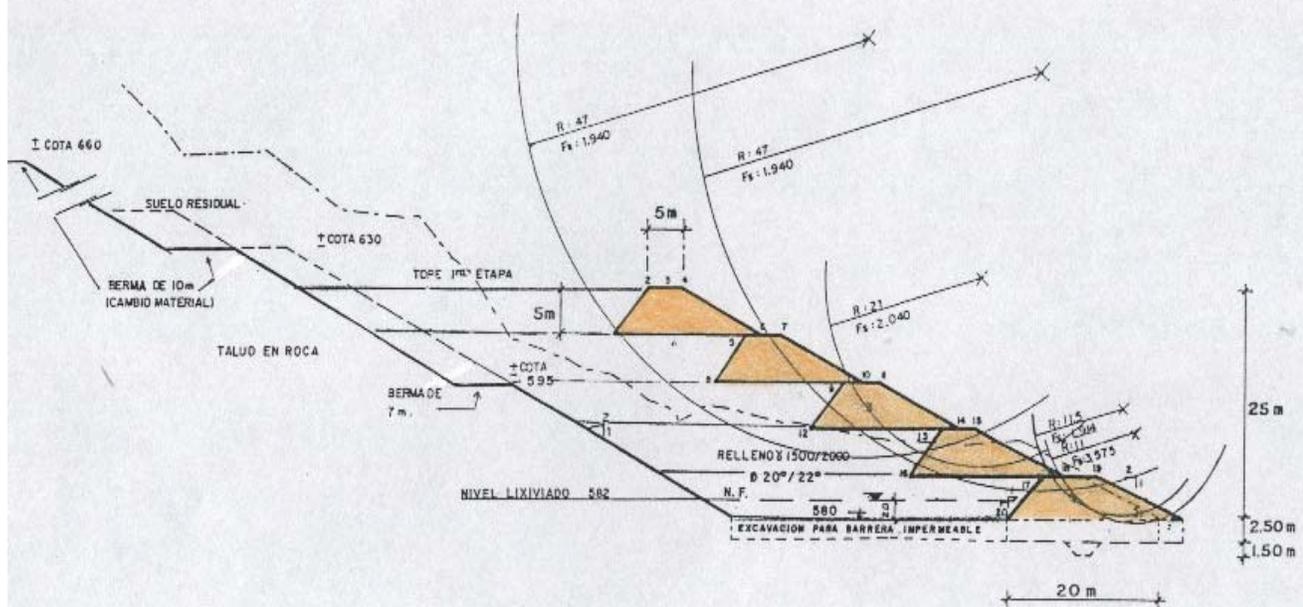


Figura Nº 20. Fallas Circulares.

Las principales características, que debe presentar el talud, para la obtención de las tablas de estabilidad de una falla circular son:

- ◆ El material debe presentar propiedades mecánicas que no varíen en la dirección de la carga.
- ◆ La resistencia al corte del material es caracterizada por una cohesión c y un ángulo de fricción \emptyset , los cuales están vinculados por la ecuación de Coulomb siguiente:

$$\tau = c + \sigma \tan \emptyset$$

- ◆ Se asume que la falla ocurre a lo largo de una superficie circular, la cual pasa a través del pie del talud.
- ◆ Se asume que la grieta de tensión ocurre en la superficie superior o en la cara del talud.
- ◆ La localización de las grietas de tensión, repercute de manera tal, que el factor de seguridad es el mínimo de acuerdo a la geometría del talud y a las condiciones de agua subterránea.

- ◆ En el análisis, es considerado un amplio rango de condiciones de agua subterránea, que va desde un talud seco hasta un talud completamente saturado, bajo una gran recarga.

El factor de seguridad del talud se define como:

$$F = \frac{\text{Resistencia al corte disponible, resistente al deslizamiento}}{\text{Esfuerzo al corte movilizado a lo largo de la superficie de falla}}$$

Reagrupando la ecuación de Coulomb en función del factor de seguridad tenemos:

$$\tau = \frac{C}{F} + \frac{\sigma \tan \phi}{F} \quad \text{Donde } \tau \text{ es el esfuerzo al corte movilizado a lo largo de la falla.}$$

La resistencia al corte disponible, resistente al deslizamiento es dependiente de la distribución de los esfuerzos normales σ a lo largo de la superficie de falla.

Los esfuerzos normales y sus diferentes distribuciones, que influyen sobre el factor de seguridad de taludes en suelos, han sido estudiados por Frohlich, quien encontró un límite inferior para

todos los factores de seguridad, los cuales satisfacen la estática dada por la suposición que los esfuerzos normales están concentrados en un solo punto en la superficie de falla.

Igualmente el límite superior es obtenido por la suposición que la carga normal es concentrada en los dos extremos del arco de falla.

La naturaleza irreal de estas distribuciones de esfuerzos no es de mayor consecuencia, ya que el objeto del ejercicio en este caso, es simplemente determinar los extremos entre los cuales el factor de seguridad actual de un talud debe encontrarse.

En un ejemplo considerado por Lambe y Whitman, los límites superior e inferior para el factor de seguridad de un talud en particular corresponden a 1.62 y 1.27 respectivamente. El análisis del mismo problema por el método de Bishop simplificado de las rebanadas da un factor de seguridad de 1.30, el cual sugiere que el factor de seguridad obtenido puede ser razonablemente cercano a la solución del límite inferior.

Una evidencia fehaciente, es aportada por el análisis que asume que la superficie de falla posee una forma de espiral logarítmica, por lo tanto, la solución al límite inferior es también una solución de significado práctico, en este caso, el factor de seguridad es independiente de la distribución de los esfuerzos normales y los límites superior e inferior coinciden.

Taylor (1948), comparó los resultados de un número de análisis de espirales logarítmicas con resultados cercanos al límite inferior y encontró que la diferencia es despreciable. En base a esta comparación, Taylor concluyó que la solución límite inferior da un valor del factor de seguridad, el cual es suficientemente exacto para la mayoría de los problemas prácticos que involucran una falla circular simple de taludes.

Castillejo (1993), indica que otros autores han realizado verificaciones similares a las realizadas por Taylor y obtuvieron las mismas conclusiones. De aquí, que las tablas presentadas corresponden a la solución límite inferior para el factor de seguridad, obtenidas por la suposición que la carga normal es concentrada en un punto simple en la superficie de falla.

7.5. PRESENCIA DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para realizar el cálculo de la fuerza de empuje, debido a la presión de agua presente en la superficie de falla y en la grieta de tensión, se hace necesario asumir un grupo de patrones de flujos que coincidan en lo posible, con aquellas condiciones en las cuales se cree existen en el campo.

En el análisis de fallas de taludes en roca, se encuentra que la mayor parte del flujo de agua ocurre en las discontinuidades del macizo rocoso y que dicha roca es impermeable en si misma. En el caso de taludes en suelo o en roca triturada, la permeabilidad del material es generalmente mayor en magnitud que la permeabilidad de la roca intacta.

Se observa en la figura (20.a) del gráfico, que las líneas equipotenciales dentro de una masa de suelo son aproximadamente perpendiculares a la línea que indica el nivel freático, mientras que las líneas de flujo son paralelas al nivel freático, para la condición de estado constante hacia abajo.

Se puede observar que la superficie freática se asume de manera que coincida con la superficie del terreno a una distancia x , medida a diferentes alturas detrás del pie del talud.

La superficie freática en sí, ha sido obtenida en sus diferentes rangos de inclinación de ángulos y los distintos valores de x considerados por la solución de ecuaciones propuestas por L. Casagrande.

Esto corresponde a una posible superficie de agua de un río, de un embalse o simplemente donde la superficie del terreno se intersecta con la superficie del flujo.

Cuando el talud está sometido a una gran recarga, tenemos un talud saturado (Figura 21.b), en el cual las líneas equipotenciales y las de flujos asociados en el análisis de estabilidad, están basadas en un método análogo de Resistencia Eléctrica para el Estudio de Redes de Flujo de Aguas Subterráneas en Taludes Isotrópicos, desarrollado por Hans.

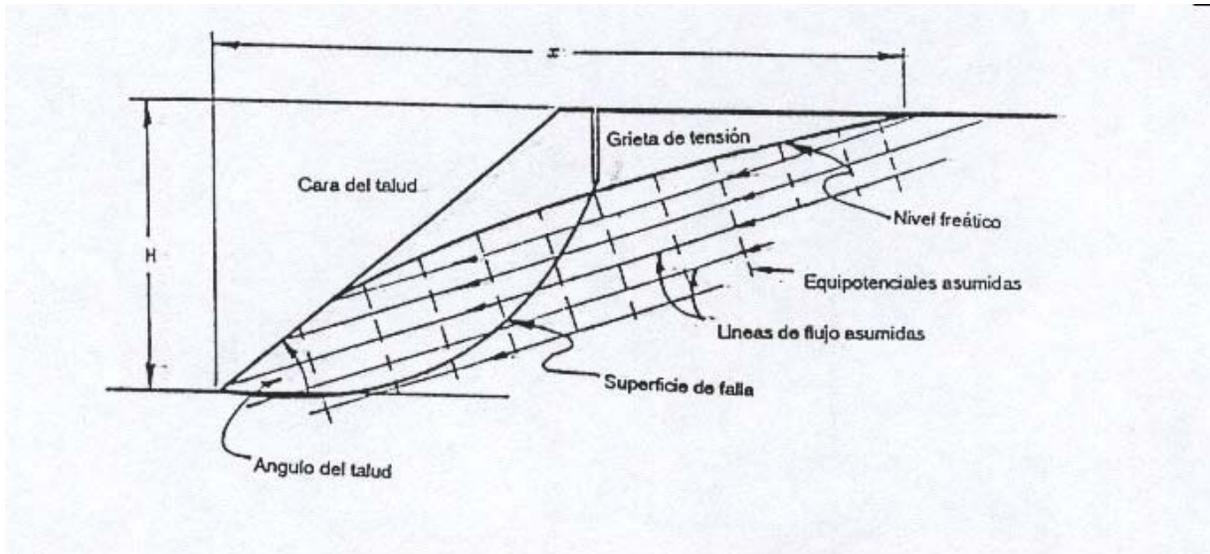


Fig. 21a. Patrón de flujo de agua subterránea bajo un estado de drenaje, condición que coincide con la superficie del nivel freático a una distancia x desde el pie del talud. La distancia x es medida en múltiplos de la altura del talud H .

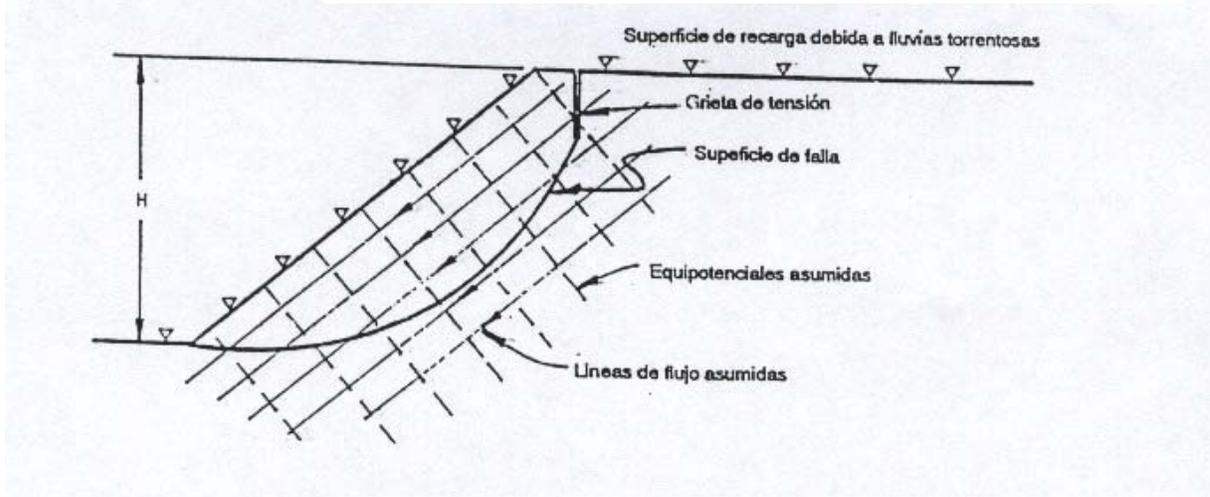


Fig. 21b. Patrón de flujo de agua subterránea en un talud saturado, sometido a un régimen de recarga alto por lluvias fuertes.

Figura N° 21: Definición de los patrones de flujo de agua subterránea utilizados en los análisis de falla circular en taludes de suelo y roca.

7.6. ÁBACOS O CARTAS DE FALLAS CIRCULARES

Los ábacos de fallas circulares, fueron producidos por medio de un computador, el cual mediante un software y soluciones gráficas, se combinaron para obtener el punto más crítico de la superficie de falla y grieta de tensión para cada rango de geometría de inclinación y condiciones de agua subterránea. Se asumió que la grieta de tensión es localizada en la superficie superior del talud.

7.6.1 Forma de Utilizar los Ábacos de Fallas Circulares

Los diferentes ábacos para determinar el factor de seguridad de un talud en particular, vienen numerados del 1 al 5, (Ver anexo 2), en correspondencia con los patrones de flujo de agua utilizados en el análisis de falla circular de taludes en suelos.

La forma de utilizar estos ábacos o cartas es la siguiente:

1^{er} PASO

Decidir de acuerdo a las condiciones de agua subterránea que existen en el talud, la carta o ábaco que más se ajusta a estas condiciones. Los ábacos están numerados del 1 al 5.

2^{do} PASO

Calcular el valor de la relación adimensional

$$\frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \text{Tan } \emptyset}$$

Siendo

- c: Cohesión
- γ : Peso unitario
- H: Altura del talud
- \emptyset : Ángulo de fricción

3^{er} PASO

Seguir la línea radial del valor encontrado en el paso anterior (paso 2), hasta que se interseque con la curva que corresponde a la pendiente del talud que está en estudio

4^{to} PASO

Hallar el valor que corresponde a

$$\frac{\text{Tan } \emptyset}{F} \quad \text{ó} \quad \frac{C}{\gamma \cdot H \cdot F}$$

Esto va a depender de su conveniencia y posteriormente se calcula el factor de seguridad.

7.7. LOCALIZACIÓN DEL CÍRCULO DE FALLA CRÍTICO Y DE LA GRIETA DE TENSIÓN

En los ábacos de fallas circulares, la localización del círculo de falla crítico y de la grieta de tensión para la condición de equilibrio límite ($FS=1$), será determinado para cada talud analizado.

Una vez que el agua subterránea se encuentra presente en el talud, se ha determinado que la localización del círculo de falla crítico y de la grieta de tensión, no son particularmente sensitivas a la posición del nivel freático. Varían de un talud completamente drenado a un talud que presenta condiciones de flujos de agua subterránea.

Los ábacos de fallas circulares, resultan de mucha utilidad en la construcción de esquemas de potenciales superficies de deslizamientos y para la estimación del ángulo de fricción, cuando se analiza un deslizamiento circular en un análisis regresivo. También suministran el inicio para un análisis de falla circular más sofisticado, en el cual la localización de la superficie de falla circular que posee el factor de seguridad menor es encontrado por métodos iterativos.

7.8. FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS TALUDES DE LOS DIQUES

La estabilidad de los diques, que hacen el cerramiento de los diferentes niveles de la celda contra el cerro, se verificó de acuerdo a los taludes programados con inclinación de 1:1 en la parte interior y 2:1 en la parte exterior, estando el dique inicial apoyado y empotrado en el macizo rocoso de apoyo, tal y como se muestra en el plano respectivo, habiéndose efectuado el cálculo de estabilidad para las condiciones más desfavorables. (Ver tabla N° 8).

Diques	Cantidad	Altura (m)	Factor de Seguridad
1	1	5	3.5
1-2	2	10	1.9
1-2-3	3	15	2.0
1-2-3-4	4	20	1.9
1-2-3-4-5	5	25	1.9

Tabla N° 8. Factores de Seguridad de los Diques

Los resultados de los factores de seguridad, en la condición más desfavorable, indican que los diques son estables.

8. GEOSINTÉTICOS

8.1. DEFINICIÓN

La palabra Geosintético, comprende toda la gama de materiales sintéticos, que se utilizan tanto para impermeabilizar, como para filtrar un flujo hacia una superficie en contacto con él.

Geosintético, se interpreta de la manera siguiente “GEO” por su aplicación directa sobre suelos y rocas, y “SINTÉTICO”, por estar fabricado por procesos químicos, no naturales y que por sus características físicas, químicas y mecánicas, han surgido como una excelente alternativa en el diseño de obras civiles.

8.2. CLASIFICACIÓN DE LOS GEOSINTÉTICOS

Los Geosintéticos, se clasifican en cuatro grandes grupos:

- Geomembranas
- Geomallas
- Geotextiles
- Geocompuestos

8.2.1. Geomembranas

Las geomembranas son impermeables, hechas a base de polietileno de baja, media y alta densidad, usadas principalmente para controlar la migración de líquidos y también sólidos, para evitar que entren en contacto con la superficie del suelo o roca. Son láminas en forma de películas delgadas y flexibles y son los únicos materiales que se utilizan en construcción, que sirven tanto para separación como para refuerzo. Estas características especiales, es lo que le ha dado tanto éxito en el mundo entero. (Ver fotografía N° 11).

◆ Propiedades de las Geomembranas

◆ Resistencia:

Existen dos tipos de resistencia:

1. Resistencia al rasgado: Muchas geomembranas no reforzadas tienen una resistencia al rasgado relativamente baja, que oscila entre 1,8 y 4,5 Kg., dependiendo del espesor.



Fotografía N° 11

Se observa la colocación de geomembranas en un talud del relleno.

2. Resistencia al impacto: Cualquier objeto que caiga sobre la geomembrana puede causar daños por punzonamiento y penetrarla, ocasionando grandes fallas de permeabilidad o generando puntos débiles que den comienzo a una ruptura o rasgado. Por lo tanto el conocimiento de la resistencia al impacto es de suma utilidad.

◆ **Permeabilidad:**

Las geomembranas son impermeables y su función principal es la de aislar o retener sólidos y líquidos de manera de evitar el contacto directo de estos con el suelo. Lo que sucede con las geomembranas es determinar con anticipación el grado o capacidad de impregnación. La impregnación de líquidos no es síntoma de que la geomembrana ha fallado, pero si es un índice de deterioro.

El origen de los líquidos y gases circundantes a la geomembrana, debe conocerse, y realizar el drenaje para evitar que cause daños a la estructura del geosintético. Los líquidos pueden provenir de reservorios de agua cercanos, de diques o propia del terreno.

◆ **Porosidad:**

Está estrechamente ligada al proceso de fabricación. El control de calidad debe ser estricto, ya que algún desperfecto en la superficie como pequeños agujeros, afectaría el comportamiento estanco.

◆ **Rugosidad:**

Esta propiedad, va a depender del diseño de la geomembrana cuando ésta es usada para forrar rellenos, en construcción de canales, reservorios y en donde la rugosidad juega un papel importante. Mientras más rugosa es la superficie de la geomembrana, mayor es la adherencia de ésta en contacto con el suelo.

La fricción entre la geomembrana-suelo, siempre va a ser menor que la fricción entre suelo-suelo. La geomembrana que tiene fricción mínima, es la fabricada de polietileno de alta densidad (PEAD) y las de máxima fricción, las fabricadas con goma.

◆ Durabilidad:

Tiene mucho que ver, con la capacidad de impregnación de líquidos a lo largo de su vida útil.

El deterioro o envejecimiento de la geomembrana, puede ser debido a:

1. El tipo de material utilizado.
2. La calidad de fabricación.
3. La pigmentación de las películas.
4. El trato recibido tanto en fábrica como en obra.
5. Las condiciones climatológicas.

◆ Características de las Geomembranas

- ◆ **Peso:** Depende del espesor y se mide en gr/m^2 .
- ◆ **Espesor:** Varía entre 0,25 mm y 10,25 mm.
- ◆ **Forma:** Depende del uso que se le va a dar, son de forma laminar, lisa o rugosa.
- ◆ **Color:** De acuerdo al requerimiento tenemos:

Negro: Instalar en condiciones de alta temperatura.

Blanco: Este color tiene la facultad de reflejar la luz del sol, lo que influye en la temperatura y por lo tanto las láminas minimizan sus dilataciones y contracciones. Por otra parte el color blanco facilita la inspección visual.

◆ Usos de las Geomembranas

Las geomembranas, son utilizadas para impermeabilización en diversos tipos de obras:

- ◆ Superficies en obras de vialidad.
- ◆ En minería como contención de escorrentía, para evitar la contaminación del nivel freático.
- ◆ Lagunas de tratamiento.
- ◆ Lagunas de confinamiento.
- ◆ Lagunas para riego y acuicultura.
- ◆ Lagunas de lodos de perforación y oxidación.

- ◆ Tanques de almacenamiento en estaciones de servicio, como contenedores de combustibles.
- ◆ Celdas para desechos tóxicos.
- ◆ Estructuras de concreto.
- ◆ Áreas verdes.
- ◆ Túneles y sobre concreto normal o proyectado.
- ◆ Revestimiento de depósitos, contra contaminantes disueltos o sedimentos.
- ◆ Para proteger de la corrosión, superficies de acero y de concreto.
- ◆ Protección de taludes estabilizando fallas.

8.2.2. Geomallas

Son redes fabricadas de polietileno de baja o alta densidad, también son denominadas geo rejillas. La principal función de una geomalla es la de refuerzo, debido a su configuración de malla, pueden ser reforzada en una o en dos direcciones, son de varios colores y tienen aditivos contra las radiaciones ultravioleta.

◆ Propiedades de las Geomallas

◆ Resistencia:

Presentan buena resistencia a la tracción, con aberturas que van desde ½” a 2.0” de diámetro. La resistencia es producto de los materiales utilizados en su fabricación como son los polietilenos de alta densidad y de los polipropilenos.

◆ Permeabilidad:

Debido a que esta conformada por filamentos en ambas direcciones, la permeabilidad en este caso se refiere únicamente al transporte de líquidos por medio de sus filamentos.

◆ Durabilidad:

Existen tres formas prevalentes de degradación molecular, que inciden directamente en las geomallas afectándolas en su durabilidad. Estas son: el ataque químico, la foto-oxidación y la oxidación térmica.

Es importante, conocer las características del envejecimiento que presentan las geomallas, en aplicaciones al aire libre donde es atacada por la radiación ultravioleta.

◆ Características de las Geomallas

- ◆ **Peso:** Se mide en gramos por metro cuadrado

(gr/m²), Y oscila entre 450 gr/m² y 810 gr/m².

- ◆ **Espesor:** Existe en el mercado geomallas de varios espesores los cuales varían entre 1,77 mm y 2,56 mm.

Las de mayor espesor, son utilizadas en obras de drenajes y canalización, mientras que las de menor espesor, se utilizan para la estabilización de taludes y refuerzos de suelos.

- ◆ **Color:** Según Normas Internacionales, se utiliza para señalar tuberías enterradas de la siguiente manera:

Amarillo → Gas

Rojo → Electricidad

Azul → Agua

Verde → Teléfono

Negro → Actúa como colorante y contribuye a preservar el material.

- ◆ **Forma:** La geomalla presenta orificios cuadrados, con esquinas redondeadas o en forma de elipses alargadas.

Estos orificios tienen unas medidas que van desde ½” a 2.0”.

◆ Usos de las Geomallas

Se utiliza como refuerzo en infinidades de obras, tales como:

- ◆ Refuerzo en terraplenes y presas de tierra
- ◆ Uso en drenajes de impermeabilizaciones.
- ◆ En reparación de fallas por deslizamiento.
- ◆ Construcción de colchones para rellenos de suelos
- ◆ Como refuerzo en bases de carreteras de asfalto.
- ◆ Refuerzo de tuberías enterradas.
- ◆ Se utiliza como cercas de seguridad.
- ◆ En la construcción de muros de gaviones
- ◆ En muros de tierra reforzada.

El sistema de cobertura final, puede llevar una capa de geomalla para mejorar la estructura del mismo. La geomalla aumenta la capacidad de tracción del sistema en la redistribución de las tensiones y minimizar los asentamientos diferenciales. (CALVO et.al. 1998).

8.2.3. Geotextiles

Los Geotextiles, están contruidos por fibras o filamentos industriales de poliéster o de polipropileno de alta resistencia. Son telas tejidas o no, de gran durabilidad, son permeables y porosas. En su fabricación no se utilizan fibras naturales, ya que éstas son biodegradables.

◆ Clasificación de los Geotextiles

Se clasifican en dos grandes grupos:

◆ Geotextiles tejidos:

Están contruidos por dos grupos de filamentos paralelos, entrelazados formando una estructura plana. De las diferentes formas de entrelazar estos filamentos, surgen los variados tipos de tejidos.

En la elaboración del geotextil, los telares juegan papel importante a la hora de obtener el producto final, permitiendo que los filamentos sean colocados de diferentes formas, proporcionando poros en las membranas de abertura uniforme.

◆ Geotextiles no tejidos:

En este tipo de geotextil, el telar no juega ningún papel, ya que no existen fibras con un tramado definido, sino que las fibras o filamentos son colocados al azar, unidos entre sí por resinas, por medio calor o por métodos mecánicos como amarres utilizando agujas para el punzonado. Las aberturas no son uniformes.

◆ Propiedades de los Geotextiles**◆ Resistencia:**

La resistencia de un geotextil, se obtiene en la fabricación, en la cual se va variando la magnitud de acuerdo al tipo que se requiera. La resistencia es una de las propiedades más importantes, por que es la encargada de absorber los esfuerzos que se generan desde el principio hasta que el material es exigido completamente.

Para obtener buenos resultados en el uso de un geotextil, es de mucha importancia conocer su resistencia, y así poder seleccionar el tipo adecuado de acuerdo a los requerimientos.

◆ Permeabilidad:

Los geotextiles, tienen la propiedad de transmitir y conducir un flujo a través y entre su plano, de modo que pueden ocurrir dos tipos de flujo: normal y planar.

El flujo normal, propiedad de todos los geotextiles, es el que se origina cuando la corriente del flujo atraviesa perpendicularmente el textil, actuando en forma de filtro.

El flujo planar, es aquel que se desliza entre el plano estructural conformado por los filamentos, produciéndose en este caso una especie de flujo laminar.

◆ Porosidad:

La porosidad en los geotextiles, depende del tipo de fibra y la forma de fabricación de los mismos. Los geotextiles tejidos tienen una porosidad regular, mientras que los geotextiles no tejidos presentan aberturas irregulares de varias formas y tamaños.

La porosidad se entiende como el tamaño, forma y distribución de los espacios entre los filamentos que conforman el geotextil.

♦ Rugosidad:

Es importante esta propiedad, ya que los geotextiles pueden utilizarse en funciones de adherencia, refuerzo y toda aplicación que necesite de una buena fricción entre la superficie y el geotextil. Se utilizan con más frecuencia los tejidos y los no tejidos por procesos mecánicos.

♦ Durabilidad:

Los geotextiles están compuestos de polímeros no biodegradables, no digeribles, no los afecta el contacto directo con el suelo y con sustancias químicas, por lo que la durabilidad es bastante buena. Sin embargo al estar los geotextiles expuestos al sol, son afectados por los rayos ultravioleta.

Los geotextiles, deben ser almacenados en sitios cubiertos y protegidos de la excesiva incidencia de los rayos solares. Una manera de protegerlos en sitios en los que va a estar expuesto a la intemperie, bien sea en almacén o en obra, es colocarles una cubierta de betún asfáltico o de concreto.

◆ Características de los Geotextiles

- ◆ **Espesor:** Varía entre 1.0 mm y 5,4 mm.
- ◆ **Peso:** Depende del espesor seleccionado. Los geotextiles no tejidos pesan entre 120 gr/m² y 600 gr/m², mientras los tejidos pesan entre 105 gr/m² y 455 gr/m².
- ◆ **Color:** Existen varios colores como el negro, blanco, gris y diversas tonalidades, producto de combinaciones de los colores anteriores.
- ◆ **Forma:** Depende del tipo de geotextil. El tejido presenta una forma regular parecida a una malla con orificios en forma cuadrada, y el no tejido, tiene una forma semejante a una alfombra.

◆ Usos de los Geotextiles

- ◆ En carreteras pavimentadas y no pavimentadas, se utiliza como refuerzo y contención de los suelos, como refuerzo de terraplenes, en estabilización de taludes y presas.
- ◆ Se utiliza en las fundaciones de represas y diques.
- ◆ En rellenos sanitarios detecta fugas de lixiviado.

- ◆ Evita el punzonamiento de las geomembranas durante la construcción, y además actúan como transporte de fluidos y disipador de gases, evitando que ocurran explosiones de las geomembranas.
- ◆ Actúa como filtro de líquidos, impidiendo el paso de partículas sólidas.
- ◆ Impide la contaminación de los suelos con los agregados seleccionados.
- ◆ Se utiliza en el drenaje planar, llevando el líquido en la estructura del plano sin que se produzcan presiones de los poros en la masa del suelo.
- ◆ Es usado como recubrimiento de tuberías, túneles y embalses, así como en tratamiento de muros.
- ◆ Todo suelo tiene baja resistencia a la tensión. Usado en suelos, absorbe los esfuerzos de tensión que este no posee.

**◆ Características de Algunos Geotextiles Utilizados en
Rellenos Sanitarios**

Fabricante	Nombre Comercial	Peso (gr/m ²)	Espesor (mm)	Resistencia a Tracción (Kn/m)	Elongamiento	Resistencia al Punzonado (Kn)
SYNTHETIC	NONWOVEN	180	1,5	12,5	40%	2,4
GSE	HYPERFLEX	1400	1,5	430,0	13%	35,6
GSE	HYPERNET	980	5,6	79,0	-	-
HUESKER	B600	600	6,0	11,0	95%	2,8
THERMOLITE	TH600	600	5,4	36,0	45%	3,1
FIBERTEX	F 650M	650	5,0	28,5	80%	2,8
AMOCO	4516	600	5,4	23,4	70%	2,5
TREVIRA	011/550	550	5,3	27,1	85%	2,0
AGRU	DA 600	600	-	25,0	70%	2,8
PROMEDIO		600	5,2	29,0	75%	2,7
VALOR REQUERIDO		600	>5,0	>35	<70%	>2,8

Tabla N° 9. Características de Geotextiles

8.2.4. Geocompuestos

Resulta de la combinación de los geosintéticos anteriormente mencionados. Estos geocompuestos pueden ser geomembrana-geomalla, geomalla-geotextil, geomembrana-geotextil y geotextil-geomalla-geomembrana, o cualquier combinación que resulte de los tres

geosintéticos con otro material, que necesariamente no tiene que ser geosintético, como por ejemplo, tierra, plástico, cables de acero, etc.

Estos geocompuestos, resultan una excelente alternativa, en cuanto a que presentan un alto rendimiento y desempeñan funciones básicas de drenaje, filtración, refuerzo y separación.

◆ Propiedades y Características de los Geocompuestos

Las propiedades y características de los geocompuestos, son las mismas que presentan los geosintéticos mencionados anteriormente y que en combinaciones cualesquiera, forman a los geocompuestos. Entre las características y propiedades tenemos el peso, espesor, color, forma, resistencia, porosidad, rugosidad, durabilidad, permeabilidad.

8.2.5. Materiales utilizados en la colocación de los Geosintéticos

◆ Arcillas Compactadas

Para mejorar los sellos de las geomembranas, se utilizan arcillas compactadas. En la composición de los suelos, suelen aparecer varios tipos de arcillas. Las arcillas naturales, las arcillas limosas, arcillas arenosas y limo-arcillosas. La

conductividad eléctrica de una capa barrera de arcilla, depende del tipo de arcilla a utilizar, de la mineralogía de la arcilla, granulometría, límites de plasticidad.

Además, garantiza la impermeabilidad de los suelos de un relleno sanitario. Se acostumbra y es norma del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, colocar una capa de arcilla en las celdas para desechos normales, cuya permeabilidad no sea mayor a 10^{-7} m/s y en la celda para desechos específicos, una permeabilidad menor o igual a 10^{-9} m/s.

Sobre esta capa se apoyarán los geosintéticos impermeables, que garanticen la estanqueidad del relleno y dónde se colocará la capa de grava que servirá de medio de transporte para que el lixiviado llegue a los colectores.

◆ Mezcla de Bentonita

Se añade a los suelos naturales, para reducir la conductividad eléctrica y aumentar la capacidad de absorción de los materiales, y los varía, a suelos de alta plasticidad. La mezcla suelo-bentonita al compactarse, da lugar a un sello de baja conductividad eléctrica.

8.3. SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS

Los sistemas de impermeabilización, utilizan materiales naturales y artificiales, en el recubrimiento de toda la cuenca de la celda, fondo, tope y superficies laterales o taludes.

Por tal motivo, la mayor parte de los estudios llevados a cabo sobre los vertederos, contemplan precisamente los sistemas y materiales utilizados para la impermeabilización, es decir, prevenir la salida de elementos contaminantes o lixiviados de la celda donde se depositan los desechos, y limitar lo más posible la penetración de las aguas meteóricas en el relleno, después de su llenado y cierre por la parte superior.

Respecto al aislamiento del fondo y de las paredes de la celda, la condición ideal es la de una celda construida en una Formación naturalmente impermeable, constituida por una Formación muy espesa y homogénea de arcilla sobre consolidada.

Debido a que una situación como la mencionada anteriormente, no suele ser frecuente, por lo general hay que recurrir a barreras artificiales que puedan resistir a las acciones químicas, mecánicas y térmicas.

Todos estos requisitos pueden satisfacerse, sólo con un sistema de aislamiento pluriestrato, constituido por materiales naturales y distintos tipos de geosintéticos en diferentes combinaciones.

El sistema más difundido, es el de una capa de terreno natural arcilloso, al cual se sobrepone directamente materiales geosintéticos.

Previamente, en el fondo de la excavación se deposita un manto de terreno arcilloso, en capas parciales, cada una de las cuales debe aplanarse y compactarse, hasta alcanzar el espesor final requerido.

En las paredes de la celda, si la inclinación lo permite (25° a 30°), se coloca el estrato de arcilla bentonítica sódica de 6 mm de espesor. Este geocompuesto artificial puede utilizarse también para integrar o sustituir parcialmente la capa de fondo de arcilla natural, colocándolo encima de la misma.

Inmediatamente encima de la capa de arcilla natural, se coloca una geomembrana continua de alta densidad, PEAD, la cual se obtiene soldando entre sí, telones de unos 10 m de ancho.

Los telones de geomembrana, tienen un espesor que varía de 0,25 mm a 10,25 mm y están soldados entre sí con una técnica de fusión a presión, que garantiza la estanqueidad hidráulica de los

puntos de soldadura, los cuales constituyen el punto débil del sistema. Existen diferentes métodos, para realizar la prueba hidráulica y mecánica de las soldaduras.

El objetivo del sellado, es proporcionar una barrera que minimice la migración de contaminantes. Un sellado con un 100% de eficacia, evitará que los constituyentes químicos migren al ambiente, aunque ningún sello presenta un 100% de estanqueidad, razón por la cual debe realizarse un diseño adecuado para cada situación.

Hay que tener en cuenta, que dadas las características geométricas de la superficie a recubrir y las características de resistencia de los geosintéticos a utilizar, es preciso comprobar la resistencia a la rotura por tracción de los geosintéticos, los cuales tienen que sostener su propio peso y una parte del peso de los desechos, transmitida por fricción.

Tanto la membrana de PEAD (Polietileno de alta densidad), como el geocompuesto bentonítico aplicados sobre las paredes inclinadas de la celda, deberán fijarse oportunamente al borde superior de la pared. (Ver fotografía N° 12).



Fotografía N° 12

Se observa la fijación del geosintético en la parte superior del talud.

El líquido de percolación o lixiviado, que se produce en el proceso de gestión de un relleno sanitario, filtra a través de los desechos, fluye sobre las paredes inclinadas de los taludes y se acumula encima del sistema de impermeabilización del fondo descrito anteriormente.

Para limitar la posibilidad de filtración del lixiviado a través del aislamiento, hace falta evacuarlo continuamente, extrayéndolo del fondo por medio de un sistema de drenaje.

Se coloca un estrato de drenaje entre la masa de basura y el sistema de aislamiento, que le permite al lixiviado llegar rápidamente hasta el punto más bajo de la celda, y por esto al fondo de la misma, la cual tiene una pendiente del 2%.

El drenaje del líquido de percolación, se realiza por medio de un estrato de grava y arena de unos 30 cm. de espesor, colocado sobre la geomembrana de alta densidad, interponiendo un geotextil para impedir que los elementos de la grava puedan realizar punzonamientos en la misma.

Dentro del estrato drenante (Zona Primaria), se colocan tubos con hendiduras, que llevan rápidamente el líquido de lixiviado hasta puntos preestablecidos, donde se encuentran los sistema de extracción.

Debajo de este estrato, se encuentra una geomembrana denominada capa barrera primaria, la cual subyace cubriendo totalmente la zona primaria.

Existe una segunda zona, por debajo de la capa barrera y en donde se recoge el volumen del lixiviado ya filtrado, siendo un volumen más pequeño. Por debajo del sistema secundario, esta presente otra geomembrana, llamada capa barrera secundaria y que sirve como barrera hidráulica previendo el flujo descendente de los contaminantes y permite al sistema secundario tomar lixiviado.

Por último, por debajo del sistema completo primario y secundario de impermeabilización y recolección de lixiviados, subyace una tercera barrera constituida de material natural de arcilla compactada, de arcilla mezclada con subsuelo natural o de arcilla mezclada con bentonita. Esta barrera sirve para controlar algún tipo de contaminante que pudiera haber atravesado los sistemas anteriores.

9. *NORMATIVA LEGAL*

9.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el excesivo consumo de productos derivados de nuevas tecnologías, han venido conformando una importante fuente de generación de residuos sólidos, los cuales a su vez, se han constituido en una importante fuente de contaminación del ambiente.

La actitud de la población, ante el proceso de disposición final de esos desechos, varía de acuerdo a la idiosincrasia de las comunidades involucradas y a los niveles de educación ambiental que hayan alcanzado. De esta forma, podemos apreciar marcados contrastes en la conducta de la población que vive en diferentes regiones del país, así como la conducta de los que viven en las zonas marginales con los que habitan en las urbanizaciones.

Ante esta circunstancia, el Estado Venezolano ha puesto en práctica la instrumentación de una serie de medidas de orden organizativo y legislativo que, entre otras cosas, establecen que la disposición final de los desechos sólidos es responsabilidad de las alcaldías. Sin embargo, este proceso tiene una serie de implicaciones ingenieriles muy especializadas, además de las económicas, que no

pueden ser resueltas con facilidad por las distintas alcaldías involucrada, requiriéndose en algunas oportunidades de negociaciones y convenios mancomunados entre varias de estas corporaciones.

Se puede decir, que es generalizado el rechazo de las comunidades ante la ubicación de un relleno sanitario, de una planta de tratamiento de desechos, de una estación de compactación de desechos sólidos, en su jurisdicción. Esta negativa se ha comenzado a identificar como “el efecto NIMBY” (Not In My Back Yard”).

En nuestro caso, el problema que se presenta es que existiendo leyes, reglamentos, decretos y otros instrumentos normalizadores, estos no se cumplen, generándose graves problemas de contaminación del medio ambiente, problemas de salud pública, por supuestos rellenos sanitarios mal ubicados, mal diseñados, mal construidos y mal operados.

9.2. NORMATIVA LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL

El régimen jurídico venezolano, en materia ambiental, incluye una serie de instrumentos entre los cuales se encuentran los siguientes:

I.- La Constitución Nacional Bolivariana de Venezuela, en sus artículos N° 83, 127 y 129.

II.- Leyes Orgánicas tales como:

1. La Ley Orgánica del Ambiente.
2. Ley Orgánica de Administración Central.
3. Ley Orgánica para la Ordenación del Territorio Nacional.
4. Ley Orgánica de Tribunales y Procedimientos Agrarios.

III.- Leyes Especiales como:

1. Ley Forestal de Suelos y Aguas.
2. Ley de Protección a la Fauna Silvestre.
3. Ley de Reforma Agraria.
4. Ley de Pesca.
5. Ley Penal del Ambiente.

IV.- Reglamentos.◆ *Reglamentos parciales de la Ley Orgánica del Ambiente.*

1. Sobre Juntas para la Conservación, Defensa y Mejoramiento del Ambiente.
2. Sobre Instalación de Vallas.

3. Sobre Normas para la ordenación del Territorio.
4. Sobre Clasificación de las Aguas.
5. Sobre Ruidos Molestos o Nocivos.
6. Reglamento Parcial Sobre Estudios de Impacto Ambiental.

◆ *Reglamentos de la Ley Forestal de Suelos y Aguas.*

1. Reglamento General.
2. Reglamento Parcial sobre Regulación de las Actividades, que impliquen destrucción de vegetación, con fines agropecuarios.

V.- Decretos.

Sobre Áreas que Deben Permanecer bajo Bosques.

1. Los que declaran áreas bajo Régimen de Administración Especial.
2. Normas Técnicas y Procedimientos para el Manejo de Material Radioactivo.
3. Normas para el Control de la Generación y Manejo de Desechos Tóxicos y Peligrosos

4. Normas para Controlar el Uso de Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono.
5. Normas para el manejo de los Desechos Sólidos de origen Doméstico, Comercial, Industrial o de cualquier otra naturaleza que no sean peligrosos.
6. Normas sobre el Control de la Contaminación por Ruido.
7. Normas para la Clasificación y Manejo de Desechos en Establecimientos de Salud.
8. Normas para Regular la Descarga de Vertidos Líquidos a Cuerpos de Agua.
9. Normas para el Control de la Contaminación Atmosférica.

VI.- Resoluciones

- ◆ Resolución conjunta MSAS-MAC-MARNR, para restringir el uso de insecticidas organoclorados.
- ◆ Resolución conjunta MSAS-MARNR, sobre los Criterios Técnicos y Procedimientos para el Control de la Generación y Manejo de Desechos Tóxicos o Peligrosos no Radiactivos.

9.3. NORMAS PARA RELLENOS SANITARIOS EN VENEZUELA

En Venezuela, existe una normativa legal específica para el manejo de los desechos sólidos de origen doméstico, comercial industrial o de cualquier otra naturaleza.

Según Decreto N° 5252 del MARNR.

◆ Referente a la Selección del Sitio para Ubicar un Relleno Sanitario.

- 1) Poseer fácil acceso.
- 2) Tener suficiente área disponible de terreno, para la recepción de los desechos sólidos durante un largo periodo de tiempo.
- 3) Estar fuera de los conos de aproximación y despegue, de aeronaves en los aeropuertos.
- 4) Estar ubicados, a no menos de 400 m de cualquier sistema de abastecimiento de agua, y a no menos de 500 m de pozos profundos.
- 5) Presentar pendientes promedio al 15%.
- 6) No deben existir fallas activas, o riesgos geológicos potenciales.

- 7) No estar ubicados, en planicies que presenten una frecuencia de inundación mayor de una vez cada 100 años.
- 8) Tener un coeficiente de permeabilidad máximo, del orden de 10^{-7} cm/s.
- 9) No estar localizados, dentro de Áreas Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAE), ni en Parques Nacionales.
- 10) No estar ubicados en áreas ambientales sensitivas, tales como pantanos y planicies inundables.
- 11) No estar ubicados dentro de áreas de expansión urbana.
- 12) Indispensable estar localizado, en áreas donde el viento tenga dirección opuesta a centros poblados.
- 13) Poseer suficiente material de cobertura en cantidad y calidad adecuada, dentro o en las cercanías del sitio.

◆ **Otros criterios restrictivos, provenientes de bibliografía especializada en la materia, sobre localización de rellenos.**

1. No se puede construir ningún relleno sanitario, a menos de 300 m. de cualquier lago navegable, estanque o canal de navegación.

2. No deben construirse rellenos, a menos de 300 m de carreteras o autopistas, fundamentalmente por razones estéticas, en consecuencia podría permitirse tal construcción si se instala una pantalla vegetal o un terraplén que lo enmascare.
3. No deben construirse rellenos, en las áreas de hábitat crítico, entendiéndose como tales, aquellos sectores en los cuales viven especies en peligro de extinción.
4. No deben construirse rellenos sanitarios, a menos de 100 m de las planicies de inundación.

◆ **Referente a la Información a Suministrar al MARNR, antes de Instalar un Relleno Sanitario.**

1. Descripción y ubicación del sitio.
2. Vialidad de acceso al lugar.
3. Características topográficas relevantes o predominantes.
4. La topografía inicial, levantamiento planialtimétrico y catastral.
5. Detalles de geomorfología y geología superficial.

6. Datos sobre el nivel freático, incluyendo los patrones de flujo.
7. Tasa de percolación en el sitio.
8. Uso presente y futuro del lugar.
9. Datos meteorológicos y climatológicos tales como, vientos prevalecientes, precipitación pluvial, variaciones de temperatura y balance hídrico.
10. Datos sobre el suelo que incluyan: características litológicas, material de cobertura en el sitio o acarreo de otro lugar.
11. Movimiento de tierra, topografía modificada y geometría de detalle.
12. Definición de las características de los drenajes y subdrenajes.
13. Sistema de vialidad interna.
14. Infraestructura interna, tales como estacionamientos, mantenimiento de equipos y áreas administrativas.
15. Detalles de los sistemas de recolección y tratamiento de lixiviados, monitoreo de aguas subterráneas y drenaje de gases.

16. Detalle de la barrera vegetal y tratamiento paisajístico.

17. Dotación de los servicios básicos.

◆ **Referente a las Condiciones de Diseño y Construcción.**

- 1) Cota de fondo, por lo menos 5 m. encima del nivel freático más alto registrado en el sitio.
- 2) Impermeabilización, constituida por geosintéticos y por barreras naturales, que le den protección tanto al fondo como a las paredes de la celda, a fin de evitar la fuga de los líquidos.
- 3) Sistemas de drenajes y subdrenajes, que recolecten y canalicen las aguas superficiales, evitando la entrada de éstas al cuerpo del relleno.
- 4) Sistemas de control de migración, horizontal y vertical, de los gases que se generan en el interior del relleno.
- 5) Sistemas de recolección, tratamiento y evacuación de lixiviados.
- 6) Monitoreo de pozos, y evaluación periódica de la calidad de las aguas subterráneas y lixiviadas.
- 7) Poseer instalaciones destinadas al análisis de los desechos, a la

administración, al control peatonal y del acceso de vehículos, vigilancia y seguridad, primeros auxilios y otras requeridas por el ordenamiento legal vigente.

- 8) Estar dotado de los servicios de comunicación, emergencia, electricidad, agua potable e instalación de hidrantes para incendios, sistema de detección contra incendios de cualquier tipo de material.
- 9) Poseer buenas vías de acceso a diferentes tipos de vehículos.
- 10) Estación hidrometereológica para realizar mediciones de dirección y velocidad de los vientos, temperatura y pluviometría.
- 11) El área debe estar cercada natural o artificialmente en su totalidad a una distancia mínima de 50 mm del área activa.

◆ **Referente a la Recolección de Lixiviado establecida en la Legislación Venezolana.**

Se contempla un solo nivel de recolección de lixiviados de acuerdo a las siguientes características:

- 1) La capa de terreno arcilloso natural, debe tener un espesor mínimo de 1,5 m conformado por seis (6) capas de material previamente humedecido y compactado.

- 2) El terreno debe tener un coeficiente de permeabilidad inferior o igual a 10^{-9} m/s.
- 3) Ser calificado bajo el sistema A.A.S.H.O.
- 4) El porcentaje de paso a través del tamiz N° 200, debe ser mayor al 30% (Test A.S.T.M. D-1140 ó el equivalente en NORMAS COVENIN).
- 5) La plasticidad debe ser mayor o igual a 15 unidades (Test A.S.T.M. D-424) ó el equivalente en NORMAS COVENIN).
- 6) El pH ≥ 7 .
- 7) El sistema de recolección de lixiviados, debe colocarse sobre una geomembrana y estará localizado dentro de una capa de un material granulado, con una permeabilidad mayor o igual a 10^{-3} m/s. Sobre la capa permeable se colocará una capa sintética de geotextil M.A.R.N. R. (1998).

◆ **Referente al Sistema de Cobertura de los Rellenos Sanitarios.**

Para el diseño de cobertura, se señalan las siguientes características:

- 1) Se debe colocar, una capa de material granular de 20 cm de espesor, sobre los desechos depositados, a fin de facilitar el flujo de los gases.
- 2) Posteriormente, una capa de arcilla compactada de 60 cm de espesor y de permeabilidad menor o igual a 10^{-9} m/s.
- 3) Seguidamente una membrana de polietileno de alta densidad de 2,5 mm de espesor.
- 4) A continuación, una capa de material granular de 30 cm de espesor para el drenaje de las aguas de lluvia.
- 5) Por último, una capa de suelo vegetal de 50 cm de espesor, de una calidad tal que pueda sostener la vida vegetal, fundamentalmente gramíneas. La cobertura final del lugar debe tener una pendiente menor o igual a 30% M.A.R.N.R. (1998).

◆ **Referente a los Requerimientos de los Sistemas de Impermeabilización que Conformarán las Celdas de Seguridad, donde serán colocados los Desechos Peligrosos.**

A) CONDICIONES FÍSICO-QUÍMICAS

1. Las barreras impermeabilizantes, pueden ser construidas con: suelo natural, suelo cemento, cemento asfáltico, bentonita, entre otros o pueden ser membranas sintéticas.

2. La pendiente en toda su extensión, será de 2% a 5% orientada hacia el cuerpo de agua más cercano y deberá estar conectadas en su nivel más bajo con uno o más sistemas de recolección de lixiviados.
3. Cuando se use suelo natural, para la construcción de la barrera, éste debe cumplir con las siguientes condiciones.
 1. Estar constituido por un material, cuya constante de permeabilidad sea inferior o igual a 10^{-9} m/s.
 2. Ser calificado bajo el sistema A.A.S.H.O.,
 3. El porcentaje de paso a través del tamiz N° 200, debe ser mayor al 30% (Test A.S.T.M. D-1140 ó el equivalente en NORMAS COVENIN).
 4. La plasticidad, debe ser mayor o igual a 15 unidades (Test A.S.T.M. D-424) ó el equivalente en NORMAS COVENIN).
 5. El límite líquido, debe ser mayor o igual a 30 unidades (Test A.S.T.M. D-424) ó el equivalente en NORMAS COVENIN).
 6. El pH debe ser mayor o igual a 7

B) SISTEMAS DE IMPERMEABILIZACIÓN

Las condiciones de diseño son las siguientes:

1. Se debe colocar, un sistema de barreras impermeabilizantes de geosintéticos y un sistema de recolección de lixiviados, que queden retenidos en la superficie de cada sistema de barreras.
2. La primera barrera impermeabilizante del sistema, debe estar constituida por el suelo natural, de acuerdo a las condiciones especificadas anteriormente.
3. Las membranas geosintéticas de polietileno, de 2,5 mm de espesor, se instalarán en una fundación o base de soporte, que resista los gradientes de presión que pueden generarse por encima o por debajo de la membrana, previniendo el asentamiento, compresión o levantamiento eventual del terreno.
4. El sistema de recolección de lixiviados, se colocará sobre la membrana sintética, dentro de una capa de material granular, con permeabilidad mayor o igual 10^{-3} m/s. Sobre la capa granular se colocará un geotextil como filtro.

◆ **Referente al Plan de Manejo del Relleno Sanitario.**

- 1) Sistema o Método de Operación.
- 2) Horario de Operación.
- 3) Perfil del Personal de Técnico de acuerdo a los requerimientos.
- 4) Control de emergencias. Acciones a tomar.

◆ **Referente al Registro de los Desechos por el Operador.**

Todos los desechos que entran al relleno, quedan registrados en un libro con los siguientes datos:

- 1) Tipo de desecho, grado de peligrosidad y procedimiento.
- 2) Cantidad, peso y volumen.
- 3) Caracterización físico-química.
- 4) Si necesita tratamiento previo, donde se le hizo, nombre de la empresa donde fue tratado.
- 5) Ubicación en el plano de la celda donde se va a disponer.
- 6) Fecha de recepción y fecha de disposición.

7) Datos del que generó el desecho, nombre del conductor y nombre del operador.

◆ **Referente al Tipo de Desechos que no se Aceptan en el Relleno.**

1) Tipo de desecho, grado de peligrosidad y procedimiento.

2) Materiales radiactivos.

3) Materiales inflamables o reactivos, si no están tratados.

4) Desechos con $3 \geq \text{pH} \geq 10$.

5) Desechos peligrosos no tratados.

6) Residuos que ataquen a las membranas sintéticas.

7) Lodos biológicos no estabilizados.

◆ **PROCEDIMIENTOS**

1. Los desechos incompatibles, no podrán ser colocados en la misma celda, a menos que hayan sido tratados, eliminando su incompatibilidad.

2. Las aguas de lluvia y lavado, que hayan estado en contacto con la porción activa del relleno o con los materiales que vayan a disponer en ella, deberán ser recolectadas, analizadas y de ser necesario, tratadas de acuerdo con la normativa legal vigente sobre efluentes líquidos.
3. Al final de las labores diarias, los frentes de trabajos activos o celdas donde se este depositando desechos peligrosos, deben ser cubiertos adecuadamente, para que el agua de lluvia no penetre al interior del relleno.
4. Al llegar al término de la vida útil, la superficie debe ser sellada mediante un sistema de barreras.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. CONCLUSIONES

1. El diseño y construcción de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos, constituye una importante decisión por parte de la actual gerencia del Relleno Sanitario La Bonanza, debido a que no existe un lugar adecuado para la disposición final de este tipo de desechos provenientes de hospitales, laboratorios, industrias, y en algunos casos desechos de sustancias radioactivas.
2. Las características principales, de la Celda Específica Final de Desechos Tóxicos son las siguientes: estará enclavada en la ladera sur-oeste, en el llamado “Cerro de los Zamuros”, cuyo diseño es el denominado pie de cerro, tipo ladera, conformado su volumen mediante diques de soporte que irán modelando el perfil del talud original. Tendrá una capacidad promedio de 80.000 m³, para una vida útil de 4 ó 5 años, estimándose una demanda de 20.000 TN/año.

3. En el área, afloran dos tipos definidos de unidades metamórficas, pertenecientes a la Formación Las Mercedes del Grupo Caracas: Unidad de Esquistos Cuarzo Micáceos y Unidad de Esquistos Grafitosos Calcáreos.
4. El estudio cinemático del talud en roca indica que está en condición estable. Los análisis de la Proyección Hemisférica, el Cono de Fricción y la prueba de Markland, apoyan esta condición de estabilidad.
5. La estabilidad de los diques de soporte, constituidos por material de suelos residuales y arcillosos, compactados por maquinaria pesada, son estables con un factor de seguridad mínimo de 3,5 para un sólo dique y un valor de 1,9 para el total de cinco diques.
6. La ubicación de la Celda Específica Final para Desechos Tóxicos, se consideró de acuerdo a las ventajas ofrecidas por la alternativa N° 2, entre las cuales destacan: no quedar dentro de zona de fallas regionales, no interceptar cursos de drenajes, tener facilidad de acceso entre otras.

7. El revestimiento de la Celda Específica Final, contempla la impermeabilización de fondo, taludes y tope por medios materiales naturales y artificiales. Entre los naturales tenemos la mezcla del terreno con bentonita a ser colocada como base en el terreno natural y en cuanto a los artificiales estos están constituidos por geosintéticos como geomembranas, geotextiles, geomallas y geocompuestos.
8. El uso de los geosintéticos, depende del área donde van a ser utilizados, ya que poseen características diferentes. Algunos son permeables, otros impermeables y los llamados geocompuestos que resultan de una combinación permeable-impermeable.
9. De acuerdo a los estudios de permeabilidad, los materiales provenientes de la cota de fundación de la Celda Específica Final, se clasifican como poco permeables con la condiciones básicas de impermeabilidad que exigen las Normas del M.A.R.N.R.
10. Los lixiviados, producto de los líquidos y de la descomposición de la materia orgánica e inorgánica soluble de los desechos sólidos, son entrampados por barreras

permeables constituidas por geotextiles que actúan como filtros y por medio de barreras impermeables de geomembranas que retienen el líquido hasta ser canalizados por medio de tuberías, tipo Dren Francés hasta las piscinas de tratamiento del lixiviado.

11. Debido a la recolección y tratamiento de los lixiviados, y a la colocación adecuada de la cobertura a las capas de desechos en las celdas, los malos olores en las áreas adyacentes al relleno, han desaparecido en un alto porcentaje, así como también ha disminuido la cantidad de zamuros en el sector, lo cual representaba un gran peligro para las aeronaves que utilizan el Aeropuerto Caracas.
12. Actualmente, se realizan trabajos de monitoreo y control del relleno, así como la puesta en práctica de normas ambientales. El sistema de tratamiento de lixiviados se encuentra en etapa experimental y de acuerdo a los resultados que se obtengan del monitoreo a que está sometido, previa autorización del M.A.R.N.R., será vertido al cauce natural aguas abajo del relleno sanitario sin ningún peligro de contaminación de los acuíferos.

13. Hasta el momento, el diseño y operación del relleno se efectúa de acuerdo a la normativa legal vigente y debe considerarse que es la primera vez en Venezuela que un relleno sanitario se trabaja con tecnología utilizada a nivel mundial con un equipo de trabajo multidisciplinario

10.2. RECOMENDACIONES

1. El talud en roca, actualmente estable, será reperfilado y se recomienda efectuar bermas debido a las características de los esquistos
2. Las bermas, en el talud se deben hacer, una a los 15 m de altura aproximadamente, con un ancho de 7 m y otra al final del talud en el cambio de roca a suelo con un ancho de 10 m y tendrán una pendiente de 2,5:1 ó 3:1.
3. Los diques de soporte o cerramiento tendrán una inclinación o pendiente de 1:1 en la parte interior y 2:1 en la parte exterior.
4. Los diques de soporte, van a estar conformados por material arcilloso, de poca consistencia, compactados, por lo tanto tendrán tendencia a generar fallas circulares.

5. Los diques de soporte, deberán ser reforzados en las esquinas para evitar que cualquier esfuerzo proveniente del relleno interno cauce esfuerzos no previstos. Deben ser reforzados con geomallas del tipo trical o similar, en las esquinas en capas cada 40 cm. y con una longitud de 15 m a cada lado del eje de la esquina que forman los diques.
6. El fondo, los taludes y el tope de la Celda Específica Final, serán protegidos con geosintéticos. En primer lugar se colocará un geotextil, una membrana impermeable o geomembrana y una de geotextil, luego se colocarán cauchos o llantas desechados para evitar que los trabajos de compactación dañen las capas de impermeabilización de los taludes.
7. Se recomienda, colocar previo a la barrera de arcilla, un riego de bentonita que tendrá como función el sello de grietas y fracturas en la roca favoreciendo la impermeabilidad.
8. En los taludes, donde el corte de la superficie no sea uniforme y se muestren protuberancias, se recomienda colocar un friso de barro con cal, para eliminar las irregularidades y así evitar el punzonamiento de los

geosintéticos, también se puede colocar en vez de friso un geosintético del tipo geomembrana, lo suficientemente grueso que ejerza las mismas funciones que el friso.

9. Establecer un sistema de subdrenajes, en la Celda Específica Final, con tubos perforados que permita eliminar el posible flujo de aguas subterráneas o de manantiales que pudieran aflorar y descargar hacia la parte sur-oeste.
10. Los tubos perforados o ranurados, en la parte superior en forma horaria de 2 y 10 horas, y en la parte inferior en forma de 4 y 8 horas, colocados en el centro de la celda, con la misma pendiente longitudinal del fondo, deberán ser de 12” de diámetro, para garantizar una depresión que atraiga a los líquidos lixiviados.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ARCOS, M. (1990). “*Influencia del agua en la estabilización de taludes.*” Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- AGUERREVERE, P. I. y G. ZULOAGA. (1937). “*Observaciones geológicas en la parte central de la Cordillera de la Costa*”, Venezuela. Bol.Geol y Min., Caracas.
- BRICEÑO L, G. (1992). “*Caracterización físico-química del lixiviado del relleno sanitario La Bonanza y determinación de su efecto en algunas propiedades químicas del suelo.*” Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- CALVO T, V. y FIGUEREDO C, R. (1998). “*Ingeniería conceptual de rellenos de seguridad y su aplicación en Venezuela*”. Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- CASTILLEJO C, M. (1993). “*Análisis comparativo de los métodos de estabilidad de taludes y su control.*”. Dpto. De Minas, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Ascenso.

- CASTILLEJO C, M. (1996). "*Movimiento de masa y su mitigación*". Dpto. De Minas, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Ascenso.
- DE MARCO, P. (1994). "*Reconocimiento de suelos contaminados en áreas industriales*". Geomin C.A. Ingeniería de Consulta. XIII Congreso Venezolano de Geotecnia.
- DE MARCO, P. y HERNÁNDEZ F. (1979). "*Evaluación y análisis de algunos problemas de estabilidad de taludes en excavaciones en el Cerro Bolívar, Edo. Bolívar*". Dpto. de Minas, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- DENGO, G. (1951). "*Geología de la región de Caracas*". Bol. Geol. Venezuela.
- D'ESCRIVÁN G, E. (2000). "*Estudio geotécnico para verificación de suelos en el relleno sanitario La Bonanza*". Informe N° 944. Caracas.
- D'ESCRIVÁN G, E. (2000). "*Verificación de suelos y ensayos de permeabilidad in situ y en laboratorio*". Informe N° 946. Caracas.

- D'ESCRIVÁN G, E. (2000). “*Ensayos de permeabilidad in situ y laboratorio en el área de construcción de la Celda Específica para Desechos Tóxicos y Especiales*”. Informe N° 961. Caracas.
- DIMITRI, P. K. y JUDD, W. (1980). “*Principios de geología y geotecnia para ingenieros*”. Editorial. Omega, Madrid.
- GALAVIZ, A. (1994). “*Algunas técnicas para el tratamiento preventivo y correctivo de problemas relacionados con la contaminación y preservación del medio ambiente, así como en la disposición de desechos tóxicos*”. XIII Congreso Venezolano de Geotecnia. Caracas.
- GONZÁLEZ DE JUANA C., J. ITURRALDE DE A. y X. PICARD. (1980). “*Geología DE Venezuela Y sus Cuencas Petrolíferas*”. Caracas, Ed. Foninves, Tomos I y II. 1021 p.
- HERRERA, A. (1985). “*Análisis de las aplicaciones de geotextiles efectuados en Venezuela*”. Dpto. de Civil, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- HERRERA, J. (1999). “*Análisis comparativo de soluciones geotécnicas en estabilización de taludes en el área metropolitana*”. Dpto. de Minas, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

- HOEK, E y BRAY, J. W. J. (1981). "***Rock Slope Engineering***". 3^{ra}. Edition. Institute of Mining and Metallurgy. London. 358p.
- KÉZDI, A. (1975). "***Manual de la Mecánica de Suelos***". Tomo I. Ediciones de la Biblioteca de la U.C.V. Caracas. 264p.
- KOERNER, R. (1981). "***Designing with Geosynthetics Slope Engineering***". Prentice Hall, New Jersey.
- KOERNER, R. (1987). "***Construction and Geotechnical Engineering Using Synthetics Fabrics***". Editorial John Wiley and sons. New York. 527p.
- LAMBE, W. y WHITMAN, R. (1981). "***Mecánica de suelos***". Editorial Limusa, México, 1^{ra}. Edición.
- M.A.R.N.R. (1997). "***Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos***". *Gaceta Oficial de la República de Venezuela, N° 5212, Extraordinario.*
- MORALES C, M. (1993). "***Criterios geológicos para la selección de ubicación de un relleno sanitario***". Dpto. de Geología, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

- RAMBALDO, M. (1985). “*Aplicación de membranas geotextiles a drenajes y subdrenajes*”. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- RAMIREZ G, N y D’ESCRIVAN G, E. (2000). “*Influencia de la geología de la zona de “La Bonanza”, Formación las Mercedes en la permeabilidad de suelos y rocas con los lixiviados del relleno sanitario*”. Dpto. De Minas, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- RAMÍREZ O, P. (1980). “*Estabilidad de Taludes en Rocas Competentes*”. Fundación Gómez Pardo. Servicio de Publicaciones. Madrid, 340p.
- RIVAS, P. (1987). “*Análisis y diseño de estabilidad de los taludes afectados de la terraza L, sector C de la Urb. Nueva Tacagua, Parroquia Sucre*”. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.
- RICO R, A. (1986). “*La ingeniería de suelos en las vías terrestres*”. Vol. I. Editorial Limusa., México.

RODRIGUEZ, A. (1990). *“Estudio y comparación de proyectos del sistema de canalización de las aguas superficiales y del lixiviado en el relleno sanitario La Bonanza”*. Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado. Inédito.

SABINO, C. A. (1993). *“Cómo hacer una tesis”*. Editorial Panapo, 2^{da}. Edición. Caracas.

SALCEDO, D. (1981). *“Taludes en macizos rocosos, Introducción a la técnica de las proyecciones hemisféricas”*. Geomec, Boletín de divulgación geotécnica N° 5, Laboratorio de Mecánica de Rocas, Escuela de Minas, U.C.V.

SALCEDO, D. (1981). *“Taludes en macizos rocosos, Metodologías con las proyecciones hemisféricas”*. Geomec, Boletín de divulgación geotécnica N° 6, Laboratorio de Mecánica de Rocas, Escuela de Minas, U.C.V.

SALCEDO, D. (1986). *“Suelos reforzados con geotextiles, diseño y comportamiento”*. Segundas Jornadas de Inspección de obras. Caracas.

SEIDERS, V. M. (1965). *“Geología de Miranda Central”*. Venezuela. Bol. Geol. Caracas.

- TALUKDAR, S y D. LOUREIRO. (1982). ***“Geología de una zona ubicada en el segmento norcentral de la Cordillera de la Costa: Metamorfismo y Deformación. Evolución del margen septentrional de Suramérica en el marco de la tectónica de placas”***. Venezuela. Revista GEOS. Caracas.
- TREJO, R. (1999). ***“Procesamiento de la Basura Urbana”***. Editorial Trillas. México. 300p.
- URBANI, F. (1969). ***“Mineralogía de algunas calizas en la parte central de La Cordillera de la Costa”***. Boletín Informativo de la Asociación Venezolana de Geología, Mineralogía y Petrología.
- URBANI, F. (1997). ***“Un resumen de las Unidades de Rocas Ígneas y Metamórficas de La Cordillera de la Costa”***. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Caracas.
- WEHRMANN, M. (1972). ***“Geología de la región de Guatire-Colonia Tovar”***. IV Congreso de Geología. Caracas.