

Prefactibilidad técnica de un vertedero controlado de alta densidad para la ciudad de Antofagasta, Chile

II PREMIO AL MEJOR TRABAJO CIENTÍFICO SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
UNIA - RESUR 2007

Juan Antonio Munizaga Plaza



Prefactibilidad técnica de un vertedero controlado de alta densidad para la ciudad de Antofagasta, Chile

II PREMIO AL MEJOR TRABAJO CIENTÍFICO SOBRE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS
UNIA - RESUR 2007

Juan Antonio Munizaga Plaza

Prefactibilidad técnica de un vertedero controlado de alta densidad para la ciudad de Antofagasta

EDITA

Universidad Internacional de Andalucía.

AUTOR

Juan Antonio Munizaga Plaza, Ingeniero Civil U.C.N.

MAQUETACIÓN Y DISEÑO:

Ricardo Barquín Molero | cosmonauta.org

FECHA

Enero de 2009.

ISBN

978-84-7993-073-8 (versión papel)

COPYRIGHT DE LA PRESENTE EDICIÓN

Universidad Internacional de Andalucía.

COPYRIGHT

El autor.

Edición de 500 ejemplares.

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA

Monasterio de la Cartuja. Calle Américo Vespucio, 2.
Isla de la Cartuja. 41092 Sevilla

www.unia.es

Índice

0. RESUMEN .18

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .22

2. CAPÍTULO II: ANTECEDENTES GENERALES .26

2.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS .28

- 2.1.1 Clasificación por origen de los residuos sólidos urbanos .29
 - 2.1.1.1 Residuos sólidos domiciliarios (RSD) .29
 - 2.1.1.2 Residuos industriales .29
 - 2.1.1.3 Residuos de hospitales y consultorios .30
 - 2.1.1.4 Residuos de barrido .30
 - 2.1.1.5 Residuos de escombros .30
- 2.1.2 Criterios para la clasificación según peligrosidad .31
 - 2.1.2.1 Residuos peligrosos .31
 - 2.1.2.2 Residuos inertes .31
 - 2.1.2.3 Residuos no inertes .31
- 2.1.3 Características de los RSD en Chile .31
 - 2.1.3.1 Composición de los RSD en la Región Metropolitana .33

2.2 INSTITUCIONALIDAD Y GESTIÓN AMBIENTAL DE RSD EN CHILE .35

- 2.2.1 Institucionalidad nacional .35
- 2.2.2 Institucionalidad regional .36
- 2.2.3 Institucionalidad local .37
- 2.2.4 Otras entidades públicas .38

2.3 SISTEMA DE MANEJO Y GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS .38

- 2.3.1 Sistema de gestión integral de RSD .38
- 2.3.2 Jerarquía de manejo de RSD .41
 - 2.3.2.1 Evitar .41
 - 2.3.2.2 Minimizar .41
 - 2.3.2.3 Tratar o transformar .43
 - 2.3.2.4 Disponer .43

2.4 INGENIERÍA DE VERTEDEROS SANITARIOS .45

- 2.4.1 Tipos de disposición final .45
 - 2.4.1.1 Vertedero incontrolado de residuos .45
 - 2.4.1.2 Vertedero sanitario controlado (relleno sanitario) .46
 - 2.4.1.3 Vertedero controlado de alta densidad .47
 - 2.4.1.4 Incineración .48
- 2.4.2 Proceso de descomposición de residuos .50
 - 2.4.2.1 Reacciones biológicas .50
 - 2.4.2.2 Reacciones químicas .51
 - 2.4.2.3 Reacciones físicas .51

2.4.3	Generación de biogás	.52
2.4.3.1	Composición y características del biogás en vertederos sanitarios	.53
2.4.3.2	Factores que afectan la producción de biogás en vertederos sanitarios	.54
2.4.3.3	Método actual de extracción de biogás en Chile	.55
2.4.4	Control de líquidos lixiviados o percolados	.56
2.4.4.1	Tratamiento del líquido lixiviado	.58
2.4.5	Ejecución y tratamientos aplicados al vertedero sanitario	.59
2.4.5.1	Tratamiento por digestión anaeróbica	.59
2.4.5.2	Tratamiento por digestión aeróbica	.60
2.4.5.3	Tratamiento por digestión semi-aerobia	.61
2.4.5.4	Tratamiento biológico	.61
2.4.6	Dimensionamiento del vertedero sanitario	.62
2.4.6.1	Cantidad y tipología de los residuos a ser dispuestos	.62
2.4.6.2	Características fisiográficas y ambientales	.62
2.4.6.3	Uso futuro del área del vertedero sanitario	.62
2.4.7	Componentes del proyecto	.63
2.4.7.1	Sistema de tratamiento de los residuos a ser dispuestos	.63
2.4.7.2	Sistema de tratamiento de la base	.64
2.4.7.3	Sistema de operación	.64
2.4.7.4	Sistema de cobertura	.67
2.4.7.5	Sistema de drenaje de aguas pluviales	.68
2.4.7.6	Sistema de drenaje de líquidos lixiviados	.68
2.4.7.7	Sistema de recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados	.68
2.4.7.8	Sistema de drenaje de la base	.69
2.4.7.9	Sistema de drenaje de gases	.69
2.4.7.10	Sistema de tratamiento de gases	.69
2.4.7.11	Análisis de estabilidad taludes y de residuos sólidos	.70
2.4.7.12	Sistema de monitoreo	.70
2.4.7.13	Cierre final del vertedero controlado	.71
2.4.8	Procedimientos de operación del vertedero sanitario	.71
2.4.9	Cuidados durante la operación del vertedero sanitario	.72
2.4.10	Cierre y sellado del vertedero sanitario	.73
2.4.11	Rehabilitación de áreas utilizadas como vertederos sanitarios	.73
2.4.12	Principales experiencias internacionales sobre rehabilitación de áreas utilizadas como vertederos controlados	.74
2.4.13	Experiencias en Chile sobre inserción de vertederos controlados e incontrolados	.75
2.4.14	Disposición ilegal de residuos sólidos	.78

3. CAPÍTULO III: ANTECEDENTES ESPECÍFICOS .80

3.1 DISPOSICIÓN FINAL EN LA CIUDAD DE ANTOFAGASTA .82

3.2 PROBLEMÁTICA Y RAZONES DE CIERRE DEL VERTEDERO LA CHIMBA .84

3.3 ASPECTOS PRELIMINARES PARA UBICACIÓN DE UN NUEVO VERTEDERO SANITARIO DE RSD Y ASIMILABLES PARA ANTOFAGASTA .86

4. CAPÍTULO IV: CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR	.90
4.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	.91
4.2 ANTECEDENTES DEMOGRÁFICOS	.95
4.2.1 Proyección poblacional de Antofagasta 2007 - 2037	.95
4.3 CLIMA Y METEOROLOGÍA	.96
4.3.1 Clasificación climática	.96
4.3.2 Parámetros meteorológicos	.99
4.3.2.1 Temperatura media	.99
4.3.2.2 Humedad relativa	.100
4.3.2.3 Evaporación	.101
4.3.2.4 Velocidad del viento	.102
4.3.2.5 Precipitaciones	.103
4.4 HIDROLOGÍA	.105
4.4.1 Características hidrológicas de la cuenca	.107
4.4.1.1 Parámetros de forma	.107
4.4.1.2 Parámetros relacionados con el drenaje	.108
4.4.1.3 Parámetros relacionados con el relieve	.110
4.4.1.4 Pendiente media del cauce principal	.112
4.4.1.5 Análisis de resultados	.114
4.4.2 Precipitaciones máximas	.115
4.4.2.1 Tiempo de concentración	.116
4.4.2.2 Coeficiente de escorrentía	.118
4.4.2.3 Caudales máximos instantáneos	.118
4.5 HIDROGEOLOGÍA	.122
4.5.1 Unidades Hidrogeológicas	.122
4.5.1.1 Depósitos aluviales y coluviales	.122
4.6 GEOMORFOLOGÍA LOCAL	.122
4.7 GEOLOGÍA LOCAL	.124
4.7.1 Marco tectónico	.126
4.7.2 Sistema de Fallas de Atacama (SFA)	.127
4.8 SISMOLOGÍA LOCAL	.129
4.9 MECÁNICA DE SUELOS	.129
4.9.1 Exploración del subsuelo	.129
4.9.1.1 Estratigrafía	.129
4.9.1.2 Ensayos	.132
4.9.2 Análisis de resultados	.133

- 4.9.2.1 Clasificación .133
 - 4.9.2.2 Relación densidad - humedad .135
 - 4.9.2.3 Capacidad de soporte .135
 - 4.9.2.4 Permeabilidad .141
-

5. CAPÍTULO V: MARCO NORMATIVO .144

- 5.1 NORMAS VIGENTES .146
 - 5.2 NORMAS EN PROYECTO .149
-

6. CAPÍTULO VI: CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .152

- 6.1 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN ANTOFAGASTA .154
 - 6.2 COMPOSICIÓN DE RSD .156
 - 6.3 PROYECCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS 2007 - 2037 .158
-

7. CAPÍTULO VII: PREDISEÑO O DE INGENIERÍA BÁSICA .162

- 7.1 ELECCIÓN DEL MÉTODO DE DISPOSICIÓN FINAL .164
 - 7.1.1 Descripción del sistema de vertido de alta densidad (HD) .164
- 7.2 CAPACIDAD DE LA CUENCA Y PROYECCIÓN DE NIVELES FINALES .168
- 7.3 PREPARACIÓN DE TERRENOS .172
 - 7.3.1 Infraestructura de apoyo .172
 - 7.3.2 Distribución de terrazas .173
 - 7.3.3 Material de cobertura intermedia de pilas .175
- 7.4 ESTUDIO DE GENERACIÓN DE LÍQUIDO PERCOLADO, SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL .177
 - 7.4.1 Balance de agua .177
 - 7.4.2 Diseño del sistema de impermeabilización de fondo .178
 - 7.4.3 Manejo de escorrentías superficiales .180
- 7.5 ESTUDIO DE CANTIDAD DE BIOGÁS GENERADO, SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL .180
- 7.6 PLAN DE CIERRE Y ABANDONO .183
 - 7.6.1 Mantenimiento posclausura .184
 - 7.6.2 Uso final .185
- 7.7 COSTOS INVOLUCRADOS .185

8. CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES .188

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .195

ANEXO A: DATOS METEOROLÓGICOS .200

ANEXO B: PROYECCIÓN POBLACIONAL COMUNA DE ANTOFAGASTA .207

ANEXO C: ESTRATIGRAFÍA Y CAPACIDAD DE SOPORTE .219

Índice de tablas

CAPÍTULO II

- Tabla 2.1: Generación mensual de RSD por región en Chile .32
- Tabla 2.2: Evolución de la composición de los RSD en la Región Metropolitana .34
- Tabla 2.3: Variación estacional y nivel socioeconómico en la composición de los RSD .35
- Tabla 2.4: Composición típica de biogás en vertederos sanitarios .54
- Tabla 2.5: Ventajas del proceso aeróbico .60

CAPÍTULO IV

- Tabla 4.1: Coordenadas UTM del sector Alto Portezuelo .93
- Tabla 4.2: Población total, hombres y mujeres en la comuna de Antofagasta .95
- Tabla 4.3: Estaciones Meteorológicas y caracterización del registro .99
- Tabla 4.4: Registro de precipitaciones en promedio mensual y anual .103
- Tabla 4.5: Orden de los cursos y longitudes .108
- Tabla 4.6: Resumen cálculo de pendiente por cota en el cauce principal .113
- Tabla 4.7: Precipitaciones máximas en 24 hrs .115
- Tabla 4.8: Tiempo de concentración de la cuenca .117
- Tabla 4.9: Coeficiente de escorrentía de la cuenca para $T_c = 10$ años .118
- Tabla 4.10: Coeficiente de escorrentía .118
- Tabla 4.11: Caudales máximos instantáneos, utilizando método SCS .120
- Tabla 4.12: Caudales máximos instantáneos, utilizando coeficiente de escorrentía .121
- Tabla 4.13: Coeficiente de uniformidad y curvatura .134
- Tabla 4.14: Relación de humedad-densidad .135
- Tabla 4.15: Densidad in situ .135
- Tabla 4.16: Densidad máxima y mínima .135
- Tabla 4.17: Valores de ángulo de fricción interna efectiva .138

CAPÍTULO VI

- Tabla 6.1: Generación detallada de residuos sólidos urbanos en 2005 y 2006 .154
- Tabla 6.2: Resumen generación de residuos sólidos urbanos en Antofagasta .156
- Tabla 6.3: Caracterización por componente de RSD y comerciales .156
- Tabla 6.4: Caracterización por componente de residuos asimilables .158
- Tabla 6.5: Proyecciones de residuos sólidos generados en Antofagasta entre 2007-2037 .160

CAPÍTULO VII

- Tabla 7.1: Especificaciones técnicas de producción de balas de RSD y asimilables .168
- Tabla 7.2: Comparación vida útil Alto Portezuelo para cada método de disposición final .170
- Tabla 7.3: Movimiento de tierra mediante volúmenes de corte compensado para etapa 1 .175
- Tabla 7.4: Movimiento de tierra mediante volúmenes de corte compensado para etapa 2 .175
- Tabla 7.5: Volumen de cobertura y de residuos dispuestos para etapa 1 .177
- Tabla 7.6: Volumen de cobertura y de residuos dispuestos para etapa 2 .177
- Tabla 7.7: Balance hídrico para el cálculo de producción de lixiviados .178
- Tabla 7.8: Costo planta de tratamiento (prensa y equipos) .185
- Tabla 7.9: Costo de operación anual (media 175.370 ton/año) .186
- Tabla 7.10: Costos asociados etapa 1 .186
- Tabla 7.11: Costos asociados etapa 2 .186
- Tabla 7.12: Costos totales .186

Índice de figuras

CAPÍTULO II

- Figura 2.1: Generación mensual de RSD por región en Chile .32
- Figura 2.2: Esquema de sistema de manejo de RSD .39
- Figura 2.3: Instalaciones de “Ñuñoa recicla”, Ñuñoa, Santiago .42
- Figura 2.4: Instalaciones de “Punto limpio”, Vitacura, Santiago .43
- Figura 2.5: Jerarquía de manejo de RSD .44
- Figura 2.6: Vertedero incontrolado de residuos .45
- Figura 2.7: Vertedero controlado de Meruelo, Región de Cantabria, España .46
- Figura 2.8: Vertedero sanitariamente controlado de alta densidad .47
- Figura 2.9: Ensayo de bala expuesta a la intemperie entre 1993 y 2001, Cantabria, España .48
- Figura 2.10: Fases de producción de biogás en un vertedero sanitario .53
- Figura 2.11: Balance de agua en un vertedero sanitario .57
- Figura 2.12: Método de trinchera .65
- Figura 2.13: Método de rampa .65
- Figura 2.14: Método de área .66

CAPÍTULO III

- Figura 3.1: Ubicación vertedero municipal respecto a la ciudad de Antofagasta .82
- Figura 3.2: Vertedero municipal La Chimba, Antofagasta .83
- Figura 3.3: Frente de operaciones, vertedero municipal La Chimba .83
- Figura 3.4: Vertedero municipal respecto al sector de La Chimba .86

CAPÍTULO IV

- Figura 4.1: Mapa descriptivo de la Región de Antofagasta .92
- Figura 4.2: Imagen satelital de Antofagasta y ubicación área en estudio .93
- Figura 4.3: Imagen satelital de Antofagasta (vista oriente del área en estudio) .94
- Figura 4.4: Imagen satelital de Antofagasta (vista poniente del área en estudio) .94
- Figura 4.5: Proyección poblacional de Antofagasta (2007 - 2037) .96
- Figura 4.6: Convergencia y divergencia en superficie y altura .97
- Figura 4.7: Clasificación climática modificada de Köppen para la Región de Antofagasta .98
- Figura 4.8: Gráfico de temperatura media .100
- Figura 4.9: Gráfico de humedad relativa .101
- Figura 4.10: Gráfico de evaporación media .102
- Figura 4.11: Gráfico de precipitaciones en promedio mensual .104
- Figura 4.12: Gráfico de precipitaciones en promedios mensuales .104
- Figura 4.13: Límites de horas hidrográficas de Antofagasta y alrededores .105
- Figura 4.14: Área en estudio de Alto Portezuelo .106
- Figura 4.15: Cursos dentro de la cuenca .108
- Figura 4.16: Curva hipsométrica de la cuenca .110
- Figura 4.17: Rectángulo equivalente de la hoya en estudio .111
- Figura 4.18: Gráfico de pendientes por cada 10 m de altitud del cauce principal .112
- Figura 4.19: Perfil geográfico del cauce principal .113
- Figura 4.20: Perfil geográfico del cauce principal por ordenes de cauce .113
- Figura 4.21: Pendientes del cauce principal por ordenes de cauce .114

- Figura 4.22: Precipitaciones máximas en 24 horas, estación meteorológica UCN .116
- Figura 4.23: Hidrograma unitario triangular .119
- Figura 4.24: Perfil longitudinal de sección central de la cuenca .123
- Figura 4.25: Vista panorámica respecto al poniente de la cuenca .124
- Figura 4.26: Unidades del área en estudio, según Carta Antofagasta y Punta Tetas .124
- Figura 4.27: Columna estratigráfica generalizada del área en estudio .126
- Figura 4.28: Sistema de Fallas de Atacama .127
- Figura 4.29: Fallas cercanas al área en estudio .128
- Figura 4.30: Distribución de calicatas en el área en estudio .130
- Figura 4.31: Cara lateral de calicata n°10 .131
- Figura 4.32: Cara lateral de calicata n°15 .132
- Figura 4.33: Ensayo de densidad in situ, cono de arena .132
- Figura 4.34: Prueba de infiltración, método doble anillo .133
- Figura 4.35: Curvas de distribución de tamaños de partículas para muestra 1 y 2 .134
- Figura 4.36: Envolvente de falla para esfuerzo cortante máximo .136
- Figura 4.37: Envolvente de falla para esfuerzo cortante crítico o residual .137
- Figura 4.38: Gráfica de ángulo de fricción vs. deformaciones de suelo M1 .139
- Figura 4.39: Gráfica de cohesión efectiva vs. deformaciones de suelo M1 .139
- Figura 4.40: Gráfica de ángulo de fricción vs. deformaciones de suelo M2 .140
- Figura 4.41: Gráfica de cohesión efectiva vs. deformaciones de suelo M2 .140

CAPÍTULO VI

- Figura 6.1: Comparación mensual de RSD y asimilables generados en año 2005 y 2006 .154
- Figura 6.2: Caracterización por componentes de residuos domiciliarios .155
- Figura 6.3: Caracterización por componentes de residuos comerciales .157
- Figura 6.4: Caracterización por componentes de residuos asimilables .157

CAPÍTULO VII

- Figura 7.1: Planta de tratamiento de residuos sólidos de Meruelo, España .165
- Figura 7.2: Transporte de balas de alta densidad .165
- Figura 7.3: Colocación de balas de Alta densidad .166
- Figura 7.4: Vista panorámica de un vertedero de alta densidad .167
- Figura 7.5: Modelación tridimensional de la cuenca de Alto Portezuelo .168
- Figura 7.6: Proyección de residuos sólidos generados en Antofagasta al 2037 .169
- Figura 7.7: Área de disposición final de balas de alta densidad .171
- Figura 7.8: Contornos finales vertedero controlado de alta densidad .172
- Figura 7.9: Perfil longitudinal de terrazas, sector etapa 1 .173
- Figura 7.10: Perfil longitudinal de terrazas, sector etapa 2 .173
- Figura 7.11: Distribución en planta de terrazas .174
- Figura 7.12: Área de empréstito, sector poniente cuenca de Alto Portezuelo .176
- Figura 7.13: Sistema de impermeabilización de fondo .179
- Figura 7.14: Recomendación para la instalación de las láminas de HDPE sobre la base .179
- Figura 7.15: Generación en el tiempo de CO₂ y metano .181
- Figura 7.16: Chimenea con tubo de hormigón perforado para drenaje pasivo de biogás .182
- Figura 7.17: Chimenea con tambor para drenaje pasivo de biogás .182
- Figura 7.18: Componentes típicos que constituyen una cobertura final de vertedero .183

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer enormemente todo el amor, apoyo y sacrificio que han hecho mis padres por brindarme la educación y valores que me han formado como persona y profesional. Agradezco también a mi hermana Judith, tíos Elena y Luís Alberto por el continuo cariño y preocupación que me han entregado a lo largo de mi vida.

Gracias a tíos Patricio y Mary, amigos: Gustavo y Betty, Ignacio Mora, Cristian Tambley, Ricardo Lau, Juan Moya, German Cernadas, Rafael Rodríguez, Hernán Rojas, Carolina González, Eliana Varas, Paola Galleguillos e innumerables personas que en este incansable recorrido estuvieron presente entregándome consejos y alegrías.

Agradezco el conocimiento y apoyo logístico, otorgados por los señores: Manuel Aguilera, Jimmy Miranda y personal de LIEMUN. Agradezco la desinteresada colaboración de los académicos de Ciencias Físicas, señores: Orlayer Alcayaga, Carlos Espinosa y Jorge Araya por sus conocimientos meteorológicos y además a los académicos, señores: José Echevarría, Nelson Alarcón y Alex Covarrubias por sus aportes de ingeniería.

Finalmente, deseo expresar un especial agradecimiento a mi profesora guía Dra. Esther Norton, que me permitió desarrollar un tema innovador de Ingeniería Civil aplicado al medio ambiente, dirigiendo, apoyando y fortaleciendo mis conocimientos de ingeniería. Agradezco también el gran aporte que han realizado mis profesores adjuntos Dr. Gabriel Álvarez de la UA y Dr. Marcel Szantó de la PUCV, que con su vasta experiencia en proyectos de Ingeniería y medio ambiente brindaron las directrices para el desarrollo de esta investigación.

“En este siglo de progreso, con el conocimiento que tenemos sobre química y con la maquinaria más completa a nuestra disposición, me parece un paso hacia a la barbarie destruir estos valiosos materiales con el simple objetivo de deshacernos de ellos, mientras al mismo tiempo nos desesperamos por obtener esos mismos materiales extrayéndolos de otras fuentes.”

Bruno Terne, Químico, 1893.

“The utilization of garbage”

American Architect and Building News (Sept. 23, 1893), pp. 185-86



Resumen

En la presente memoria se analiza la prefactibilidad técnica del sector de Alto Portezuelo para la disposición final de residuos sólidos domiciliarios y asimilables.

De acuerdo a los estudios de ingeniería realizados en el sector y a las proyecciones de volúmenes de residuos sólidos generados en la ciudad, se determina la implementación de un vertedero controlado de alta densidad, como alternativa a la disposición de residuos que se realiza en los vertederos sanitarios convencionales.

Este sistema de vertido incorpora una planta de tratamiento donde se realiza el proceso de segregación, clasificación y reciclaje de un 20% sobre la fracción orgánica e inorgánica de residuos ingresados, quedando excluidos los residuos peligrosos o industriales no asimilables.

Los residuos que no son reciclados (residuos de rechazo), son comprimidos en prensas a una densidad de 1000 kg/m³, obteniéndose poliedros regulares o balas de alta densidad para su posterior transporte y disposición en pilas sobre terrazas o plataformas de tierra, previamente compactadas y estabilizadas con sistemas de impermeabilización de HDPE y chimeneas de migración pasiva de biogás.

Finalmente, se realiza una estimación aproximada en valor presente de los costos asociados a la implementación de la planta de residuos sólidos y en la construcción, operación y cierre del vertedero controlado de alta densidad.



1. Introducción

Debido a los efectos que está provocando el calentamiento global y los cambios climáticos que han afectado a cada una de las latitudes de nuestro planeta, se ha generado una preocupación en los países por implementar nuevas políticas ambientales planteadas para disminuir la producción de gases de efecto invernadero y la aplicación de mecanismos de desarrollo limpio, que priorizan la minimización y fomentan la protección de los recursos renovables disponibles para las nuevas generaciones.

Es por esta razón fundamental, que la aplicación de la filosofía de las 4R: reducción, recuperación, reutilización y reciclaje de residuos, cobra vital importancia para aliviar la presión ejercida sobre los recursos renovables y de esta forma, disminuir el consumo de energía necesaria para generar nuevos productos.

Por lo tanto, el manejo, aplicación y control de un adecuado sistema de gestión de residuos sólidos urbanos, desde la generación a la disposición final de estos, son las herramientas esenciales que necesita una ciudad para lograr cambios culturales importantes en la población para disminuir los volúmenes de residuos producidos.

La presente investigación, tiene como objetivo general dar a conocer al lector cual son los diferentes conceptos, términos y elementos que forman parte de la gestión de residuos sólidos urbanos y los sistemas de ingeniería aplicados a su disposición final.

Además, presenta la situación actual de la gestión de residuos sólidos domiciliarios en Chile y particularmente, en la ciudad de Antofagasta, identificando las deficiencias del sistema de vertido, analizando las características y proyecciones de los volúmenes de residuos en el tiempo.

Como objetivo principal, se busca determinar si el sector de Alto Portezuelo cumple con la prefactibilidad técnica para la construcción de un nuevo vertedero sanitario controlado, para disponer los residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados por la ciudad de Antofagasta, proponiendo a su vez, un sistema innovador e integral de disposición final adecuado para zonas áridas garantizando el cuidado del medio ambiente y bienestar sanitario de la población.

De acuerdo a lo expuesto, se requiere analizar las características del lugar elegido por la Ilustre Municipalidad de Antofagasta, aplicando distintas especialidades de ingeniería y de esta forma proponer el prediseño de un vertedero controlado y sus costos aproximados de construcción, operación y cierre.



2. Antecedentes generales

2.1 Generación de residuos sólidos urbanos

Chile, así como todos los países que han entrado en un acelerado proceso de desarrollo económico y crecimiento poblacional, presenta una gran concentración de su población en áreas urbanas consolidadas y otras en proceso de consolidación. Debido a esto, sus habitantes demandan una infraestructura urbana y servicios públicos adecuados, que por lo general, son insuficientes para todas las necesidades de su población.

Una de las manifestaciones de este fenómeno urbano, es la producción de desechos domiciliarios la que producto del aumento de los niveles de vida de la población, del cambio en los patrones de consumo y de una cultura de producción que privilegia lo desechable por sobre lo retornable, presenta un incremento sostenido de los volúmenes y complejidad de sus residuos, transformándose en un problema para las instituciones encargadas de su manejo.

Según la Environmental Protection Agency (EPA), el concepto de residuos sólidos comprende a toda basura, desperdicio, lodos u otro material que se descarta (incluyendo sólidos, semisólidos, líquidos y materiales gaseosos en recipientes).

En términos generales, la descarga indiscriminada de residuos sólidos puede originar riesgos para la comunidad y su entorno que se traducen en contaminación de aguas superficiales y subterráneas, de los suelos y de la atmósfera, deterioro del paisaje, proliferación de roedores, insectos, etc. Por estos motivos, los residuos sólidos deben ser vertidos en terrenos adecuados (vertederos sanitarios controlados y vertederos autorizados) o bien desarrollar tecnologías que permitan aprovecharlos como materiales energéticos (combustibles alternativos) o a través del reciclaje como fuente de materias primas.

Para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), de acuerdo con el Proyecto de Reglamento de Rellenos Sanitarios (2003), los define como: “Residuos sólidos, basura, desechos o desperdicios a sustancias, elementos u objetos que el generador elimina, se propone eliminar o está obligado a eliminar”, determinando la pertenencia y responsabilidad de quien genera. Además, especifica a los residuos sólidos domiciliarios (RSD) como “basuras o desperdicios sólidos generados en viviendas y en establecimientos tales como edificios habitacionales, locales comerciales, locales de expendio de alimentos, hoteles, establecimientos educacionales y cárceles”, dando a conocer en esta definición una clasificación por fuente de origen.

La cantidad de residuos producidos en una comunidad tiene directa relación con el número de habitantes, sus costumbres, los productos que consumen y las ocupaciones a que se dedican. Pero en general, cada persona produce en promedio cerca de un kilogramo diario de desechos (Ministerio de Salud, 2007).

Los desechos domiciliarios comúnmente son llamados basura, por tratarse de materiales aparentemente sobrantes, que no se necesitan, ya que han sido usados

en actividades previas y por lo tanto, son considerados inservibles. Sin embargo, esta noción ha cambiado y hoy se habla de residuos, por tratarse de subproductos que podrían adquirir valor en sí mismo a través de prácticas como el reciclaje.

Debido a esto, en el desarrollo de esta investigación se le denominará residuos, respetando la denominación conceptual correcta.

2.1.1 Clasificación por origen de los residuos sólidos urbanos

Se adoptará la clasificación por su origen, es decir, residuos sólidos domiciliarios, residuos industriales, residuos de hospitales y consultorios, residuos de barrido y escombros. La descripción de estos tipos de residuos se presenta a continuación.

2.1.1.1 Residuos sólidos domiciliarios (RSD)

Los residuos sólidos domiciliarios son aquellos que se generan en las viviendas, oficinas, establecimientos educacionales, así como en hoteles, bancos, supermercados, locales comerciales y restaurantes.

Por su origen, estos residuos se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos. Los orgánicos son biodegradables, es decir, tienen la capacidad de fermentar y ocasionan procesos de descomposición. Aunque la naturaleza los puede aprovechar como parte del ciclo natural de la vida, cuando se acumulan posibilitan la multiplicación de microbios y plagas, convirtiéndose en potenciales fuentes de contaminación de aire, agua y suelo.

Por otro lado, los residuos inorgánicos se componen de desechos como latas, botellas, metales, plásticos y otros productos de uso cotidiano de origen industrial, los cuales tardan mucho tiempo en desintegrarse o nunca se descomponen, y por ello se les llama no biodegradables. Estos desechos pueden ser reutilizados o reciclados, reinsertándolos como insumos para nuevos procesos productivos, de lo contrario, éstos deberán tener tratamientos especiales para su disposición. Para los residuos sólidos que provienen de una fuente de origen distinta y presentan características similares a los generados dentro de los hogares, se les denominará residuos asimilables.

2.1.1.2 Residuos industriales

Son todos los residuos sólidos, semisólidos o líquidos, originados por cualquier proceso u operación industrial que no vayan a ser reutilizado, recuperado o reciclado en el mismo establecimiento industrial. Se incluyen en esta definición los residuos o productos de descarte, sean éstos líquidos o gaseosos. Estos residuos son bastante variados y pueden estar constituidos por cenizas, lodos, aceites, plásticos, papeles, maderas, fibras, gomas, metales, escorias, vidrios y cerámicas, materias primas y productos no aptos para el uso, etc.

2.1.1.3 Residuos de hospitales y consultorios

Son los residuos producidos por los servicios de salud, tales como: hospitales, clínicas, consultorios, laboratorios, farmacias, clínicas veterinarias, etc., están diferenciados por:

Residuos comunes: papeles, restos de la preparación de alimentos, residuos de limpiezas generales y otros materiales que no entran en contacto directo con los pacientes o con los residuos contaminados.

Residuos contaminados o riesgosos: genotóxicos o citotóxicos, agujas, gasas, jeringas, vendas, algodones, órganos y tejidos extraídos, medios de cultivo y animales usados para ensayos, sangre coagulada, guantes desechables, medicinas vencidas, instrumentos de resina sintética, placas fotográficas de Rayos X, etc. Debido a su característica, estos deben recibir un tratamiento especial y evitar su disposición inadecuada ya que pueden dañar la salud de la población al transmitir virus como el Sida, hepatitis, tifus y otras producidas por gérmenes propios de los hospitales.

La forma más utilizada a nivel mundial para la eliminación de residuos hospitalarios contaminados es la incineración a altas temperaturas y con sistemas de filtros adecuados. De esta forma, se elimina el 100% de los patógenos, se reduce el volumen en gran medida y se plantea como el mejor sistema para destruir los residuos genotóxicos (Izquierdo, 2006).

2.1.1.4 Residuos de barrido

Son los residuos sólidos originados por los servicios de aseo y ornato encargados del barrido y limpieza de la vía pública, limpieza de playas, alcantarillado, plazas, jardines y restos de poda de árboles, áreas de ferias, constituidos por restos de vegetales diversos, envoltorios, cajas, etc.

2.1.1.5 Residuos de escombros

Son residuos provenientes del área de la construcción, ladrillos, rocas, restos de hormigón de la construcción y demoliciones, tierra de excavaciones, etc. Los escombros generalmente son un material inerte, que puede ser reaprovechado y servir de relleno de sitios o contención de laderas.

2.1.2 Criterios para la clasificación según peligrosidad

2.1.2.1 Residuos peligrosos

Estos residuos pueden contener en su composición sustancias en cantidades o concentraciones tales que presenten un riesgo para la salud humana, recursos

naturales y medio ambiente.

Su peligrosidad está definida cuando el material desechado presenta al menos una de las siguientes características de peligrosidad: patogenicidad, toxicidad, inflamabilidad, reactividad y corrosividad. Estos conceptos se utilizan para determinar si un residuo es peligroso o no, al margen de que se le identifique como una sustancia peligrosa reconocida por el Código Sanitario.

2.1.2.2 Residuos inertes

Son aquellos residuos que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas. Por otro lado, la ecotoxicidad del residuo y su lixiviabilidad deben ser insignificantes. Algunos de estos materiales son: rocas, ladrillos, vidrios, ciertos plásticos y gomas difíciles de descomponer.

2.1.2.3 Residuos no inertes

Los que no entran en el grupo de residuos peligrosos ni en el de inertes. Estos residuos pueden tener propiedades tales como combustibilidad, biodegradabilidad o solubilidad en agua.

2.1.3 Características de los RSD en Chile

El Ministerio de Salud a través de un catastro realizado en todo el país en el año 2005, determinó que se generaron 5.432.154 toneladas de RSD, donde la Región Metropolitana aportó la mayor cantidad, con un promedio mensual de 193.869 toneladas de RSD, equivalentes al 42,8% del total nacional. Le siguieron la Región del Bío Bío con 60.814 toneladas al mes (13,4%) y la Región de Valparaíso con 47.044 toneladas al mes (10,4% del total). Las que menos RSD producen son la Región de Aysén, con 1.915 toneladas al mes (0,4%) y la Región de Atacama, con 8.553 toneladas al mes, es decir, un 1,9% del total nacional (ver Tabla 2-1).

La Región Metropolitana presenta avances significativos a nivel nacional sobre la gestión de sus residuos sólidos, posicionándola como la primera a nivel país en el tratamiento de los desechos domiciliarios. Hoy, el 98% de éstos son dispuestos en vertederos sanitarios controlados (Lomas Los Colorados en Tiltil, Santa Marta en Lonquén y Santiago Poniente en Rinconada de Maipú), mientras que el 2% restante corresponde a desechos depositados en el vertedero controlado de Melipilla y en el vertedero ilegal de residuos sólidos de Alhué (CONAMA, 2007).

Del total de residuos sólidos domiciliarios que se generan en la Región Metropolitana, un 12,6% son sometidos a diversos procesos de reciclaje, mientras que 33.500 toneladas son incorporadas a procesos de compostaje mediante la descomposición controlada de la materia orgánica, obteniendo como resultado abono para uso en agricultura y jardinería. (CONAMA, 2007).

Regiones	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	R. M.
ton/mes	9.652	20.988	8.553	17.444	47.044	13.333	18.084	60.814	16.285	30.871	1.915	13.829	193.869
% RSD	2,1	4,6	1,9	3,9	10,4	2,9	4,0	13,4	3,6	6,8	0,4	3,1	42,8

Tabla 2-1

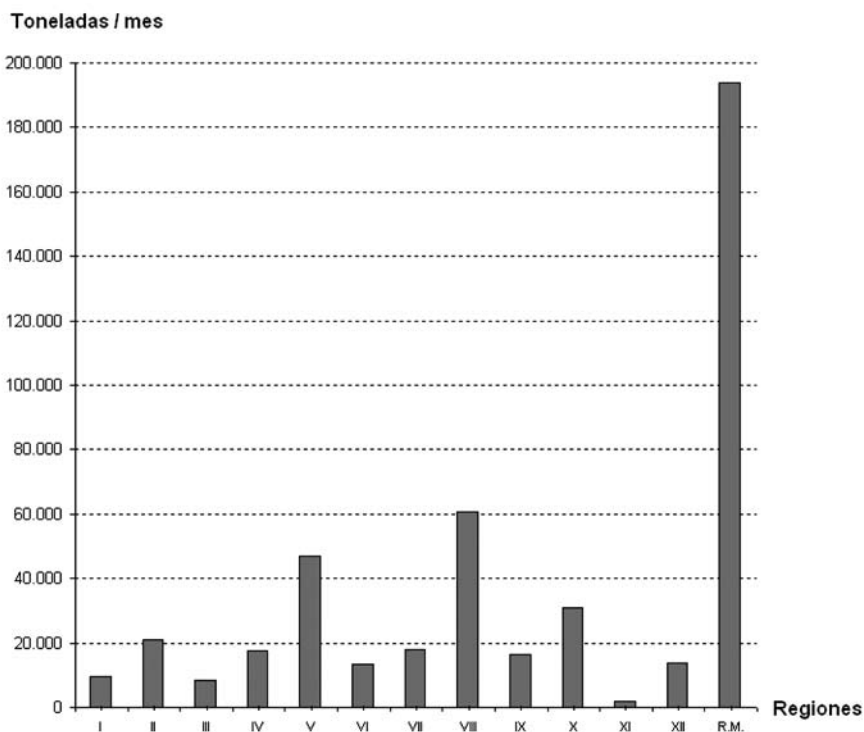


Figura 2.1: Generación mensual de RSD por región en Chile.
(Catastro Ministerio de Salud, 2005)

2.1.3.1 Composición de los RSD en la Región Metropolitana

La caracterización corresponde a la determinación de las principales cualidades y características de los residuos.

Básicamente consiste en una determinación, en base a porcentajes en pesos de los principales elementos que los constituyen para establecer sus cantidades y variaciones en el tiempo, además de la estimación de algunas de sus propiedades físicas.

Los estudios de caracterización son esenciales para poder determinar un diseño eficiente de un plan de gestión integral de residuos y de esta forma, lograr una optimización de los recursos disponibles para el desarrollo del mismo. Por el contrario, de no haber un proceso de caracterización, puede ocasionar un fracaso en el sistema de gestión elegido, haciéndolo ineficaz, carente de sentido y alejado de las necesidades reales (Szantó, 2006).

La composición de los RSD está muy ligada a 3 factores importantes que inciden sobre la muestra:

Factores sociales. Este es un factor que juega un papel preponderante dentro de una caracterización, ya que nuestra sociedad está compuesta por al menos de tres sectores sociales (alto, medio y bajo), teniendo cada uno de ellos sistemas de vida diferentes, asociados a factores como el nivel educacional alcanzado, nivel económico y otros. Lo que conlleva que cada sector tenga una producción de residuos distinta que en definitiva afectará los resultados de la caracterización.

Factores económicos. Estos poseen una gran influencia en el proceso de caracterización dado que es el que determina en definitiva el nivel o calidad de vida y su ubicación geográfica dentro de los límites urbanos de la región a estudiar. Este factor es claramente el que influye en el tipo de residuos que se extrae de cada uno de los sectores sociales identificados y esto se traduce en que aquellos sectores económicamente altos consuman más productos envasados, mientras que en otros sectores no ocurre lo mismo.

Factores estacionales. Son muy importantes en el proceso de caracterización debido principalmente a la aparición y salida del mercado de frutas de las diferentes estaciones que conforman el año, así como también de algunos elementos no comestibles que predominan en otras, lo que origina las variaciones de los porcentajes de los diferentes elementos en que se componen los residuos sólidos y también de su humedad. Es por esta razón que los residuos sólidos son elementos que no permanecen constante en el tiempo, al contrario, están en continuo cambio y evolución de sus características y es así que estas varían considerablemente de una estación del año a otra.

Componente	1973	1977	1979	1983	1990	1991	1992	2005
	%	%	%	%	%	%	%	%
Materia orgánica	73	68,3	63,9	62,2	68,1	55,1	67,6	45,79
Papel y cartón	16	19,3	16,4	18,9	14,9	16,8	15,3	17,12
Escorias, cenizas y lozas	0,6	1,58	7,26	6,5	0	3,75	0	3,82
Plásticos	2,2	2,38	2,72	4,4	5,82	8,15	6,09	9,72
Textiles	2	3,73	4,47	3,6	3,85	7,5	4,48	1,79
Metales	2,8	2,95	2,24	2,5	2,17	2,22	2,01	3,72
Vidrios	0,9	0,86	1,1	1,3	1,44	1,73	1,87	4,12
Huesos	2	0,29	0,8	0,3	0	1,43	0	0,54
Otros	0,5	0,66	1,13	0,3	3,73	3,4	2,58	13,38

Tabla 2-2. Evolución de la composición de los RSD en la Región Metropolitana. (Szantó, 2006)

Si se realiza un análisis en el tiempo de la caracterización de los RSD que presenta la Región Metropolitana (Tabla 2-2), nos permite observar los siguientes cambios de hábitos de consumo de la población:

Existe una clara tendencia a la disminución de la fracción orgánica, reflejando indirectamente el crecimiento económico del país.

La componente Papel y Cartón mantiene la tendencia presentada hasta la fecha, sin mayores variaciones, sin embargo se destaca la baja variación sufrida desde el año 1992 a la fecha.

El Plástico ha mantenido un crecimiento sostenido en el tiempo, sin embargo se observa una pequeña disminución en su composición entre 1992 y 2005.

La componente Vidrio es la que presenta el mayor aumento a nivel de la composición, debido a la incorporación de los envases desechables para la distribución de jugos, vinos, cervezas, entre otros.

El gran aumento detectado en la componente Metales, podría deberse al mayor uso de envases de aluminio y sobre todo su alto porcentaje de reciclaje.

Otro aspecto a considerar, es que la composición de los RSD es estacional, es decir, varía dependiendo de la época del año, lo cual esta ligado principalmente a la estacionalidad de los elementos que forman parte de la alimentación.

En la Tabla 2-3 se observa que la fracción orgánica es la componente con mayor relevancia y diferencia entre los extremos socioeconómicos. Donde también se aprecian contrastes es en el consumo de plásticos, papeles y tetrapack, esto debido principalmente a la fuente de alimentación de cada estrato, como el consumo de alimentos envasados de los estratos socioeconómicos altos.

RSD	INVIERNO	PRIMAVERA	INVIERNO	PRIMAVERA	INVIERNO	PRIMAVERA	INVIERNO	PRIMAVERA	INVIERNO	PRIMAVERA
	ABC1		C2		C3		D		E	
Residuos alimentos	44,36	44,93	41,61	51,1	54,44	49,33	47,47	47,04	58,08	53,62
Residuos jardín poda	4,8	9,92	5,23	6,34	4,61	9,01	4,84	4,81	0	0
Papel	16,96	13,66	15,96	10,99	12,03	7,78	9,7	7,23	3,32	4,15
Cartón	3,66	2,91	6,52	6,15	2,73	1,75	3,32	1,86	1,8	2,61
Plásticos	9,68	9,59	12,46	9,46	9,14	9,65	9,19	9	11,58	11
Tetrapack	1,13	1,25	1,36	0,63	0,62	0,6	0,41	0,35	0	0,64
Pañales y celulosas	4,85	5,67	3,32	3,14	5,12	3,23	5,7	6,51	11,96	0
Gomas	0,25	0,15	0,15	0,11	0,23	0,05	0,04	0,07	0	0
Cueros	0	0	0,01	0,01	0,09	0,19	0,27	0,1	0	0
Vidrio	6,54	3,98	7,17	2,32	1,69	3,68	2,87	2,7	3,66	4,81
Metales	0,98	1,48	1,29	1,24	1,19	1,44	0,86	1,11	5,73	2,69
Madera	0,08	0,1	0,21	0,66	0,8	0,41	3,77	1,16	0,95	0,15
Textiles	0,66	0,79	1,41	0,88	2,61	3,44	4,51	3,41	1,14	0,85
Suciedad y cenizas	2,87	1,63	1,14	3,06	2,22	2,17	4,33	5,13	0	19,49
Pilas	0,04	0,04	0,02	0,04	0,04	0,09	0,11	0,06	0,11	0
Huesos	0,51	0,9	0,96	0,81	0,68	0,58	0,61	0,84	0,05	0
Cuescos	0,39	0,32	0,43	0,36	0,2	0,37	0,43	0,35	0	0
Cerámicas	0,67	0,07	0,1	0,69	0,72	0,32	0,94	0,57	0	0
Otros	1,09	2,29	0	1,59	0,44	5,45	0,02	7,33	0	0
Residuos Sólidos Especiales (ej. Insecticidas)	0,5	0,32	0,62	0,42	0,41	0,46	0,6	0,4	1,61	0

Tabla 2-3. Variación estacional y nivel socioeconómico en la composición de los RSD. (Szantó, 2006)

2.2 Institucionalidad y gestión ambiental de RSD en Chile

2.2.1 Institucionalidad nacional

A partir de la década de los noventas, nace la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), que tiene como misión promover la sustentabilidad ambiental del proceso de desarrollo y coordinar las acciones derivadas de las políticas y estrategias definidas por el gobierno en materia ambiental. Dependiente del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, cuenta con la función de proponer normas y regulaciones en materias ambientales referidas en lo principal al aire, aguas y suelo.

Sus objetivos fundamentales son:

Recuperar y mejorar la calidad ambiental.

Prevenir el deterioro ambiental.

Fomentar la protección del patrimonio ambiental y el uso sustentable de los

recursos naturales.

Introducir consideraciones ambientales en el sector productivo.

Involucrar a la ciudadanía en la gestión ambiental.

Fortalecer la institucionalidad ambiental a nivel nacional y regional.

Perfeccionar la legislación ambiental y desarrollar nuevos instrumentos de gestión.

Además, colabora en esta misión el Ministerio de Salud que norma y regula el manejo y disposición final de residuos. A lo largo de Chile, ésta posee 28 servicios de salud asistenciales con responsabilidad y funciones ambientales y el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente, en la Región Metropolitana (SESMA).

Desde el ámbito de la salud ambiental, el Código Sanitario determina que le corresponde al Servicio Nacional de Salud, actualmente llamado Ministerio de Salud, autorizar la instalación y vigilar el funcionamiento de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de residuos y desperdicios de cualquier clase.

2.2.2 Institucionalidad regional

El Gobierno regional genera políticas públicas sobre manejo de residuos sólidos en las regiones y opera a través de entidades técnicas tales como la Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA).

CONAMA se desconcentra territorialmente a través de las 13 COREMA. Cada región del país cuenta con un Director regional de CONAMA, nombrado por el Director de CONAMA a partir de una quina propuesta por el gobierno regional.

Los Servicios de Salud también tienen la responsabilidad de garantizar la prestación de servicios de atención en salud a la población a su cargo y fiscalizar los temas medio ambientales que la ley les asigna, entre ellos calidad y control de los alimentos, salud de los trabajadores, calidad de aire y en lo específico, autoriza y controla los proyectos de tratamiento, disposición y eliminación de residuos sólidos.

Los servicios de salud y el SESMA en la Región Metropolitana, son autoridades sanitarias en las regiones y cuentan con las atribuciones jurídicas y deberes necesarios para atender todas las materias que digan relación con la salud pública y el bienestar higiénico de la población, de conformidad a la constitución, las leyes y reglamentos existentes en la materia, así como para desarrollar todas las acciones requeridas para la protección de la población de los riesgos producidos por el medio ambiente y para la conservación, mejoría y recuperación de la calidad de los elementos básicos del ambiente.

2.2.3 Institucionalidad local

A nivel local e independiente de las competencias que tenga la autoridad sanitaria, los municipios tienen dentro de sus funciones el aseo y ornato de la comuna, atribución que queda explícita en la Ley Orgánica de Municipalidades como también en el Código Sanitario, cuando establece que les corresponde recolectar, transportar y eliminar por métodos adecuados los residuos y desperdicios que se depositen o produzcan en la vía urbana.

La normativa que regula estas materias es el Decreto Ley N° 1.289/75, Ley Orgánica de Municipalidades, establece que es atribución privada de las municipalidades el cuidado del aseo y ornato de la comuna (Artículo 3°). Además, señala que corresponde al Departamento de obras municipales aplicar normas legales y técnicas para prevenir el deterioro ambiental (Artículo 24°). Otra función que atribuye esta ley a los municipios es aquella que indica que corresponderá al Departamento de aseo y ornato de cada municipalidad el aseo de las vías públicas, parques, plazas, jardines y, en general, de los bienes nacionales de uso público existentes en la comuna, así como realizar el servicio de extracción de basura (Artículo 25°). En la actualidad son 342 comunas del país las que tienen responsabilidad en gestión adecuada de las aproximadamente cinco millones de toneladas de RSD que la población produce en un año. Para estos efectos, el municipio se ordena institucionalmente en departamentos o unidades de aseo y ornato, que tienen la responsabilidad de estructurar, en conjunto con las secretarías comunales de planificación y coordinación (SECPLAC), el proceso de recolección domiciliaria y transporte de residuos domiciliarios, industriales asimilables a domiciliarias y desechos de plazas y jardines públicos. En la mayoría de las comunas urbanas y en un número cada vez mayor de las rurales, el servicio de recolección y transporte está transferido al sector privado y existe una veintena de empresas dedicadas al rubro, generando una importante competencia por calidad y precio de los servicios. Esto asegura un sistema relativamente eficiente, con una frecuencia que fluctúa entre un mínimo de tres ciclos semanales por sector residencial, hasta la recolección diaria con horarios diferidos en las comunas más densamente pobladas del país (Concha, 2003).

15 mil toneladas en promedio diario se desplazan por caminos y carreteras a lo largo del país haciendo que, sobre el 60% de los RSD generados por la población, sean dispuestos en vertederos sanitarios controlados y vertederos convencionales por distintas entidades fiscalizadoras, siendo los más importantes los Servicios de Salud. Es necesario señalar que sólo a baja escala y especialmente en sectores rurales y algunas experiencias aún aisladas de zonas urbanas, se están implementando sistemas de separación en origen, reutilización y tecnologías de compostaje que tienen una cobertura todavía poco significativa en residuos de tipo domiciliario (Concha, 2003).

2.2.4 Otras entidades públicas

De acuerdo a lo establecido en la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, el análisis y la aprobación de un proyecto de tratamiento y disposición final de residuos sólidos, requiere la participación de diferentes entidades técnicas de carácter nacional y regional. Aquéllas que no pueden faltar, porque su función está establecida por ley.

Sin embargo, existe un grupo de instituciones públicas que tienen un rol importante con su participación en el análisis de localización e impacto de proyectos sobre la ecología y su entorno más inmediato. Así, es posible listar un conjunto de ministerios y servicios, cuyas tareas están determinadas por la CONAMA, como entidad coordinadora en la evaluación ambiental de los proyectos. Estos servicios son: Ministerio de Vivienda y Urbanismo y sus correspondientes secretarías regionales, que definen los aspectos relativos al uso de suelo y ordenamiento territorial de los proyectos en relación con los planes reguladores intercomunales y comunales. El Ministerio de Agricultura, a través de sus secretarías regionales y el servicio agrícola y ganadero (SAG), que define los impactos sobre los suelos, flora y fauna del sector a emplazar cada proyecto. El Ministerio de Obras Públicas, a través de su Dirección General de Aguas, quienes determinan la factibilidad de los proyectos en cuanto a manejo de aguas lluvias, así como la cercanía a napas subterráneas y cursos de aguas superficiales que se podrían ver afectadas con la operación de la actividad. La Superintendencia de Servicios Sanitarios, que participa en el manejo de las plantas de tratamientos de líquidos percolados, toda vez que los proyectos están obligados a presentar una gestión adecuada del lixiviado de los residuos y los residuos líquidos (RILES) propios de la actividad (Concha, 2003).

2.3 Sistema de manejo y gestión de residuos sólidos domiciliarios

2.3.1 Sistema de gestión integral de RSD

La gestión integral de RSD se define como “el conjunto articulado de acciones normativas, operacionales, financieras y de planificación, que desarrolla una administración municipal o privada, basándose en criterios sanitarios, ambientales y económicos, para recolectar, tratar y disponer los residuos sólidos de la población”.

Por lo tanto, gestionar los residuos sólidos de una manera integral significa limpiar la ciudad (con un sistema de recolección y transporte adecuados) y procesar los residuos utilizando las tecnologías más compatibles a la realidad local, dándole un destino final ambientalmente seguro, tanto en el presente, como en el futuro.

Gestionar los residuos sólidos de forma integral significa cuidarlos bien desde la generación a la disposición. Significa tener conciencia de que todas las acciones y

operaciones implicadas en la gestión están coordinadas y se influyen las unas a las otras, ya que:

La recolección mal planificada encarece el transporte.

El transporte mal dimensionado, además de generar perjuicios y reclamos, perjudica las formas de tratamiento y disposición final.

El tratamiento mal dimensionado no alcanza los objetivos deseados y se vuelve blanco fácil de las críticas.

La cantidad y la calidad de los residuos sólidos generados por el municipio es principalmente una función de su población, economía y grado de urbanización.

Si bien el manejo de los residuos históricamente ha sido abordado una vez que éstos han sido generados, limitándose a encontrar un lugar para su disposición final y procurando evitar molestias para la comunidad, el crecimiento de la población como asimismo el desarrollo de la conciencia ambiental, en especial en lo que se refiere al derecho de vivir en un ambiente libre de contaminación y el agotamiento de nuestras reservas naturales, ha provocado un cambio radical hacia una visión más completa en la gestión integral de residuos. La gestión integral de residuos establece la necesidad de prevenir la generación de residuos y manejar de una forma segura los residuos que no ha sido posible prevenir. Aplica un concepto preventivo a partir de una visión ampliada del ciclo de vida del producto. La aproximación integral define una serie de opciones de manejo y tratamiento a desarrollar, destinadas a reducir la cantidad de residuos generados, reducir la cantidad de residuos que llegan a disposición final y maximizar la recuperación de recursos (ver Figura 2.2). Se habla de una estrategia jerarquizada de manejo de los residuos sólidos, siendo esta jerarquía primordialmente de carácter ambiental y operativo.

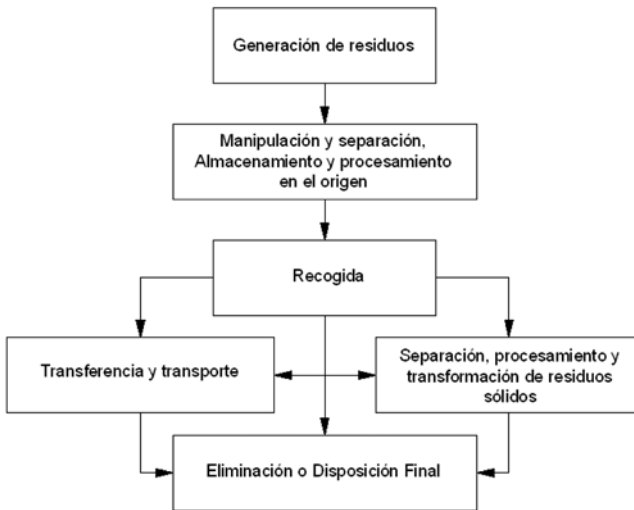


Figura 2.2. Esquema del sistema de manejo de RSD.

Éste consta de las siguientes etapas:

Generación de residuos. Corresponde a la etapa en que el residuo es producido. Dentro de un sistema de manejo adecuado, la principal meta es evitar al máximo la generación de residuos, para así disminuir la cantidad de recursos que se utilizarán, atenuando a su vez el impacto ambiental asociado al manejo de los residuos.

Manipulación, separación, almacenamiento y procesamiento de residuos en el origen. La manipulación y separación involucran todas las actividades hasta que son colocados en los contenedores de recogida. La manipulación incluye el movimiento de los contenedores cargados hasta el punto de carga. La separación de residuos tiene mayores ventajas en el sistema de gestión cuando son clasificadas en origen. El almacenamiento in situ permite velar por la salud pública y evitar la propagación de enfermedades a través de los vectores ambientales. Este debe realizarse en recipientes o contenedores adecuados en capacidad y durabilidad. El procesamiento en origen involucra actividades como la compactación y compostaje casero de residuos de jardinería y alimentos.

Recogida. El retiro se realiza en forma periódica por las municipalidades, empresas de recolección o por recolectores independientes. Ellos recolectan y transportan los residuos directamente a un vertedero sanitario, a una estación de transferencia o a las instalaciones de tratamiento. En el caso de una separación en origen, las empresas transportan los residuos reciclables a centros de acopio, para posteriormente ser vendidos a empresas recicladoras o directamente a industrias.

Los recolectores independientes retiran los residuos reciclables y los llevan a centros de acopio.

En un sistema de gestión integral de RSD, el costo anual de la recogida representa casi un 50% del costo total de la gestión.

Separación, procesamiento y transformación de residuos sólidos. Se produce principalmente en localizaciones fuera de la fuente de generación de residuos. Para los materiales separados en origen, se tiende a incluir la recogida en la acera, en los centros de recogida selectiva y en los centros de recompra.

Los procesos de transformación se emplean para reducir volumen, toxicidad y peso de residuos que han de eliminarse y para la recuperación de productos de conversión y energía.

Transferencia y transporte. La transferencia comúnmente se realiza en lugares de estaciones de transferencia. Los residuos se transfieren desde un vehículo de recogida pequeño a silos que disminuyen el volumen de los residuos y transfieren a un medio de transporte más grande como camiones o rampas, pero

en algunos lugares es más ventajoso el uso de ferrocarril o barcazas. Luego, los residuos son transportados grandes distancias hasta el lugar de procesamiento o disposición final.

Eliminación o disposición final. Es la etapa final en el manejo de los residuos en la cual estos son dispuestos en un sistema que asegure que su interacción con el medio ambiente no atenta contra la calidad de vida de las personas ni estará asociada a un riesgo relevante para el medio ambiente. Estos se disponen generalmente en vertederos sanitarios controlados o vertederos convencionales.

2.3.2 Jerarquía de manejo de RSD

2.3.2.1 Evitar

Desde el punto de vista ambiental lo recomendable es prevenir, en primer lugar, evitando la generación de residuos. Esto es complejo, ya que requiere un cambio en la percepción y actitud de la población. Esto se traduce, en la práctica, en ejemplos tales como el uso exclusivo de productos en envases retornables.

2.3.2.2 Minimizar

En segundo lugar, si no es posible evitar, se debe buscar su minimización. Estas acciones consideran medidas tales como:

La reducción de los RSD, está orientado a la disminución de la cantidad de envases y recipientes descartables, sin alterar la calidad del producto contenido. Requiere que el consumidor transforme sus preferencias, favoreciendo aquellos productos con menos envoltorios. Esto presiona a los productores (empresas e industrias) a utilizar la menor cantidad de embalaje posible y también propone la minimización en la nocividad de los residuos, como por ejemplo, la sustitución de pinturas en base a solventes por pinturas en base de agua.

La reutilización y reciclaje son procesos mecánicos, manuales o industriales, mediante los cuales se puede recuperar diferentes tipos de residuos. Al contrario de los niveles anteriores, estos procedimientos generan resultados a corto plazo.

La reutilización es una técnica de aprovechamiento de un material o producto, sin cambiar su forma o naturaleza original.

El reciclaje, por su parte, es la transformación de ciertos materiales en materia prima para procesos productivos. Ambos procesos se presentan como una alternativa a la disposición final, reduciendo los volúmenes de residuos dispuestos en vertederos sanitarios y transformándolos en un insumo más adentro de la cadena productiva que los generó. Estos procesos no son aplicables a todos los residuos, debido a que

algunos residuos no son recuperables, ya que no existe un mercado que demande dichos materiales o porque no existe la tecnología necesaria para su tratamiento.

Uno de los aspectos más importantes del reciclaje es la separación y acopio de los residuos. Ésta se puede realizar en origen o después de su recolección. La separación en el origen debe ser realizada desde el lugar de generación (casa, oficina, casino, etc.)

Para estimular la separación, se deben crear puntos de acopio de fácil acceso y ubicados en lugares estratégicos para este efecto, implementar un sistema de recolección y transporte eficiente, que traslade los residuos clasificados y sin mezclarlos hacia las empresas demandantes.



Figura 2.3. Instalaciones de “Ñuñoa recicla”, Ñuñoa, Santiago.

Los materiales retirados son llevados a la planta clasificadora ubicada en la comuna donde por medio de un proceso semi-automatizado, se optimiza la recepción, clasificación y acopio de los materiales reciclables inorgánicos procedentes del sistema de recolección selectiva (ver Figura 2.3).

El programa “Ñuñoa Recicla” pretende recuperar un 10% de los residuos sólidos domiciliarios generados cada mes en la comuna (520 toneladas mensuales de residuos).

Otro ejemplo es el sistema implementado en la comuna de Vitacura, Santiago. Esta experiencia traída desde Europa, es denominada “Punto Limpio” (ver Figura 2.4), que

al igual que la comuna de Ñuñoa, incentiva la separación en origen y complementa al sistema de gestión de RSD con instalaciones donde los vecinos pueden dejar los residuos en los diferentes depósitos de clasificación. Además, sirve como vacunatorio y centro de educación medio ambiental para colegios e instituciones.



Figura 2.4. Instalaciones de “Punto Limpio”, Vitacura, Santiago.

2.3.2.3 Tratar o transformar

Se define como la modificación de las características físicas, químicas o biológicas de cualquier residuo, de modo de eliminar sus propiedades nocivas, reducir su volumen o simplemente hacerlo susceptible de recuperación.

Los métodos aplicados para tratar RSD son diversos, pero es imprescindible la separación y clasificación previa. Uno de los ejemplos, es la separación de la fracción orgánica de los RSD, fundamental para realizar el proceso de compostaje. Este tratamiento basado en la descomposición aeróbica de la componente orgánica, genera como producto final el compost, que permite acondicionar los suelos para el uso agrícola. Es un tratamiento recomendable para países como Chile, donde existe un alto porcentaje de materia orgánica en los RSD.

2.3.2.4 Disponer

Se define como la actividad de disposición definitiva de los residuos, con o sin

tratamiento previo, que han sido rechazados en las etapas anteriores.

En Chile, se dispone legalmente en vertederos sanitarios controlados y vertederos convencionales, en cumplimiento de la normativa vigente. Para el caso de residuos peligrosos existen empresas que desarrollan vertederos de seguridad donde se realizan los tratamientos de inertización, físico-químicos y disposición de seguridad.



Figura 2.5. Jerarquía de manejo de RSD.

2.4 Ingeniería de vertederos sanitarios

Con el fin de evitar las complicaciones negativas que ocasionan los vertidos incontrolados, se han desarrollado nuevas técnicas para controlar, minimizar o eliminar los efectos desfavorables. A continuación se describen los tipos de disposición final existentes en la actualidad.

2.4.1 Tipos de disposición final

2.4.1.1 Vertedero incontrolado de residuos

Un vertedero incontrolado o de vertido a cielo abierto, es una forma de disposición final de los residuos sólidos, que se caracteriza por el simple vertido de residuos sobre el terreno, sin medidas de protección para el medio ambiente o la salud pública (ver Figura 2.6).

Los residuos así tratados acarrearán problemas de salud pública, como proliferación de transmisores de enfermedades (moscas, mosquitos, cucarachas, ratas, etc.), generación de malos olores y principalmente, la contaminación de la tierra y de las aguas superficiales y subterráneas a través de los líquidos lixiviados, comprometiendo los recursos hídricos y el suelo.

A esta situación se añade la absoluta falta de control en cuanto a los tipos de residuos recibidos en estos sitios, donde se acumulan inclusive desechos originados por los servicios de salud y las industrias.



Figura 2.6. Vertedero incontrolado de residuos.

2.4.1.2 Vertedero sanitario controlado (relleno sanitario)

Este sistema es conocido erradamente en países de habla hispana por el nombre de relleno sanitario, debido a su transcripción literal de la lengua inglesa de sanitary landfill (Szantó, 2007). En esta investigación se usará la denominación conceptual correcta que corresponde a un vertedero sanitario controlado.

Según la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), “un vertedero sanitario es la técnica para la disposición de residuos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin ocasionar molestias o peligros para la salud y seguridad pública. Este método usa principios de ingeniería para confinar los residuos en el menor espacio posible. Los residuos depositados, se cubre con una capa de tierra, denominada material de cobertura, con una frecuencia necesaria, por lo menos al fin de cada jornada. Esta capa de tierra tiene como finalidad asegurar un vertido sanitario sin malos olores y evitar migración incontrolada de gases o atracción de vectores y animales”.

El Ministerio de salud lo define como: “una instalación de residuos sólidos en la cual se disponen los RSD y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos a la salud de la población y daño para el medio ambiente, en el cual los residuos son compactados en capas al mínimo volumen practicable y cubiertas con material de cobertura a lo menos al final de cada día de operación y de esta forma minimizar los impactos ambientales”. Un vertedero controlado es básicamente una obra en la cual el material vertido sufre pérdidas de masa y

variaciones en sus características debido a la descomposición de los residuos y a esfuerzos mecánicos, dando lugar a asentamientos que pueden prolongarse por muchos años. Los fenómenos de degradación que afectan a la fracción biodegradable de los desechos producen una pérdida de masa que se manifiesta con la generación de biogás y líquidos lixiviados, que están entre los principales problemas que deben enfrentarse durante la operación de un vertedero (Espinace et al., 1997).

Entre las alternativas que existen, el método conocido como vertedero sanitariamente controlado, es hoy en día el método de tratamiento final más aplicado en el mundo. Este método por la sencillez de la operación, por los costos involucrados y por la seguridad ambiental que ofrece, resulta atractivo tanto para países desarrollados como para países en vías de desarrollo. Para implementar un emplazamiento que cumpla con los requerimientos de un vertedero sanitario controlado, en primer lugar se debe contar con un sitio apto y cumplir con las restricciones que impone la seguridad sanitaria y ambiental. Por otro lado, es necesario que los diseños se adapten al tipo de clima existente en la zona y a terrenos que presentan inconvenientes para el emplazamiento, ya que la dificultad para encontrar terrenos que sirvan para estos fines es creciente.

Por estas razones se requiere diseñar vertederos que sean económicamente factibles de construir y que cuenten con sistemas seguros desde un punto de vista sanitario, ambiental y estructural en el largo plazo. Esto obliga a un adecuado control de los dos principales agentes contaminantes que se generan en un vertedero sanitario que son los líquidos lixiviados y el biogás generado (ver Figura 2.7).



Figura 2.7. Vertedero sanitario controlado de Meruelo, Cantabria, España. (Szantó, 2006).

Por lo anteriormente comentado, se requiere que estas obras civiles tengan una vida útil lo más larga y segura posible. Esto se puede lograr disminuyendo el volumen de los residuos sólidos que llegan al vertedero mediante políticas como reducir la producción de residuos, reciclar y reutilizar los materiales que se pueden obtener de ellos. Otra alternativa consiste en optimizar la operación de estos emplazamientos, para aprovechar al máximo su volumen útil. Esto se puede lograr aumentando la densidad del vertedero o acelerar los procesos de degradación que dan lugar a los asientos, con lo que se logra liberar un volumen que puede ser ocupado nuevamente por residuos.

2.4.1.3 Vertedero controlado de alta densidad

Existe una metodología adicional al vertedero sanitario controlado convencional, que plantea la disposición a través de balas o fardos de residuos compactados previamente en una planta de tratamiento de residuos sólidos y colocados en forma ordenada sobre un terreno preparado en capas con geomembranas flexibles de alta impermeabilidad, con sistemas de captación pasiva de biogás y drenajes para líquidos percolados que puedan generarse (ver Figura 2.8).



Figura 2.8. Vertedero controlado de alta densidad (IMABE, 2007).

Este tipo de vertido de alta densidad ayuda a minimizar las emisiones contaminantes a largo plazo, ya que al compactar los residuos entre 0,8 y 1,2 ton/m³, pierden parte de su humedad, teniéndose como resultado final un vertedero seco.

Además, si se considera la experiencia de vertederos sanitarios en zonas áridas, estos señalan que los residuos se momifican debido a los rasgos climáticos y

salinidad del suelo, provocando en el tiempo un proceso más lento de degradación. Por lo tanto, esta característica favorece al sistema planteado, reduciendo los costos de inversión para tratamiento de líquidos percolados y biogás.

El sistema de vertedero controlado de alta densidad ha sido ampliamente desarrollado en España y estudiado por Universidades de Cantabria y Politécnica de Cataluña. Estas entidades desarrollaron ensayos con balas expuestas a la intemperie, comprobando que la compactación y enfardado perdura en el tiempo, evitando la dispersión por el viento de residuos livianos en el entorno (ver Figura 2.9).



Figura 2.9. Ensayo de bala expuesta a la intemperie entre 1993 y 2001, Cantabria, España (IMABE, 2007).

Estas investigaciones no detectaron producción de lixiviados (pese a la pluviometría intensa de la zona de Cantabria) ni gases u olores que evidenciarán degradación. Sólo se observa el crecimiento de plantas sobre la bala, por lo que se insertan perfectamente en el medio ambiente.

2.4.1.4 Incineración

Es una de las tecnologías existentes para el tratamiento térmico de residuos. La incineración se define como la quema de materiales a alta temperatura (generalmente superior a 900°C), mezclados con una cantidad apropiada de aire durante un tiempo predeterminado. En el caso de incineración de los residuos sólidos, los compuestos orgánicos son reducidos a sus constituyentes minerales, principalmente dióxido de carbono gaseoso, vapor de agua, y sólidos inorgánicos (cenizas).

Esta combustión se realiza en una instalación que suele llamarse planta de incineración, proyectada y construida para tal fin.

Las ventajas de este tratamiento son:

Reducción drástica del volumen a ser descartado. La incineración deja como sobras las cenizas, que generalmente son inertes. De esta forma, reduce la

necesidad de espacio para el vertedero sanitario.

Reducción del impacto ambiental. En comparación con el vertedero sanitario, la incineración minimiza la preocupación a largo plazo relacionada con el monitoreo de la capa freática, ya que el residuo tóxico es destruido y no guardado.

Desintoxicación. La incineración destruye bacterias, virus y compuestos orgánicos, como el tetracloruro de carbono, aceites, e inclusive, dioxinas. En la incineración, la dificultad de destrucción no depende de la peligrosidad del residuo, sino de su resistencia al calor. La incineración también se puede usar para descontaminar el suelo que contiene residuos tóxicos. Este, después de incinerado, es devuelto a su lugar de origen.

Recuperación de energía. Parte de la energía consumida puede recuperarse para la generación de vapor o electricidad.

A nivel mundial, la incineración se practica para lograr la reducción de los volúmenes de residuos sólidos a ser dispuestos, ante los problemas con la disponibilidad de espacios, la reducción de la peligrosidad de los residuos, como es el caso de los desperdicios de hospitales, y a su vez, la recuperación de energía a través de este método.

Algunas de las desventajas de la incineración son:

Emisión de contaminantes. Tanto gaseosos, líquidos y sólidos, generación de dioxinas, provocando graves efectos sobre la salud de la población. La exposición a dioxinas provoca un aumento en la incidencia de Cáncer, efectos sobre el sistema inmunológico, reproducción y desarrollo, entre otros. Emisiones de metales pesados como mercurio, plomo, cadmio, cromo y berilio, generación de gases invernadero y material particulado.

Problemas para controlar las emisiones. Escaso monitoreo continuo o muestreos poco representativos de los niveles aceptables de emisiones de contaminantes liberados.

Costos. Altos costos tanto en la construcción, operación y mantenimiento de incineradores.

Sustentabilidad. La incineración quita incentivos para la minimización de residuos e incluso, crea estímulos para generar más desechos. La minimización de residuos es una parte esencial de cualquier proceso de producción sustentable.

Problemas adicionales. Falta de capacidad técnica para medir las emisiones, falta de vertederos seguros para disponer cenizas, incertidumbre presupuestaria afecta el mantenimiento y reemplazo regular de equipamiento.

2.4.2 Proceso de descomposición de residuos

2.4.2.1 Reacciones biológicas

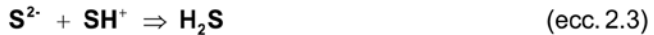
La mayor parte de los residuos sólidos generados en las viviendas son de tipo orgánico, los cuales se degradan gradualmente a través de cinco fases dentro de un vertedero sanitario:

Hidrólisis aerobia. En esta fase los componentes orgánicos biodegradables de los RSD sufren descomposición microbiana mientras se colocan en un vertedero sanitario y poco después. Aquí se produce una descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del vertedero sanitario, los microorganismos convierten algunos hidratos de carbono a azúcares simples (como la glucosa), dióxido del carbono (CO₂) y agua.

Hidrólisis y fermentación. Desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el vertedero sanitario se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que pueden servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno, como se ilustra en las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.



Ácido láctico Sulfato Ácido Acético Ión sulfuro Agua Dióxido de carbono



El proceso implica la transformación medida por enzimas (hidrólisis), de compuestos con alto peso molecular (por ejemplo lípidos, polisacáridos, proteínas y ácido nucleico) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular.

Acetogénesis. Se presenta la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la fase anterior en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético (CH₃COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fólvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante esta fase. También se producen cantidades pequeñas de gas hidrógeno (H₂). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) se incrementan significativamente en esta fase, debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado.

Metanogénesis. En esta fase las bacterias convierten el ácido acético en metano y CO₂. Como los ácidos y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos que se han convertido en CH₄ y CO₂, el pH dentro del vertedero sanitario subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, subirá y se reducirán las concentraciones de DBO₅, DQO y el valor de

conductividad del lixiviado.

Con valores más altos de pH quedan menos constituyentes inorgánicos en la disolución y como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

Maduración y estabilización. Esta fase se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable CH_4 y CO_2 . Durante esta fase, la velocidad de generación del gas de vertedero sanitario disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores y los sustratos que quedan en el vertedero sanitario son de una degradación lenta. Los principales gases de vertedero sanitario durante esta fase siguen siendo CH_4 y CO_2 . Según las medidas de sellado del vertedero sanitario, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del vertedero sanitario.

Durante la fase de maduración, el lixiviado contendrá ácidos húmicos y fúlvicos, que son difíciles de degradar biológicamente. Finalmente, las condiciones pueden tornarse nuevamente aerobias y es allí cuando el vertedero se encuentra estabilizado.

2.4.2.2 Reacciones químicas

Dos tipos generales de reacciones químicas tienen lugar dentro de la masa de residuos sólidos en descomposición en un vertedero sanitario. Las primeras son las reacciones de oxidación a causa del oxígeno atrapado en los residuos dispuestos. El segundo tipo de reacción es ácido-metal, debido a la presencia de ácidos orgánicos y CO_2 . Estos procesos movilizan los iones metálicos y sales que son los contaminantes potenciales. Sin embargo, una vez la generación del metano se establece en el vertedero (Metanogénesis) se genera menos ácido y generalmente reteniendo metales.

2.4.2.3 Reacciones físicas

Los efectos del agua cuando entra en contacto con los residuos dispuestos, hacen que se favorezca la disolución de materias solubles, los cuales quedan disponibles para procesos de absorción y adsorción.

Hay que hacer notar la necesidad de agua dentro de las celdas, siendo un factor limitante en la degradación final de los residuos. Por lo tanto, las condiciones hidrológicas del lugar afectan significativamente la velocidad y el periodo de tiempo en donde se produce la descomposición, generación de líquidos lixiviados y producción de biogás.

2.4.3 Generación de biogás

El biogás, conformado por metano y dióxido de carbono principalmente, es producto de una serie de complejas reacciones que provienen de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica contenida en los residuos. Es un gas incoloro y más liviano que el aire. Su generación no es constante a lo largo del tiempo y su comportamiento depende de las bacterias involucradas en el proceso de descomposición, de la humedad y de la ventilación del vertedero.

El metano, dentro de los componentes del biogás, es un gas combustible, de alto poder calorífico, que le da las características energéticas al biogás. El poder calorífico de este gas depende entonces de la cantidad de metano que contenga, cuyo poder calorífico superior es típicamente de 9.300 Kcal/m³. En general el biogás de vertederos sanitarios posee un poder calorífico superior que fluctúa entre las 4.200 y las 5.600 Kcal/m³. Según estudios en vertederos sanitarios se ha concluido que en un comienzo no existe producción de metano, debido al oxígeno que queda atrapado en los intersticios de los residuos, inhibiendo el proceso anaeróbico (Massanes, 1996).

Una vez que el oxígeno es consumido, se inicia la producción de biogás, creciendo rápidamente hasta alcanzar un máximo, para luego decrecer a una velocidad que depende de la composición de los desechos. En la Figura 2.10 se muestran las fases de generación de biogás, donde el tiempo de duración de las fases varía según las condiciones del vertedero.

La distribución en el tiempo de la producción de biogás depende principalmente del grado de biodegradabilidad de los residuos (ver Figura 2.10). Estos se dividen en:

Elementos de rápida descomposición: Residuos con vida media de 1 año. Ej: restos de comida.

Elementos de descomposición moderada: Residuos con vida entre 5 y 20 años. Ej: papel, madera, cartones, desechos de jardín, etc.

Elementos no degradables: Son residuos cuya vida media puede considerarse infinita. Ej: metales, vidrios, plásticos, etc.

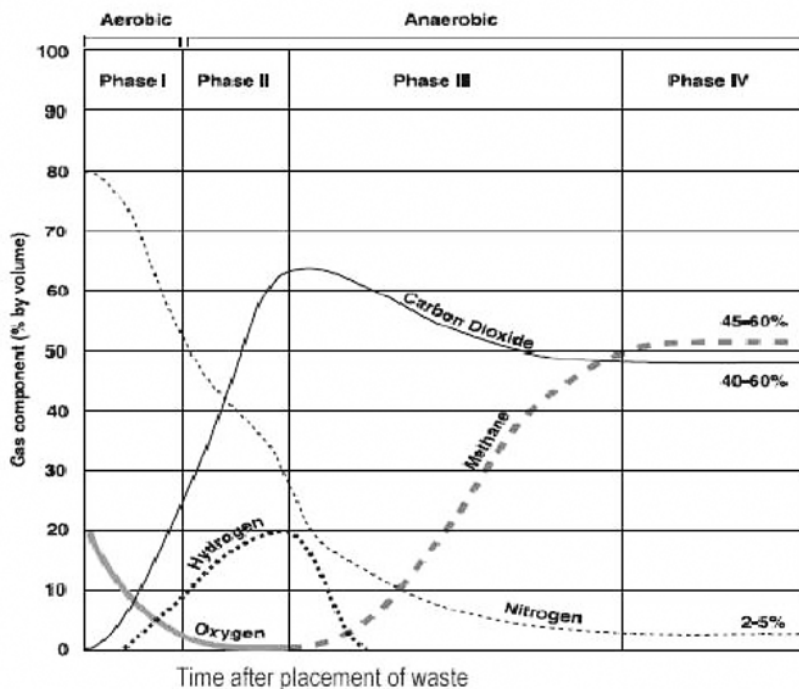


Figura 2.10. Fases de producción de biogás en un vertedero sanitario (EPA, 1997).

2.4.3.1 Composición y características del biogás en los vertederos sanitarios

Los gases originados de la descomposición de los desechos que se encuentran en un vertedero sanitario dependen principalmente del tiempo, tipo, condición y mezcla de los compuestos orgánicos presentes. Los principales componentes del biogás generado, con sus respectivas densidades se muestran en Tabla 2-4.

La mezcla de metano con aire en concentraciones entre 5 y 15% se transforma en un gas explosivo. Esta misma propiedad la adquiere el biogás en concentraciones entre un 11 y un 21% respecto al aire. El olor fuerte de éste se debe a la presencia del sulfuro de hidrógeno o H₂S y a otros gases orgánicos que se encuentran en menos cantidad. En cuanto a la toxicidad del biogás, sólo el sulfuro de hidrógeno y el monóxido de carbono llegan a ser tóxicos en altas concentraciones.

Gas	Fórmula	% en volumen (1)	% en volumen (2)
Metano	CH ₄	45 - 60	50 - 60
Dióxido de carbono	CO ₂	40 - 60	35 - 45
Nitrógeno	N ₂	2 - 5	3 - 8
Oxígeno	O ₂	0,1 - 1,0	0 - 2
Amoniaco	NH ₃	0,1 - 1,0	0 - 1ppm
NMOC (compuestos orgánicos distintos del metano)	-	0,01 - 0,60	-
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos	-	0 - 1	-
Hidrogeno	H ₂	0,0 - 0,2	-
Monóxido de carbono	CO	0,0 - 0,2	-
Constituyentes en cantidades de traza	-	0,01 - 0,60	-

Tabla 2-4. Composición típica de biogás en vertederos sanitarios.

(Tchobanoglous, theisen and Vigil, 1993 (1), Vertedero sanitario Loma Los Colorados, R.M., Chile. KDM, 2002 (2))

2.4.3.2 Factores que afectan la producción de biogás en los vertederos sanitarios

La producción de biogás en el tiempo depende de un gran número de factores, tanto de los residuos propiamente tal, como de las condiciones ambientales. Los factores más influyentes son:

Tamaño de los sólidos. La reducción del tamaño de los residuos aumenta las tasas de producción de biogás debido al aumento de la superficie disponible para la acción de los microorganismos.

Composición de los desechos. Afecta directamente en las tasa de producción de biogás. Un mayor contenido de material orgánico produce un aumento en el contenido de metano del biogás. Por otro lado, los desechos se degradan a diferentes velocidades, lo que afecta la producción instantánea de biogás. La composición de los desechos domiciliarios depende de muchos factores como niveles socioculturales, costumbres y clima entre otros. Debido a lo anterior la composición varía de un lugar a otro.

Humedad. El alto contenido de humedad de los desechos (entre un 60% y un 80% en peso húmedo), favorece la producción de biogás y el contenido de metano de éste. Esto se debe a que en la reacción de formación de metano, el agua es un reactivo fundamental.

Temperatura. Entre 30 y 60°C favorecen la producción de metano, pero cuando son menores a 10°C implica una drástica caída en la producción de éste. El rango en donde existe producción de biogás es entre 4 y 65°C. Las temperaturas típicas del biogás se encuentran entre 30 y 40°C. El hecho de que esta temperatura sea mayor a la ambiental se debe fundamentalmente a la actividad biológica y a su generación metabólica de calor.

pH. La óptima producción de biogás se logra con pH que va de neutro a suavemente alcalino (7 a 7,2) y la producción de éste se logra en un rango entre 6,6 y 8,0.

Metales pesados. Si la concentración de los cationes es elevada, son capaces de producir efectos tóxicos en los organismos y disminuir el crecimiento microbiano. La toxicidad de los compuestos depende de su peso molecular, siendo más tóxico aquel con mayor peso.

2.4.3.3 Método actual de extracción de biogás en Chile

Los sistemas de extracción de biogás para su utilización como producto energético constan de diversos componentes.

En primer término se distinguen los depósitos de captación, cuyo propósito es extraer el biogás de la masa del vertedero sanitario. Para ello se han diseñado diversos sistemas. Se describen a continuación los dos más usados.

Pozos. Consisten en perforaciones efectuadas en el vertedero con un diámetro aproximado de 600 mm y una profundidad que puede oscilar entre 10 y 20 m. En su interior se introducen tubería de 200 mm de diámetro con ranuras; el espacio entre las paredes del pozo y el interior se rellenan con grava. La parte superior del pozo se sella con una lámina de polietileno y una capa de arcilla compactada a fin de impedir el ingreso del aire al vertedero. En la parte superior de la cañería se aplica succión (presión negativa) para la extracción de biogás.

Chimenea. Son captadores sobre las ventilaciones estándares del vertedero. En la parte superior de cada chimenea se instala una tubería ranurada, de aproximadamente 1,5 a 2 m de longitud, que se conecta a la red de tuberías de succión. La parte superior de la chimenea se sella con un polietileno y arcilla.

A continuación de los dispositivos captadores de biogás, se encuentra un sistema de recolección. Este consiste en una red de cañerías de polietileno que permiten conducir el biogás hasta la planta de aspiración y compresión.

El gas así extraído del vertedero sanitario es conducido hacia la estación de compresión y control. Aquí es comprimido mediante compresores de lóbulos rotativos de desplazamiento positivo para ser luego enviado a su destino final (fábrica a gas, electricidad, estanques de almacenamiento, etc.).

El proceso de compresión calienta el gas por lo que este se debe enfriar para evitar daños en las cañerías de polietileno. El enfriamiento se realiza mediante el contacto directo del gas con agua, lo que permite también su lavado, retirándose las partículas que lleva en suspensión. Esto se realiza en un "Venturi Scrubber" donde el gas ingresa junto con el agua atomizada. Este enfriador puede ser reemplazado por algún otro tipo de torre enfriadora en donde el gas este en contacto directo con el agua.

Un ejemplo de ellas son las torres empacadas. El agua se retira en un hidrociclón por fuerzas centrífugas y es recirculada enfriándose mediante torres provistas de paneles disipadores de calor o en estanques abiertos.

Finalmente se mide el volumen de gas en medidores de lóbulos rotativos, registrándose su presión y temperatura, con el propósito de poder hacer las conversiones a condiciones normales.

En la misma estación de compresión y control se dispone de un registrador de poder calorífico, que indica el contenido de energía del biogás. Se utilizan también registradores de oxígeno, que permiten detectar fallas en el sistema de captación, tales como rupturas de cañerías, de sello u otras.

2.4.4 Control de líquidos lixiviados o percolados

Los residuos, especialmente los orgánicos, al ser compactados por maquinaria pesada liberan agua y líquidos orgánicos, contenidos en su interior, el que escurre por gravedad hacia la base de la celda. Los residuos, que actúa en cierta medida como una esponja, recupera lentamente parte de estos líquidos al cesar la presión de la maquinaria, pero parte de él permanece en la base de la celda. Por otra parte, la descomposición anaeróbica rápidamente comienza actuar en un vertedero sanitario, produciendo cambios en la materia orgánica, primero de sólidos a líquido y luego de líquido a gas, pero es la fase de licuación la que ayuda a incrementar el contenido de líquido en el vertedero y a la vez su potencial contaminante. En ese momento se puede considerar que los residuos están completamente saturados y cualquier agua, ya sea subterránea o superficial, que se infiltre en el vertedero, lixiviará a través de los desechos arrastrando consigo sólidos en suspensión y compuestos orgánicos en solución. Esta mezcla heterogénea, de un elevado potencial contaminante, es lo que se denomina lixiviados o líquidos percolados.

Como consecuencia del proceso de degradación de los residuos y de la impermeabilización de los vertederos sanitarios, se acumulan en este una gran cantidad de líquidos percolados, los cuales deben ser manejados en forma apropiada. Es importante tener en el vertedero sanitario los elementos necesarios para mantener un control total de los lixiviados, estos pueden ir desde almacenamientos en lagunas para luego recircularlos con equipos de bombeo, hasta sistemas de drenaje al interior del vertedero, depósitos de almacenamiento y tratamiento químico o biológico.

Uno de los modelos con los cuales se estima la producción de lixiviado involucra los componentes mostrados en la Figura 2.11, y descritos a continuación.

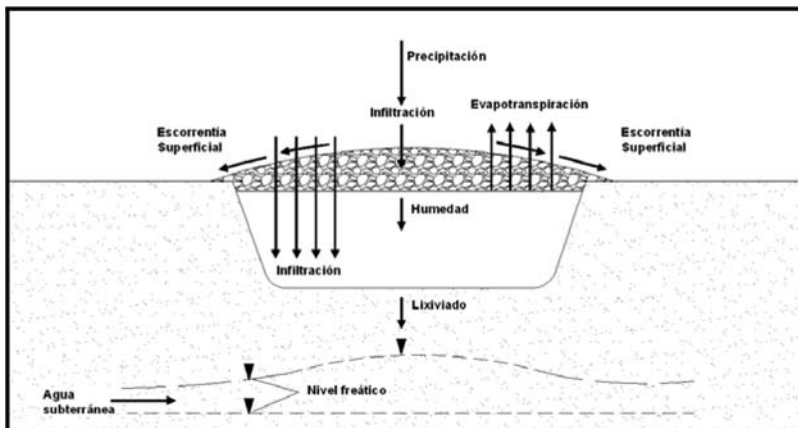


Figura 2.11. Balance de agua en un vertedero sanitario.

Precipitación. Es la cantidad de lluvia que cae sobre el terreno del vertedero, siendo la escorrentía superficial la fracción de esta que escurre sobre el terreno.

Infiltración. Es la fracción de precipitación que se infiltra entre las capas de los residuos dispuestos. La tasa de infiltración depende del tipo de superficie con que se cuente (material de cobertura final, cobertura vegetal, material de cobertura diaria e intermedia o residuos descubiertos).

Evapotranspiración. Corresponde a la parte del líquido que se evapora de la superficie y/o se transpira por acción de la cobertura vegetal.

Saturación. Es la deficiencia en el almacenamiento de humedad del terreno, es la diferencia de la capacidad de campo y el volumen de humedad existente.

Percolación. Es el porcentaje de precipitación que no se infiltra, ni escurre y que tampoco es sometido a la evapotranspiración, la cual se convierte luego en lixiviado.

La percolación puede ser aumentada por la intrusión al vertedero de escorrentías subterráneas. El procedimiento de cálculo que involucra estos elementos se denomina "Método de equilibrio del agua" el cual ha sufrido diversas variaciones desde su formulación en 1975 por Fenn, Hanley y Degeare.

En su momento este método consistía en un procedimiento de cálculo manual resuelto de acuerdo con los registros mensuales de precipitación. A partir de este método se han desarrollado modelos para computadoras de los cuales el más usado por su precisión es el modelo HELP propuesto por Dr. Paul R. Schroeder, en 1983.

Una predicción exacta del flujo de lixiviados es muy difícil de lograr debido a las incertidumbres asociadas a la estimación de las variables que componen el método, cuya formulación algebraica es:

$$\text{Percolación} = \text{Precipitación} + \text{Escorrentía subterránea} - (\text{Escorrentía superficial} + \text{Evapotranspiración} + \text{Saturación})$$

El cual requiere conocer datos básicos como temperatura, precipitación, índice de calor, crecimiento vegetal, coeficiente de escorrentía, compactación, capacidad de almacenamiento de humedad, etc.

El primer estudio exitoso, realizado para predecir la producción de lixiviados fue publicado por Kmet en 1982, quien utilizó el método de equilibrio del agua para simular la producción de lixiviado estimando su flujo en porcentajes comprendidos entre el 16,6% y 22,1% de la precipitación media anual.

En condiciones normales, el lixiviado se encuentra en el fondo de los vertederos sanitarios. Desde allí el movimiento es a través de los estratos subyacentes, aunque también ocurre algún movimiento lateral, dependiendo de las características del material circundante y de la forma del suelo que soporta el lleno (topografía, pendiente, tipo de suelo, forma de la cuenca, etc.)

Es necesario establecer un sistema de monitoreo rutinario que permita detectar y anticipar un eventual paso de líquidos percolados a través del terreno y subsecuentemente adoptar las medidas preventivas y correctivas que corresponda para evitar riesgos a la población, por consumo de agua contaminada.

2.4.4.1 Tratamiento del líquido lixiviado

El tipo de instalaciones de tratamiento dependerá de las características del lixiviado y en segundo lugar, de la localización geográfica y física del vertedero sanitario. Las características más importantes del lixiviado son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales disueltos (STD), metales pesados y constituyentes tóxicos sin especificar.

El lixiviado contiene concentraciones extremadamente altas de STD, por ejemplo sobre 50.000 (mg/lit), puede ser difícil tratar biológicamente. Con valores altos de DBO es preferible emplear procesos de tratamientos anaeróbicos, porque los procesos de tratamientos aeróbicos son caros. Concentraciones altas de sulfato pueden limitar el uso de procesos de tratamientos anaeróbicos, debido a la producción de olores procedentes de la reducción biológica de sulfatos a sulfuros. La toxicidad producida por los metales pesados también es un problema para muchos procesos de tratamiento biológico.

Una investigación realizada en la sección de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Chile acerca del tratamiento físico-químico de los lixiviados a fines de

la década de los 80 y principios de los 90, entregó las siguientes conclusiones:

El tratamiento físico-químico de percolados, consistentes en coagulación con sulfato de aluminio o cloruro férrico a pH elevado o en precipitación con cal o hidróxidos desodio, produce en los percolados modificaciones de olor y remoción de color, turbiedad, materia orgánica y metales, lo que facilita su manejo y disposición. Las remociones de materia orgánica alcanzada, esta en el rango de 35% en términos de DQO y en el caso de los metales: 99,3% de Fe, 98,8% Mn y 63,9% de Cu.

El tratamiento físico-químico de percolados, produce una gran cantidad de lodos y consume una alta cantidad de reactivos. Estos lodos pueden ser depositados en el mismo vertedero sanitario. La disposición final de los líquidos tratados debe ser evaluada considerando el impacto ambiental que producirán.

Para situaciones en las cuales los líquidos percolados generados por un vertedero sanitario presenten problemas de manejo sólo algunos meses al año, el tratamiento físico-químico aún cuando tiene un alto costo, resulta recomendable porque permite reducir a niveles aceptables los problemas de olor y facilita el manejo de los líquidos.

2.4.5 Ejecución y tratamientos aplicados al vertedero sanitario

2.4.5.1 Tratamiento por digestión anaeróbica

Al quedar los residuos sin presencia de oxígeno debido a la capa de tierra que los sepulta, se produce una descomposición denominada digestión anaeróbica, fermentación anaeróbica o metánica. Ella es producto de la acción de microorganismos anaeróbicos, que realizan el proceso mediante reacciones de oxidorreducción en las cuales no interviene el oxígeno libre.

En la mayoría de los casos, más del 90% del volumen del gas producido de la descomposición de residuos sólidos consiste en metano y dióxido de carbono. Sin embargo, no hay oxígeno en un vertedero sanitario cuando las concentraciones de metano alcanzan el nivel crítico (15%) en el vertedero y tampoco hay peligro que el vertedero explote.

Aunque la mayor parte del metano escapa a la atmósfera, se han encontrado concentraciones de ambos, metano y dióxido de carbono, hasta del 40% a distancias laterales hasta de 125 m de los bordes del vertedero. Para vertederos sanitarios sin ventilación, la extensión de este movimiento lateral varía con las características del material de recubrimiento y el suelo circundante. Si el metano es sacado a la atmósfera de forma no controlada, se puede acumular, debido a que su peso específico es menor que el del aire, debajo de construcciones o en otros espacios cerrados cercanos al vertedero sanitario. El dióxido de carbono, por otro lado, es molesto debido a su densidad. El dióxido de carbono es alrededor de 1,5 veces más

denso que el aire y 2,8 veces más denso que el metano, de manera que tiende a moverse hacia el fondo del vertedero. Como resultado, la concentración de dióxido de carbono en partes más bajas del vertedero sanitario puede ser elevada durante años.

Finalmente, debido a su densidad, el dióxido de carbono también se moverá hacia abajo a través del subsuelo hasta alcanzar la escorrentía subterránea. Debido a que el dióxido de carbono es muy soluble en el agua, generalmente baja el pH, lo que a su vez aumenta la dureza y el contenido mineral del agua subterránea mediante solubilización.

2.4.5.2 Tratamiento por digestión aeróbica

Esta alternativa se presenta como la que produce mayores ventajas para la descomposición de los residuos sólidos y no se usa de una manera más generalizada a causa de sus mayores costos directos comparados con el tratamiento la digestión anaeróbica.

En este método se suministra aire a los residuos dentro del vertedero para remover al mismo tiempo, los gases de descomposición a través de las celdas, produciéndose una descomposición aerobia. Al mantener esta degradación aerobia dentro de las celdas se acelera la descomposición sin producir gases tóxicos y explosivos. Las investigaciones demostraron que este método es factible (ver Tabla 2-5).

La desventaja del proceso aeróbico sería la necesidad de inyectar aire dentro de los residuos sólidos acumulados, operando sistemas de control y bombeo de aire, lo cual exige costos directos e indirectos.

Factores	Ventajas del proceso aerobio vs. anaerobio
Lixiviado	Menores niveles de DBO* y DQO** facilitando tratamientos finales de líquidos.
Formación de gases	Sin formación de gases peligrosos (i.e. metano)
Descomposición de residuos	Más rápida.
Drenaje de líquidos y gases	Mayor, con beneficios para la estabilidad mecánica.
<p>(*) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) Medida de la cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos, en la oxidación de materia orgánica presente en el agua o en el agua residual. Cuanto mayor el grado de contaminación, mayor la DBO. Las aguas subterráneas suelen contener menos de 1ppm; contenidos superiores son indicativos de contaminación. En las aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 ppm. La más frecuente es la determinación de DBO a los cinco días (DBO5).</p>	
<p>(**) Demanda Química de Oxígeno (DQO) Medida de la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación química de la materia orgánica presente en el agua o en el agua residual. Las aguas no contaminadas tienen valores de DQO de 1 a 5 ppm, o algo superiores. Las aguas residuales domésticas suelen contener entre 250 y 600 ppm.</p>	
<p>En aguas residuales: DBO/DQO < 0,2 = vertido de tipo inorgánico. DBO/DQO > 0,6 = vertido de tipo orgánico.</p>	

Tabla 2-5. Ventajas del proceso aeróbico.

2.4.5.3 Tratamiento por digestión semi-aerobia

Como alternativa a las dificultades presentadas por el proceso aerobio, existe una corriente tecnológica que propicia la concepción de digestión semi-aerobia. Esta concepción procura eliminar las desventajas de la implantación y operación de sistemas forzados de inyectores de aire dentro de los residuos sólidos y para ello el proyecto establece directrices preventivas, mediante la construcción de sistemas de disposición de gases, drenaje de residuos líquidos y ventilación natural por convección.

En este caso, se elimina la principal desventaja del proceso aeróbico, que es el costo y se aprovechan todas sus ventajas con poco o casi ningún perjuicio en cuanto al tiempo de descomposición de la materia orgánica.

2.4.5.4 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico de los residuos sólidos, como forma de aceleración del proceso de descomposición de la materia orgánica, ha sido objeto de estudios teóricos y académicos. En Brasil, realizaron los primeros experimentos a nivel de instalaciones, en dimensiones y condiciones reales de operación. Esta alternativa exige la adquisición de la tecnología del proceso y un control riguroso de todas sus fases, a través de un equipo de operación especializado. Los resultados finales de los primeros experimentos están todavía en fase de comprobación. El control y la operación son requisitos importantes para alcanzar los objetivos, como garantía de la calidad de los resultados.

El tratamiento acelerado de los residuos sólidos, a través de la descomposición de la materia orgánica por medio de microorganismos específicos desarrollados en reactores, transforma la fracción orgánica sólida en líquidos y gases, con el tratamiento final de los líquidos resultantes y la quema de los gases a lo largo del proceso. De este modo, el lugar del vertedero sanitario se transforma en un sitio de tratamiento, siendo dispuestos los inertes en lugar específico, pudiéndose inclusive reducir el volumen mediante técnicas de separación y reciclaje.

Con los tratamientos alternativos presentados, eligiendo el más adecuado para las características generales y específicas del lugar, se procede a la ejecución del proyecto del vertedero sanitario en el lugar escogido, definiéndose en función de cada tratamiento, las instalaciones necesarias, sistemas y esquemas operativos.

Cualquiera sea el tratamiento que se adopte, se deberán considerar medidas de protección ambiental y monitoreo debidamente proyectadas, de modo que se garanticen condiciones de no contaminación de los lugares durante las diversas fases de la obra: implantación, operación y cierre.

2.4.6 Dimensionamiento del vertedero sanitario

Las dimensiones del vertedero sanitario dependen de:

La cantidad y tipología de los residuos que se deben acumular.

Las características fisiográficas y ambientales.

El uso futuro del área por rellenar.

2.4.6.1 Cantidad y tipología de los residuos a ser dispuestos

La cantidad (volumen) de residuos sólidos que se disponen en el vertedero sanitario es el factor preponderante para calcular la extensión del área para la disposición de los residuos.

Las precauciones que se deben tomar en cuanto al acondicionamiento, recolección, tratamiento y disposición final dependen de los tipos de residuos a ser contemplados. La proyección futura de esos volúmenes y tipos de residuos debe realizarse de forma tal que el área tenga una vida útil de operación de por lo menos 20 años. Los residuos provenientes de los servicios de salud y hospitalarios deben ser incinerados.

2.4.6.2 Características fisiográficas y ambientales

La caracterización fisiográfica y ambiental del área seleccionada para la disposición de los residuos sólidos es un factor básico para calcular las dimensiones del vertedero sanitario, principalmente porque este factor influye directamente en la implantación y desempeño del emprendimiento.

Para su caracterización son necesarios estudios cualitativos y cuantitativos de la región, generalmente definidos como estudios preliminares.

2.4.6.3 Uso futuro del área del vertedero sanitario

En el dimensionamiento de los vertederos sanitarios se debe prever el uso futuro más adecuado del área donde se dispondrán los residuos sólidos.

El destino final del área depende del método de disposición final adoptado, ya que las alternativas de tratamiento o la simple disposición de los residuos sólidos definirán comportamientos mecánicos diferenciados para las masas de residuos sólidos en esos sitios. En lugares donde se prefiere la degradación acelerada de los residuos, el uso posible del área puede ser más diversificado y con menores restricciones.

2.4.7 Componentes del proyecto

Los estudios deben ser orientados de tal manera, que se definan correctamente los siguientes componentes del proyecto:

Sistema de tratamiento de los residuos a ser dispuestos.

Sistema de tratamiento de la base (impermeabilización).

Sistema de operación.

Sistema de cobertura.

Sistema de drenaje de las aguas pluviales.

Sistema de drenaje de los líquidos lixiviados.

Sistema de recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados.

Sistema de drenaje de la base.

Sistema de drenaje de gases.

Sistema de tratamiento de gases.

Análisis de estabilidad de los macizos de tierra y de los residuos sólidos dispuestos.

Sistema de monitoreo.

Cierre final del vertedero.

2.4.7.1 Sistema de tratamiento de los residuos a ser dispuestos

El sistema se propone orientar la concepción del proyecto de un vertedero sanitario, buscando alternativas tecnológicas adecuadas para el tratamiento de los residuos sólidos, cumpliendo la función sanitaria y de conservación ambiental. Este sistema debe garantizar la calidad de vida en los alrededores del vertedero sanitario con influencias mínimas para el medio ambiente.

Su dimensionamiento es una función de la alternativa de tratamiento elegida para el sitio de disposición de los residuos sólidos.

La concepción del sistema puede adoptarse dentro de las alternativas de tratamiento acelerado de los residuos y el tratamiento anaeróbico tradicional a largo plazo.

La alternativa del sistema de tratamiento debe especificar procesos y métodos que garanticen la funcionalidad del vertedero sanitario en todas las fases de su existencia.

2.4.7.2 Sistema de tratamiento de la base

El sistema de tratamiento de la base tiene como función proteger el fondo del vertedero, evitando la contaminación del subsuelo y de los acuíferos adyacentes por la migración de líquidos lixiviados o gases, en caso de que no haya en el sitio condiciones naturales favorables.

Supuestamente si las condiciones naturales fueran totalmente favorables y seguras para el ambiente, ese tratamiento no sería necesario. Existen tendencias que piensan que no hay condiciones totalmente favorables, seguras y que siempre es necesario un grado de impermeabilización.

Un sistema de tratamiento de la base debe presentar las siguientes características:

- Estanqueidad.
- Durabilidad.
- Resistencia mecánica.
- Resistencia a la intemperie.
- Compatibilidad físico-química-biológica con los residuos a ser dispuestos.

Entre los materiales que se emplean comúnmente en el tratamiento de la base de los vertederos sanitarios se encuentran las arcillas compactadas y las geomembranas sintéticas.

Las capas impermeabilizantes de arcilla deben colocarse con un control tecnológico de compactación y deben cumplir con las características técnicas de baja permeabilidad y espesores mínimos, ya que constituyen barreras contra la migración de contaminantes.

Por la experiencia obtenida en otros países, como Estados Unidos y Alemania, el tipo de geomembrana que ha resultado más adecuado para la impermeabilización de vertederos sanitarios es la del polietileno de alta densidad (HDPE), por su resistencia mecánica, durabilidad y compatibilidad con una gran variedad de residuos. Otra alternativa para estándares estrictos, es la utilización de geomembranas de cloruro de polivinilo (PVC). En los procesos de impermeabilización, la garantía de calidad no está dada sólo por la definición de los materiales, sino por un adecuado método de aplicación y un efectivo control tecnológico de ejecución.

2.4.7.3 Sistema de operación

El sistema de operación en esta fase del proyecto, debe tomar en cuenta en principio, la optimización de los recursos (humanos, materiales y financieros) y la forma de

gerencia (administración directa e indirecta). El proceso de cubrir los residuos sólidos con tierra o la formación de celdas de residuos sólidos, según la clasificación de los vertederos y aplicando la técnica de los vertederos de superficie, se ha ido llevando a cabo tradicionalmente de tres maneras: método de trinchera o zanjas, método de rampa y método de área. La elección o definición de uno de los tres métodos depende de las características físicas y geográficas del sitio:

Método de trinchera. Consiste en la apertura de trincheras (zanjas) en el suelo, en las que los residuos sólidos son dispuestos en el fondo, compactados, y posteriormente cubiertos de tierra (ver Figura 2.12).

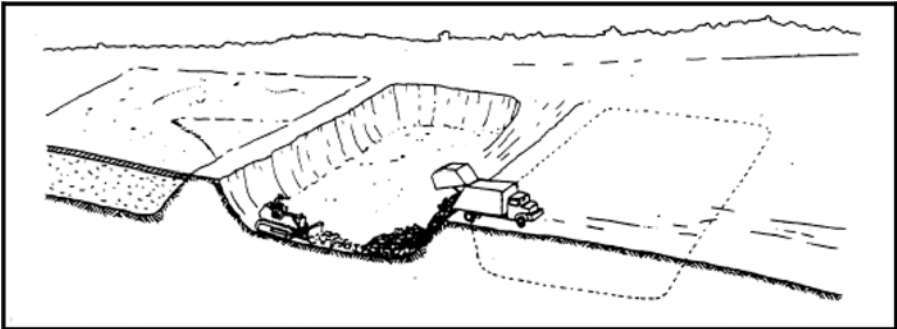


Figura 2.12. Método de trinchera (Cempre, 1998).

Método de rampa. Conocido también como “método de excavación progresiva”, se fundamenta en la excavación de una rampa donde los residuos sólidos son dispuestos y compactados mediante un tractor frontal y posteriormente cubiertos con tierra. Se emplea en áreas llanas, donde el suelo natural ofrece buenas condiciones para ser excavado y utilizado como material de cobertura (ver Figura 2.13).

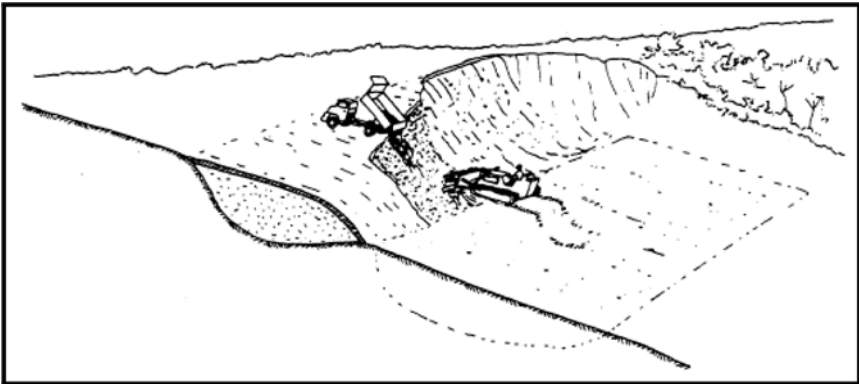


Figura 2.13. Método de rampa (Cempre, 1998).

Método de área. Suele emplearse en sitios donde la topografía es irregular, y la capa freática se encuentra en el límite máximo (ver Figura 2.14).

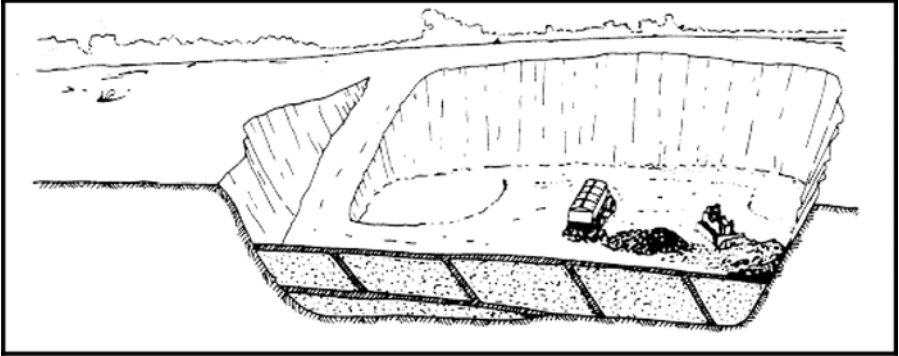


Figura 2.14. Método de área (Cempre, 1998).

El frente de trabajo en operación debe ser el mínimo posible, de modo que los residuos sólidos no queden dispersos e impidan su manejo, perjudicando la compactación, los accesos y la cobertura con tierra.

Se recomienda la preparación de un área destinada a la descarga de los residuos sólidos en épocas de lluvia o cuando, por cualquier motivo, no se pueda operar en el frente de trabajo.

Diariamente debe ser ejecutada la cobertura de los residuos con tierra. Cuando la recolección de residuos sólidos está terminada, éstos deben ser desparramados por el tractor frontal formando celdas diarias de residuos sólidos. Se podrá volver a trabajar sobre las celdas iniciales para formar celdas nuevas, hasta completar un grupo. Resultarán varios grupos de celdas sobrepuestas. La planificación de la obra deberá prever la construcción de drenajes de aguas superficiales, aguas subterráneas, lixiviado y gases, análogamente a la formación de celdas y grupos.

El sistema de operación debe también prever el control del funcionamiento del vertedero sanitario mediante el cumplimiento de algunas recomendaciones básicas, relacionadas con el volumen de los residuos sólidos recibidos, la zonificación de los sitios de disposición, el tratamiento de los residuos y de los efluentes generados por la disposición.

El control de la recepción de los residuos sólidos se logra instalando una balanza en la entrada del vertedero sanitario, donde los vehículos que entran y salen son pesados por operarios. Estos verifican y registran la matrícula y su procedencia, llevando control cuantitativo y cualitativo de los residuos que se disponen en el área.

Se recomienda la implantación de un espacio destinado al análisis y la inspección de los residuos sólidos recibidos en el vertedero.

Es ideal que se establezca un sistema de zonificación de los residuos, permitiendo, además de su control, el tratamiento adecuado en función del tipo, del volumen y de las características de los residuos sólidos recibidos.

2.4.7.4 Sistema de cobertura

El propósito de cubrir diariamente los residuos sólidos con tierra es proteger la superficie de las celdas de residuos sólidos, minimizando impactos al medio ambiente, con el objetivo de:

Impedir el arrastre de materiales por la acción del viento.

Evitar la clasificación de residuos en condiciones inapropiadas (recolectores y cartoneros).

Evitar la proliferación de moscas, roedores y otros transmisores de enfermedades.

Evitar el aspecto antiestético de los residuos sólidos expuestos.

Facilitar el movimiento de las máquinas y de los vehículos sobre el vertedero.

Propiciar el escurrimiento superficial, dificultando la infiltración de las aguas fluviales dentro del vertedero, disminuyendo la formación de lixiviado.

Reducir la existencia de malos olores.

Evitar la quema de residuos a cielo abierto.

Evitar la salida descontrolada de gases.

El sistema de cobertura debe ser resistente al proceso erosivo y adecuado a la utilización futura del área.

Se recomienda el uso de protección vegetal, e integrar la masa final del vertedero sanitario al medio ambiente local.

Los materiales que componen el sistema de cobertura final deberán ser especificados de modo que cumplan con los requisitos técnicos anteriores, al igual que el sistema de impermeabilización de base. La garantía de un buen funcionamiento depende del control técnico durante la ejecución de los trabajos.

Una vez concluida la utilización del vertedero sanitario, es necesario prever el mantenimiento del sistema de cobertura y garantizar sus características en el tiempo.

2.4.7.5 Sistema de drenaje de aguas pluviales

Este sistema tiene la finalidad de interceptar y desviar el escurrimiento superficial de las aguas pluviales, durante y después de la vida útil del vertedero, evitando su infiltración dentro de la masa de residuos.

El dimensionamiento de la red de drenaje depende principalmente de la cantidad de lluvia que se deberá drenar. Los métodos de dimensionamiento siguen la práctica usual del drenaje urbano, por tratarse de pequeñas vertientes de aporte.

En los vertederos sanitarios, en general, el sistema de drenaje de aguas pluviales está constituido por estructuras drenantes y canales de hormigón.

Dicho sistema de drenaje deberá estar orientado en sentido tal, que conduzca los líquidos hacia un punto único, distinto del sitio donde se concentran los lixiviados a través del vertedero, los cuales necesitan ser tratados antes de ser conducidos por el sistema de drenaje de aguas naturales.

2.4.7.6 Sistema de drenaje de líquidos lixiviados

El sistema de drenaje de líquidos lixiviados, que atraviesan la masa del vertedero sanitario, debe recolectarlos y conducirlos a través de drenajes internos, reduciendo las presiones de dichos líquidos que actúan en la masa del residuo y minimizando el potencial de migración de esos líquidos hacia el subsuelo.

Este sistema podrá proyectarse a través de piedra picada en tubos perforados, dirigiendo el lixiviado hasta el sitio de acumulación, donde serán sometidos a un tratamiento adecuado.

Para el dimensionamiento de este sistema de drenaje, es fundamental el conocimiento del caudal que debe ser drenado y las condicionantes geométricas de la masa de residuos.

La concepción del sistema de drenaje depende de la alternativa de tratamiento adoptada para el vertedero sanitario, pudiendo inclusive asociarse al sistema de drenaje de gases.

2.4.7.7 Sistema de recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados

Una de las formas para minimizar el impacto ambiental causado por el vertido de residuos sólidos, es la recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados.

La recolección se realiza por medio de tubos perforados con piedra picada, quienes conducen los líquidos hasta piscinas de acumulación, de donde son enviados a un tratamiento conveniente.

En el vertedero sanitario deberá siempre estar previsto un sistema de recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados, no siendo admisible su descarga en cursos de agua fuera de los patrones normalizados.

El proyecto adecuado de la instalación a ser implantada en el vertedero sanitario dependerá de las características y la cantidad de líquidos lixiviados estimados.

2.4.7.8 Sistema de drenaje de la base

Bajo el sistema de tratamiento de la base del vertedero sanitario es conveniente proyectar un sistema de drenaje para la recolección de las aguas naturales del subsuelo. Este sistema debe estar conectado con el sistema de monitoreo ambiental del vertedero, de manera que se puedan comprobar las buenas condiciones de funcionamiento del sistema de tratamiento de la base, tanto durante la vida útil del vertedero sanitario, como después de su cierre.

Aún cuando no hubiese surgencias de agua que exijan ser drenadas, se sugiere la inclusión del sistema asociado al sistema de monitoreo ambiental del vertedero sanitario.

2.4.7.9 Sistema de drenaje de gases

El sistema de drenaje de gases tiene la función de dar salida a los gases provenientes de la descomposición de la materia orgánica resultantes del proceso de digestión, evitando su migración a través de los medios porosos que constituyen el subsuelo, de manera que no lleguen a redes de desagüe, fosas, pozos y viviendas.

La migración de los gases debe ser controlada a través de la construcción de una red adecuada, constituida por tubos de cemento perforados verticales, colocados en puntos escogidos del vertedero. Estos tubos atraviesan todo el vertedero en sentido vertical, desde el suelo hasta las capas superiores.

Asociados a los tubos verticales se proyectan tubos horizontales y oblicuos, que facilitan un drenaje más eficiente de la masa de residuos. Estos tubos pueden estar conectados al sistema de drenaje de lixiviados, dependiendo de la alternativa de solución de tratamiento adoptada para el vertedero sanitario.

2.4.7.10 Sistema de tratamiento de gases

A pesar de sus fallas, en las últimas décadas se han venido ensayando muchos métodos para explotar el gas metano de los vertederos sanitarios en todo el mundo. Estos procesos deben ser estudiados con mayor profundidad para que las imprecisiones sean, en un futuro próximo, minimizadas.

Los principales problemas con esos métodos están relacionados con la capacidad real de producción y recuperación del gas, la imposibilidad de un control perfecto de

ciertos parámetros como la humedad, el pH, el potencial de óxido-reducción, la temperatura, el tipo de sólidos volátiles y la presencia de sustancias inhibidoras del proceso biológico en la masa de los residuos sólidos, además de otros elementos de no menor importancia.

El proceso de tratamiento más común utilizado hasta la fecha es la quema de los gases provenientes del vertedero, en los propios tubos colectores de gases.

2.4.7.11 Análisis de estabilidad taludes y de residuos sólidos dispuestos

La estabilidad de los macizos de tierra, de la base y de la masa de los residuos sólidos dispuestos en el vertedero sanitario debe ser analizada a partir de parámetros y métodos de análisis adecuados al sitio, por consultores especializados en la materia.

Con el análisis de estabilidad se pretende definir la geometría definitiva del vertedero y sus entornos, con criterios de seguridad adecuados para obras civiles.

Un factor básico que se debe tener en cuenta es la influencia de los líquidos y gases en la estabilidad de los taludes.

2.4.7.12 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo tiene la función de conocer y evaluar, a través de un sistema de control continuo y sistemático, el impacto causado por el vertedero sanitario. Este consta de un monitoreo geotécnico y ambiental.

El sistema de monitoreo geotécnico consiste en:

Control de desplazamientos horizontales y verticales.

Control del nivel de lixiviado y de la presión de los gases en el cuerpo del vertedero.

Control de la descarga de lixiviado a través de los drenajes.

Programación de inspecciones periódicas en el sitio.

El sistema de monitoreo ambiental consiste en:

Control de la calidad de las aguas subterráneas.

Control de la calidad de las aguas superficiales.

Control de la calidad del aire.

Control de la contaminación del suelo.

Control de los agentes propagadores de enfermedades.

El monitoreo se deberá llevar a cabo por medio de la construcción de pozos de control, instalación de piezómetros, medidores de desplazamientos horizontales y verticales, medidores de descarga, análisis físico-químicos y biológicos.

La frecuencia de la toma de muestras para los análisis, al igual que la técnica y los métodos de muestreo utilizados, son indicados por los organismos de control ambiental.

La frecuencia de la lectura de las referencias superficiales (desplazamientos verticales y horizontales), piezómetros, inclinómetros y medidores de descarga, se deberá definir en el proyecto.

2.4.7.13 Cierre final del vertedero controlado

El sistema plantea la concepción de un plan de clausura del vertedero sanitario, la recuperación del área utilizada y su ocupación final.

El dimensionamiento del sistema de clausura del vertedero sanitario está en función del tratamiento de los residuos adoptado durante la vida útil del mismo.

Los drenajes que rodean el área rellena, las vías de acceso y los sistemas de monitoreo deberán mantenerse funcionando aún después del cierre del vertedero sanitario. Los sistemas de drenaje y tratamiento de los líquidos lixiviados y de los gases, deberán igualmente funcionar durante todo el tiempo que los líquidos y gases presenten un potencial de contaminación.

La cobertura final de tierra se deberá colocar de modo que evite el surgimiento de agentes patógenos y la filtración indebida de líquidos y gases.

El monitoreo deberá ser mantenido, las lecturas deberán realizarse periódicamente hasta la estabilización definitiva de la masa de residuos.

2.4.8 Procedimientos de operación del vertedero sanitario

Los procedimientos de operación deben seguir una secuencia lógica que se inicia con la recepción de los residuos sólidos y finaliza con el medio de transporte, en el caso del camión de los residuos sólidos, partiendo del vertedero sanitario.

La recepción se debe realizar en la entrada del vertedero sanitario, luego que el camión recolector pasa por la portería (seguridad o vigilancia del vertedero). El camión debe ser pesado en una balanza, ubicada luego de la portería, antes y

después de la descarga, para que se tenga control del volumen diario/mensual que va a ser dispuesto en el vertedero sanitario.

El camión debe ser inspeccionado por personal debidamente entrenado para clasificar y calificar el residuo, indicándole la zona donde deberá realizar la descarga, de acuerdo con la zonificación del vertedero sanitario, en función de las características de los residuos.

Otro aspecto que debe ser contemplado, en esta fase operacional, es la optimización de los recursos humanos, materiales y financieros, de forma que se garantice su operatividad dentro de los criterios previstos por esta técnica. También deberá considerarse cual será la forma de utilización de estos recursos, que puede ser por administración directa, con inversiones para adquirir los equipos y formar personal técnico o indirecta, a través de contratación de servicios externos.

El residuo también debe ser inspeccionado en el punto de descarga y depositado en el frente de trabajo actual, que debe ser lo más pequeño posible y de acuerdo con el método operativo utilizado. En seguida debe ser nivelado y compactado por un equipo específico para ese trabajo (por ejemplo, un cargador frontal) y luego de que se haya terminado la celda o finalizado el día de trabajo, la celda será cubierta con tierra, ésta puede ser material de un área proveedora, o material excavado en la ejecución de las trincheras o rampas, dependiendo del sistema de vertido y manejo de residuos sólidos.

La ejecución y el mantenimiento de las obras complementarias (sistema de drenaje, accesos y otros), deben realizarse de conformidad con el proyecto concebido para la recuperación y operación del vertedero sanitario.

La lectura de los instrumentos que componen el monitoreo deberá ser realizada con la periodicidad definida en el proyecto y los datos procesados, para poder tener permanentemente bajo control el comportamiento del vertedero sanitario.

2.4.9 Cuidados durante la operación del vertedero sanitario

Las condiciones de mantenimiento de las características del sitio como vertedero sanitario requieren estricta obediencia a las especificaciones técnicas del proyecto y cumplimiento, inclusive en situaciones imprevistas o de mantenimiento esporádicos.

Se pueden presentar situaciones que demanden decisiones inmediatas (emergencias), tales como:

Deslizamiento de la masa de residuos sólidos.

Ineficacia del drenaje de lixiviados, que puede causar afloramiento de residuos líquidos en taludes que contienen las masas de residuos sólidos e infiltraciones

en el nivel freático.

Ineficacia de los drenajes de aguas superficiales.

Ineficacia de la impermeabilización de la base, que provoca infiltraciones en la napa freática.

Erosiones de la cobertura.

Migración de gases y lixiviados hacia áreas vecinas.

Inestabilidad localizada de la masa o de áreas adyacentes.

Ocurrencia de hundimientos, fracturas y deformaciones excesivas en las zonas con cobertura definitiva.

2.4.10 Cierre y sellado del vertedero sanitario

En la fase final del proyecto, en los detalles para el cierre y en la desactivación del sitio como vertedero sanitario, se debe pensar en actividades de:

Proyecto paisajístico y de uso futuro del área.

Monitoreo geotécnico/ambiental.

Cobertura final.

Tratamiento de gases y líquidos lixiviados.

Inspecciones periódicas del sitio.

Servicios de mantenimiento de los equipos y accesorios instalados.

2.4.11 Rehabilitación de áreas utilizadas como vertederos sanitarios

El cierre de un vertedero sanitario es la operación que da por finalizada la explotación, se clausura el lugar o la disposición y se realizan faenas principalmente de desmantelamiento de las instalaciones, de limpieza superficial y colocación de una capa de cobertura final.

El sellado es la operación realizada después del cierre en la cual se construyen todas las obras destinadas a mantener los residuos confinados y aislados, minimizando los riesgos de contaminación y peligro sanitario, a controlar las emanaciones de biogás y líquidos lixiviados, además de conservar bajo control la escorrentía superficial y los problemas que se puedan producir debido a los asientos del vertedero. También

se deben considerar las obras destinadas al monitoreo de gases y lixiviados, que es necesario mantener en el largo plazo. Eventualmente también es objetivo preparar la superficie para realizar las futuras obras de reinserción.

La reinserción son las faenas destinadas a reincorporar el vertedero sanitario ya sellado a su entorno, controlando las emisiones de biogás, líquidos lixiviados y los problemas que puedan causar los asientos entre otros, de manera que se impida causar impactos negativos al ambiente y la salud. En esta etapa se debe terminar de implementar las instalaciones de monitoreo, emplazadas en la etapa de sellado, que sean necesarias para controlar que el emplazamiento no sea causa de contaminación de aire, suelo o agua. La reinserción, habitualmente tiene alguna de las siguientes alternativas de destino: agrícola, recreacional o áreas públicas.

2.4.12 Principales experiencias internacionales sobre rehabilitación de áreas utilizadas como vertederos controlados

Aún cuando el tema de sellado y reinserción de vertederos sanitarios es de muy reciente preocupación, y no existen muchas experiencias que estén sustentadas en metodologías o criterios de diseño muy probados, durante los últimos años se han realizado importantes eventos internacionales en los cuales se han presentado experiencias realizadas principalmente en países desarrollados, las que dan a conocer casos que pueden ser importantes para ir generando estos criterios. Generalmente se trata de experiencias sustentadas por proyectos, en algunos casos con importantes innovaciones y que responden a programas marcos, de carácter nacional o sectorial.

La experiencia de Japón, uno de los países más desarrollados en estos temas, debido a que por muchos años allí se han rehabilitado los vertederos y se ha construido sobre ellos, ante la escasez y los altos costos de los terrenos. Según su legislación, un vertedero finaliza con el proyecto de cierre. Inicialmente se han definido las características de sus residuos y el método de operación a emplear, el que debe estar relacionado con las alternativas de uso que posteriormente se darán al lugar y el método de operación a emplear. Se estima que en los próximos 5 años, 2.300 vertederos municipales serán llenados con residuos domiciliarios y 2.500 con residuos industriales. Todos ellos serán empleados posteriormente dándole un nuevo uso al suelo.

Para llevar adelante un proyecto de recuperación, se han definido metodologías muy detalladas que incluyen la investigación periódica con frecuencias predeterminadas de: lixiviados, emisiones de gases, mediciones de temperatura, humedad y asientos de los residuos, etc. La idea es que estas mediciones constituyan una buena base de datos para la definición del proyecto de reinserción. El tiempo que se debe mantener la medida de los diferentes parámetros estará determinado entre otros aspectos por la magnitud y potencial de riesgo que se pueda producir tanto para el ambiente como para la salud de las personas. Este tiempo puede emplearse en las

discusiones definitivas sobre el destino final del sitio, el que puede sufrir alteraciones con respecto al propuesto inicialmente debido a la gran distancia en tiempo entre el inicio y el término de un vertedero. Es ésta una de las grandes diferencias con las pocas iniciativas realizadas en Chile, las que no han contado con tiempos y bases de datos suficientes.

En el caso de Estados Unidos, fallas producidas en antiguos vertederos dieron origen a que se introdujeran regulaciones que posteriormente pasaron a ser rigurosas leyes para el manejo de los residuos sólidos urbanos. Estas nuevas normativas incluyen la evaluación, investigación, planificación, construcción, financiamiento, cierre y mantención del lugar, con la debida protección del medio ambiente.

Con relación a las opciones de uso futuro de un vertedero sanitario, se plantean principalmente tres tipos de alternativas: agrícola, recreacional y comercial. Según Wallace y Ulrich (1995) el empleo en terrenos agrícolas es el de uso posterior más frecuente en ese país, ya que no requiere mayores planificaciones durante el diseño y la operación, ni tampoco grandes inversiones en la etapa posterior al cierre. Esto se ve facilitado al sembrar especies que no requieren que la cobertura final de suelo tenga un gran espesor para servir como soporte a la cubierta vegetal. Las referencias, no son suficientemente explícitas en cuanto a niveles de toxicidad y riesgos sanitarios de esta alternativa, lo que genera una línea de investigación que seguramente será abordada a la brevedad.

El uso como terreno recreacional constituye una de las aplicaciones más extendidas debido a que su costo relativo no es alto y al igual que en el empleo agrícola no se requieren mayores cambios de la topografía del terreno. En este país existen numerosas aplicaciones como parques, áreas deportivas, campos de golf u otros. A modo de ejemplo, en la Universidad de Washington, las instalaciones destinadas a campos deportivos y áreas de recreación, están construidas sobre un antiguo vertedero.

Por otra parte, existen numerosas experiencias de construcciones o usos comerciales sobre antiguos vertederos como construcciones de estacionamientos, calles, tramos de carreteras, edificaciones livianas, galpones, entre otros. La principal prohibición aún cuando existen algunos casos, es la construcción de viviendas o establecimientos de uso masivo como colegios (Espinace, 1993).

2.4.13 Experiencias en Chile sobre reinserción de vertederos controlados e incontrolados

A pesar que el empleo de vertederos controlados es relativamente reciente, desde los años setenta han existido iniciativas para mejorar el manejo de los residuos sólidos, pero muchas de ellas se realizaban de manera inconveniente. Se debe mencionar que la mayoría de los antiguos vertederos controlados iniciaron su período de explotación bajo condiciones incontroladas, evolucionando hacia una operación que

se puede calificar de sanitariamente controlada.

Durante los últimos años, son numerosos los estudios que se han realizado por diferentes instancias y fuentes de financiamiento, pero indudablemente lo más actual y completo que se está realizando desde 1993 es el Programa de manejo de residuos sólidos, realizado en conjunto por el Ministerio de Planificación Nacional y el Banco Interamericano de Desarrollo, el que gestó, financió y participó como contraparte técnica en la elaboración de estudios en las ciudades de Arica, Antofagasta, Serena, Coquimbo, Valparaíso, Viña del Mar, Región Metropolitana, Concepción, Penco, Talcahuano, Valdivia, Osorno, Puerto Montt, Punta Arenas, Porvenir y Puerto Natales, además de estudios en comunas de las regiones 6^a, 7^a y 11^a. Todo esto se planificó para que a fines de 1997, Chile contara con un verdadero plan nacional de manejo de los residuos sólidos incorporando al 80% de las ciudades de más de 150 mil habitantes.

Con relación a las experiencias de reinserción de carácter natural que se han realizado en Chile y que no han contado con un programa de reincorporación, se puede decir que estudios preliminares realizados por la CONAMA, muestran que podrían ser numerosos los casos donde se ha empleado sitios ocupados por antiguos vertederos, sin que haya existido un estudio riguroso previo ni menos un programa de reinserción. Ya el año 1989, se detectó que en algunas comunas de nuestro país se ha permitido edificar sobre terrenos que fueron rellenados con residuos, produciéndose con posterioridad, graves y variados deterioros en sus estructuras, interiores y redes de servicios. En dicha publicación, se estudió el caso de un conjunto habitacional en Santiago determinándose que el 30% de las viviendas presentaban deterioros graves y sólo el 36% no presentaban deterioros visibles, se estudiaron las causas que provocaron los daños de las construcciones basado en estudios de Mecánica de Suelos, se hacía un análisis de las disposiciones que deberían cumplirse para edificar eventualmente sobre vertederos.

Una conclusión allí planteada que es coincidente con una iniciativa propuesta por la Universidad Católica de Valparaíso al Ministerio de la Vivienda y Urbanismo en la misma época es la necesidad de que las municipalidades del país dispongan de un catastro de todos los terrenos del tipo de relleno artificial y que en los respectivos planes reguladores sean asignados para zonas compatibles sólo con el uso que a ellos se puede dar. Casos similares se han detectado en otras partes del país como en Valparaíso, donde al construirse una urbanización denominada población La Explanada en el sector de Playa Ancha, se descubrió que una parte del emplazamiento de varios edificios, se situaba sobre un antiguo vertedero de la ciudad. En este caso se teme que a pesar de los esfuerzos que se materializaron en una modificación del proyecto, algunas de las construcciones del sector han quedado sobre antiguos vertederos.

En la comuna de La Florida, Santiago, se presenta un caso similar. El vertedero municipal se encontraba cerrado por más de 30 años y se habrían construido poblaciones tanto en sus alrededores como sobre éste, existiendo antecedentes

deasientos tanto de pavimentos, como de viviendas. En el antiguo vertedero La Montaña, actualmente la zona está parcelada para la construcción de futuras instalaciones de carácter industrial. El antiguo vertedero del municipio de Macul, actualmente se encuentra ocupado parcialmente por algunas construcciones, viveros, estacionamientos y campos deportivos pertenecientes a particulares y a la Municipalidad y se proyectan nuevas construcciones.

Casos con una mayor planificación, o de un uso más racional del suelo son a modo de ejemplo los del antiguo vertedero intercomunal La Reina, en Santiago y el antiguo vertedero de la ciudad de Curicó. En el primero que funcionó hasta aproximadamente 1970 y fue sometido a cierre en 1977, se habilitó parte de lo que actualmente es el Parque Intercomunal La Reina, existiendo actualmente sobre él, canchas de fútbol, caminos de tierra, estacionamientos y plantaciones principalmente del tipo arbóreas.

Uno de los problemas más importantes que afecta a la reinserción de vertederos, es la dificultad por parte de los municipios a cargo, para absorber los costos de su mantenimiento, tema que ha sido detectado en la mayoría de los otros casos existentes. Con el propósito que el gobierno a través del MINVU, no disminuya el financiamiento a la creación de nuevos parques, se deberían contemplar recursos adicionales dentro de un Programa específico para la mantención de éstos.

El vertedero sanitario Lo Errázuriz de una extensión total de aproximadamente 40 Há, comenzó su operación en 1984 y la concluyó en 1995 con abiertas dificultades para encontrar su vida útil terminada y haber tenido que culminar su operación con sobrecargas que ocasionaron un importante impacto, principalmente por olores y presencia de contaminantes. A octubre de 1995, meses antes de su cierre, el vertedero atendía a 22 comunas del Gran Santiago, las cuales aportaron junto a los aportes de particulares durante 1994, un total de 1.117.764 toneladas de residuos. El volumen de extracción del biogás alcanzaba a 4.500.000 m³/mes.

El proyecto original del vertedero realizado por la Empresa Metropolitana de Residuos (EMERES) el año 1986, muy completo para las exigencias que existían en esa época, no profundizaba en el destino final del área. Esta debilidad es comprensible dada la importancia del tema en esos años. Sin embargo, en 1995 se genera el informe "Programa de Cierre del Vertedero Sanitario Lo Errázuriz". Al finalizar su operación se contaba con 10 Há convertidas en áreas verdes, mas el proyecto de un parque de 3 Há y un monitoreo de control ambiental. El cierre se ha hecho colocando sobre la última capa de cobertura de 25 cm de espesor, tres capas de suelo arcilloso compactado de 20 cm. cada una, de permeabilidad 10-4 cm/seg. Sobre ella va un polietileno de alta resistencia y sobre éste otra capa de 40 cm de limo y tierra vegetal, para finalizar con una capa de 5 cm de tierra de hojas. Todo el terreno cuenta con pendientes entre un 2% a 5% hacia los extremos del área, para permitir el escurrimiento superficial de aguas lluvias. Esta solución, si bien es buena para los fines propuestos, es de un costo aún elevado para la mayoría de la realidad chilena (Espinae, 1998).

2.4.14 Disposición ilegal de residuos sólidos

El Ministerio de Salud define la disposición ilegal como: “todas las actividades de depósito realizadas sin ajustarse a la legislación y reglamentación vigente, sin un proyecto aprobado, ni una autorización de funcionamiento otorgada por los servicios competentes” y los clasifica como:

Vertedero Ilegal de Residuos Sólidos (VIRS). Sitios de superficie superior a una hectárea, en que se deposita o se han depositado residuos sólidos en forma ilegal por períodos prolongados de tiempo y donde puede existir cobro por la disposición.

Microbasural. Terrenos con superficie inferior a una hectárea, en las cuales se deposita basura periódica o eventualmente. Por lo general, de acceso directo: calles, callejones, riberas de cursos superficiales, cercanos a poblaciones. Los microbasurales están asociados a procesos espontáneos de disposición periódica de residuos. Los acopios resultantes presentan bajos volúmenes de desechos, por lo que son fácilmente recolectados por el servicio de aseo municipal. Principalmente, están asociados a productos residuales del hogar, que no son recogidos por el servicio municipal.

Impactos ambientales. Desde el punto de vista de los impactos, éstos son múltiples afectando la calidad de vida de la población, especialmente de los sectores más pobres, debido a una notoria disminución de los niveles de habitabilidad de sus entornos y una mayor predisposición a enfermedades provocadas por vectores, principalmente roedores. En el ámbito ambiental, pueden ser un importante factor de emisión de contaminantes para la atmósfera, el agua y los suelos. En ambos casos, aunque mayor probabilidad en los vertederos ilegales, es factible encontrar residuos peligrosos.

La participación activa de la comunidad en actividades de limpieza y recuperación de microbasurales, así como la colaboración en la denuncia de sitios y vertidos ilegales son indispensables para la paulatina erradicación de los vertederos ilegales. También son oportunas la construcción de plazas públicas y parques en sitios que han sido limpiados y recuperados.

Aunque sin lugar a duda, la disposición clandestina de residuos es un tema de difícil control, una de las medidas concretas es exigir el cumplimiento de la ordenanza deurbanismo y construcción en lo referente a cercar los sitios eriazos o darles un uso alternativo. Como una acción paliativa surge el reciclaje, con el fin de dar un destino alternativo sustentable a cierto tipo de residuos sólidos que habitualmente se encuentran en los vertederos ilegales. En este sentido, también son pertinentes lossistemas municipales de retiro de enseres en desuso, residuos voluminosos, restos de poda y escombros de particulares por parte del municipio.

Otra alternativa viable es la disposición de escombros en pozos con planes de recuperación de suelos autorizados, mediante la implementación de un sistema de seguimiento de residuos, a través del sistema de autorización de obras municipales (SESMA, 2007).



3. Antecedentes específicos

3.1 Disposición final en la ciudad de Antofagasta

La disposición final de RSD en Antofagasta, se ha realizado desde el año 1966, en el sector La Chimba ubicado aguas abajo de la quebrada del mismo nombre, a 12 km al norte del centro de la ciudad (ver Figura 3.1).

En un comienzo se ocupó este sector en el desarrollo de una planta de tratamiento de residuos sólidos, con el financiamiento de CORFO, implementándose un sistema de reciclaje para el procesamiento de los residuos domiciliarios. Esta experiencia no continuó ya que el año 1970 el sitio pasa a manos de la administración municipal operando como un botadero de residuos, sin aplicar ningún tratamiento en su disposición.

Desde este periodo en adelante, este vertedero ha operado bajo la Dirección de Aseo del Municipio, ocupando maquinaria pesada para la construcción de trincheras o zanjas y el aprovechamiento de las depresiones naturales del terreno, llenándolas de residuos compactada en capas de 3 m y cubiertas con capas de 10 cm de material inerte extraído del mismo sector.

Respecto a la tenencia de este terreno, actúa una concesión de uso gratuito del Ministerio de Bienes Nacionales a la IMA por el Decreto Exento 038 del 26 de agosto de 1980 con una superficie de 940.225 m² ubicado en el sector agrícola La Chimba por periodos de 5 años renovables (ver Figura 3.2).



Figura 3.1. Ubicación vertedero municipal respecto a la ciudad de Antofagasta.



Figura 3.2. Vertedero municipal La Chimba, Antofagasta.

En la actualidad, la IMA ha realizado un mejoramiento al método de disposición de residuos, confinando los RSD en depresiones para luego ser compactados con maquinaria pesada y cubiertos por una capa de material inerte de aproximadamente 30 cm de espesor (ver Figura 3.3).



Figura 3.3. Frente de operaciones, vertedero municipal La Chimba.

Al llegar a la cota superior de la depresión, se sella con material de cobertura final de aproximadamente de 60 cm. Los residuos inertes o escombros de la construcción son derivados a otro sector dentro del vertedero y de esta forma utilizar mejor el espacio disponible.

La IMA licitó la recolección de los RSD en la zona sur, donde la empresa de servicios HIMCE LTDA. se adjudicó en mayo del 2003 el retiro de los RSD y el sector norte quedaría en manos del Departamento de Aseo de la IMA.

A partir de enero del 2006, se concesiona el sector norte y es administrado por la empresa de aseo industrial Casino S.A. incorporando nueva tecnología en el retiro de RSD a través de 1.150 contenedores especiales, evitando así la disposición en cualquier lugar provocando focos infecciosos y desorden en el ornato de la ciudad.

La autorización del vertedero de Antofagasta caducaba inicialmente en el año 2005, sin embargo, las autoridades de la época ampliaron el plazo, con fecha abril del 2007, pese a que oficialmente La Chimba es considerado un vertedero “ilegal” por no cumplir los requisitos establecidos en la resolución N° 2444/80 del Ministerio de Salud, respecto a las condiciones sanitarias mínimas que deben reunir los lugares de disposición final de RSD y asimilables.

En febrero del 2007 la IMA solicitó vía oficio al Seremi de Salud que los permisos fueran extendidos, ahora hasta el año 2010, para dar tiempo a la construcción de otro vertedero sanitario, pero la autoridad sanitaria dio como plazo final abril del año 2009.

3.2 Problemática y razones de cierre del vertedero

Existe un déficit de infraestructura adecuada para la disposición final de residuos en prácticamente todas las comunas de la región, ya que sólo la ciudad de Calama cuenta con un vertedero sanitario para manejar en forma adecuada sus RSD, lo cual significa que en la actualidad la mayoría de las instalaciones en la región, no cuentan con autorización sanitaria a excepción de las comunas de San Pedro de Atacama, Taltal y Calama.

De acuerdo a la información proporcionada por el Servicio de Salud de la región y a la percepción de la propia ciudadanía de Antofagasta, la actual gestión de los residuos sólidos domiciliarios presenta graves deficiencias en los sistemas de recolección, manejo y principalmente en su disposición final, así como también, existe una falta de conciencia y educación ambiental por parte de la comunidad, que dispone los residuos en puntos periféricos de la ciudad, creando microbasurales o sacando los RSD de los hogares en horas del día que no transitan los camiones recolectores, exponiendo los residuos a los animales domésticos que rompen y dispersan los residuos en la vía pública.

Respecto a la disposición final de los RSD y asimilables en el vertedero de La Chimba, se observan principalmente los siguientes problemas:

La existencia de personas ajenas al trabajo que se realiza dentro del vertedero, sobrepasando las medidas de seguridad impuestas por la Municipalidad, impidiendo el normal desarrollo de la cobertura diaria sobre los desechos y el desplazamiento de la maquinaria pesada.

Destrucción parcial del cierre perimetral favoreciendo el acceso de recolectores informales al vertedero.

Carencia de luminarias para el trabajo nocturno, provocando una entrega desordenada (fuera del frente de acopio) de los RSD por parte de las empresas recolectoras, aumentando el gasto y la carga de trabajo de la maquinaria pesada en trasladar esos residuos al lugar indicado.

Aproximación de áreas residenciales cercanas al sector del vertedero, provocando malestar a las personas que adquieren estas viviendas, debido al tránsito de camiones recolectores, proliferación de moscas y vectores infecciosos (ver Figura 3.3).

Ha sido sometido a varios sumarios sanitarios por el Servicio de Salud de Antofagasta para mejorar la actual operación, que es deficiente en términos de presencia de recolectores informales, de animales domésticos, de quemadas intencionadas de residuos, cobertura y compactación inadecuada de los residuos depositados, disposición de todo tipo de desechos, incluidos de origen industrial no doméstico.

La municipalidad ha financiado proyectos para mejorar esta situación implementando un tendido eléctrico con una extensión de 1,2 km desde la Av. Pedro Aguirre Cerda hasta el vertedero, el refuerzo en la vigilancia en los horarios punta, despeje semanal de la vía de acceso principal para el tránsito de los camiones recolectores de RSD y la asistencia de maquinaria pesada de apoyo a las ya existentes.



Figura 3.4. Vertedero municipal respecto al sector de La Chimba.

Referente a la situación de botaderos clandestinos dentro de la ciudad, el mismo departamento de aseo informa que sólo se ha determinado la existencia de algunos lugares a la altura del kilómetro 13 de la ruta 26 (sector Salar del Carmen), quebrada La Cadena (sector El Salto) y microbasurales en el sector de Roca Roja y quebradas de sectores altos de la ciudad.

3.3 Aspectos preliminares para ubicación de un nuevo vertedero sanitario de RSD y asimilables para Antofagasta

La solución ante la problemática del vertedero de La Chimba fue planteada en el año 2003, por los ingenieros de la Secretaria Comunal de Planificación (SECOPLAN) para la disposición final de los RSD y asimilables.

Dentro de las alternativas planteadas, inspeccionaron diversos lugares aledaños a la ciudad, analizando aspectos como la ubicación estratégica, vías de acceso, condiciones topográficas del terreno, material de cobertura existente, distancia respecto al centro de la ciudad y condiciones climáticas existentes para las 3 alternativas de sitios planteados.

De los diversos sitios visitados, sólo encontraron tres posibles sitios de ser convertidos en posibles vertederos sanitarios, estos fueron:

- a. Kilómetro seis, sector Salar del Carmen.
- b. Kilómetro doce o Alto Portezuelo, sector Salar del Carmen.
- c. Sector instalaciones de relaves de Soquimich, a 7 km de rotonda ruta 5.

Tras el análisis de los 3 sectores, SECOPLAN determinó en conjunto con otros servicios públicos externos (CONAMA, Servicio de Salud, SEREMI de Planificación y Coordinación) e internos (Alcaldía, Dirección de aseo, Dirección de medio ambiente y Dirección de obras municipales), que sólo la alternativa b Kilómetro doce (sector Salar del Carmen), cumple con las exigencias definidas por el Ministerio de Salud y a su vez, complementada con las siguientes consideraciones:

a) Factores ambientales

La cuenca hidrológica converge sus cauces secos a una quebrada que desemboca en dirección Este a la Depresión de Salar del Carmen. Ante eventuales flujos aluvionales, estos se depositarían en un terreno eriazos, donde no existen estructuras o viviendas construidas.

La ubicación permite estimar que si la ciudad crece en cualquier sentido, el nuevo vertedero sanitario siempre estaría al centro de ésta y alejada de cualquier asentamiento humano.

El sector no está definido como área protegida o santuario de la naturaleza y tampoco se identifica como sitio arqueológico.

No presenta flora y fauna autóctona de la zona que puede ser afectada por el proyecto o en el transcurso de éste.

No se aprecia la existencia de afluentes de agua, tanto superficiales como subterráneos.

b) Factores económicos

La ubicación del terreno se encuentra próxima a 12 km desde el borde de la ciudad, medidos por la ruta 26 (quebrada Caracoles). Además, cuenta con un acceso alternativo de tierra, que serpentea por las piscinas decantadoras desde la ruta 26 internándose 7,5 km al Este. Debido a la ubicación central respecto a la ciudad, la distancia de transporte de los residuos al sector de Alto Portezuelo, se encuentra equidistante tanto de la zona sur y zona norte de Antofagasta, a diferencia del sector La Chimba que se encuentra en el extremo norte de la ciudad.

El área contempla aproximadamente de 40 Há útiles y con posibilidades de extensión a terrenos colindantes.

El plano regulador comunal vigente designa al sector como zona ZUDC 09, que abarca áreas de quebrada Caracoles (Salar del Carmen) y sector La negra. Esta

clasificación la define como una zona de reserva para uso industrial de densidad predial media a baja.

Según el plano de pertenencias mineras de SERNAGEOMIN, señala hasta al mes de junio del año 2007, que el sector elegido no se encuentra afecto a ninguna pertenencia minera vigente.

c) Factores Técnicos

Según a la morfología del terreno, se puede observar un terreno sinuoso y de alta pendiente, que favorece el escurrimiento por gravedad de posibles líquidos percolados que necesiten ser drenados a un lugar de tratamiento. Esta condición adquiere real importancia, ya que la cuenca evacua sus escurrimientos hacia un sector deshabitado de la Depresión del Salar del Carmen. Respecto a los antecedentes preliminares del tipo de suelo se identifica arena gravosa a grava arenosa cementada de compacidad alta.

Existe en los sectores aledaños al terreno, material de cobertura de calidad y abundancia para ser usado posteriormente en el vertedero de residuos.

Se identifican sólo riesgos de tipo aluvial o de estabilidad de taludes derivados de su emplazamiento en ladera de cerros y quebradas.

En apoyo a los antecedentes preliminares y lineamientos expuestos por SECOPLAN, se desarrolla a continuación el análisis de las características del lugar y de acuerdo a estos parámetros, se determinará un adecuado prediseño del vertedero sanitario de RSD y asimilables.



4. Características del lugar

4.1 Ubicación geográfica

La Región de Antofagasta está ubicada en el norte de Chile, posee una superficie de 126.440 km², que representa un 16,7% del territorio nacional continental, constituyéndose en la segunda región con el territorio más amplio del país. Geográficamente se ubica entre los 20° 5' y 26° 5' de Latitud Sur y desde 67° Longitud Oeste hasta el océano Pacífico (ver Figura 4.1).

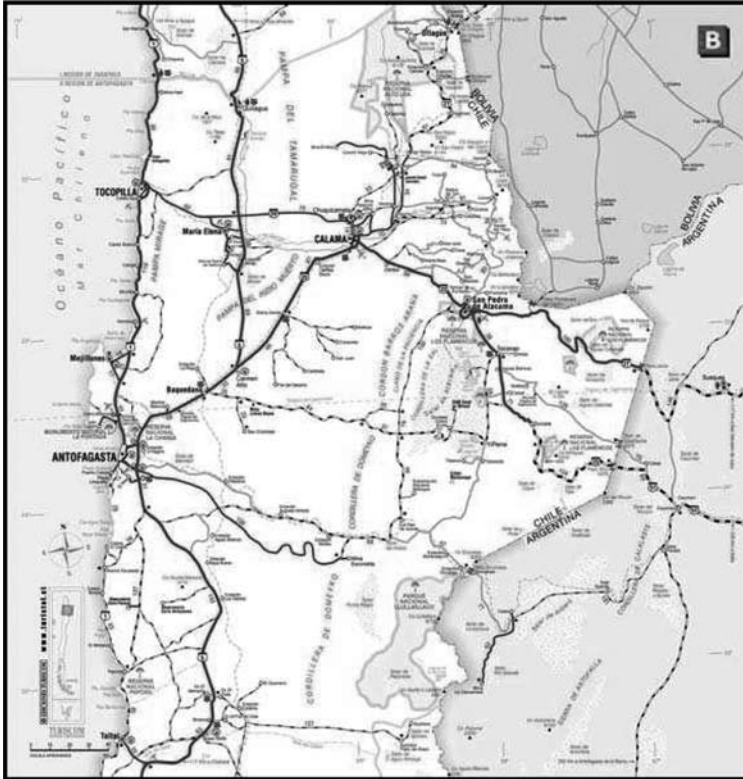


Figura 4.1. Mapa descriptivo de la Región de Antofagasta, Chile (SERNATUR).

La región está conformada por 3 provincias y 9 comunas, siendo la capital regional la ciudad de Antofagasta. Se encuentra distante a 1.361 km al norte de Santiago, a 211 km de Calama y a 186 km de Tocopilla. Estas dos últimas ciudades, junto con Antofagasta, constituyen los principales centros poblados de la región.

El área en estudio se encuentra ubicada aproximadamente a 16 km al noreste de la ciudad de Antofagasta, en el sector superior de Portezuelo y al poniente de la Depresión del Salar del Carmen. Debido a que el área carece de un nombre que lo identifique, en esta memoria se le denominará Alto Portezuelo.

La Tabla 4-1 muestra su ubicación en coordenadas UTM.

Vértice	Norte (*)	Este (*)
A	7.384.900	366.300
B	7.384.900	367.000
C	7.384.200	367.000
D	7.384.200	666.300

(*) Coordenadas medidas con GPS de frecuencia simple.

Tabla 4-1. Coordenadas UTM del sector Alto Portezuelo



Figura 4.2. Imagen satelital de Antofagasta y ubicación área en estudio.



Figura 4.3. Imagen satelital de Antofagasta (Vista oriente del área en estudio).



Figura 4.4. Imagen satelital de Antofagasta (Vista poniente del área en estudio).

4.2 Antecedentes demográficos

La Región de Antofagasta, según proyecciones realizadas por el INE al año 2006, registra un total de 547.933 habitantes, altamente concentrados en la comuna de Antofagasta con 341.942 habitantes (62,4% de la población regional). Además, la población de la región corresponde al 3,26% de la población total nacional y su densidad poblacional alcanza a 3,9 habitantes por km². Presenta un crecimiento de población intercensal promedio anual de 2,0%. Esto, ya que durante el período comprendido entre los censos de 1992 y 2002 su población creció en un 20,3%, siendo la segunda región con mayor crecimiento poblacional del país, ubicándose 7 puntos por arriba del crecimiento poblacional de Chile. Esta población es eminentemente urbana, ya que sólo 11.438 personas, que representan el 2,1% de la población total regional, habitan en zonas rurales. Por lo que el 97,9% de sus habitantes responde a un patrón de población urbana (INE, 2002).

Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Total	273.796	281.235	288.663	296.099	303.538	309.956	316.389	322.819	329.223	335.672	341.942
Hombres	140.365	144.600	148.833	153.070	157.312	160.704	164.116	167.531	170.944	174.342	177.640
Mujeres	133.431	136.635	139.830	143.029	146.226	149.252	152.273	155.288	158.279	161.330	164.302

Tabla 4-2. Proyección población total, hombres y mujeres en la comuna de Antofagasta (INE, 2002)

4.2.1 Proyección poblacional de Antofagasta 2007 -2037

Debido a la necesidad de analizar en el tiempo la generación de RSU de los habitantes de Antofagasta, se encomendó un estudio de proyección poblacional para el año 2037, a la Facultad de Economía y Administración de la Universidad Católica del Norte (ver Anexo B).

En este estudio se plantearon diversos modelos econométricos, que consideraron como base de información, datos entregados por el INE, tales como:

Evolución de la población total.

Crecimiento de población respecto al año base (1990).

Distribución total por edad, salud, educación y participación electoral.

Tasa de inmigración, defunción y natalidad.

Efectos de variables económicas, tales como PIR per cápita y el nivel de inversión efectiva.

A continuación en Figura 4.5, se muestra los resultados finales de dicha proyección,

teniendo para el año 2037 una población total de 606.614 habitantes para la comuna de Antofagasta.

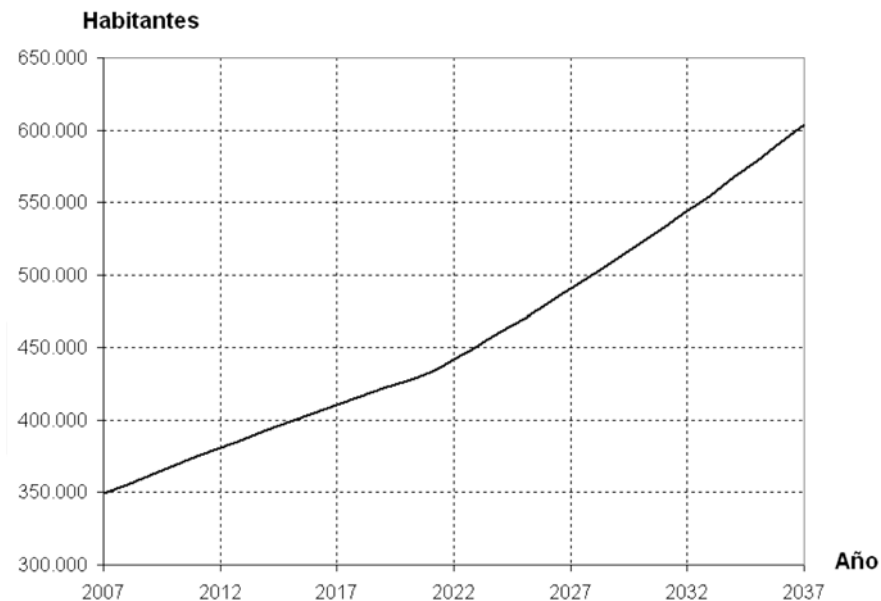


Figura 4.5. Proyección poblacional de Antofagasta 2007 – 2037.

4.3 Clima y meteorología

4.3.1 Clasificación climática

La costa del norte grande de Chile se encuentra sometida a un clima de extrema aridez que se origina en complejos mecanismos de interacción océano-atmósfera-tierra (Lettau y Costa, 1978; Rutllant, 1985). En el contexto regional, el Anticiclón Subtropical del Pacífico Suroriental (APSO) somete a gran parte del margen Oeste de América del Sur a una gran estabilidad atmosférica, originada por la inversión de subsidencia o descenso de aire seco y cálido que contrasta con el aire marino fresco y húmedo (ver Figura 4.6).

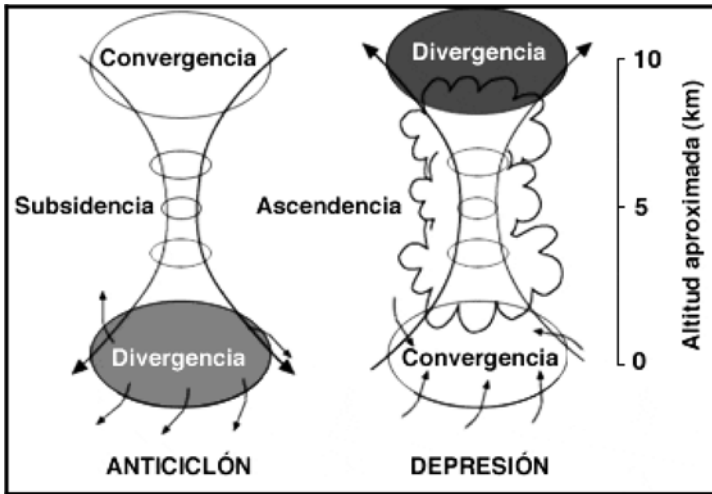


Figura 4.6. Convergencia y divergencia en superficie y altura. (Cuadrat y Pita, 1997).

La permanencia durante todo el año de este rasgo de circulación atmosférica de gran escala, limita o atenúa el desplazamiento hacia el norte de perturbaciones frontales provenientes del cinturón de los vientos del oeste en latitudes medias y altas. La circulación atmosférica superficial, asociada al borde septentrional y oriental de este anticiclón, no sólo impulsa la corriente de Humbolt sino que además genera procesos de surgencia o afloramiento costero favoreciendo la persistencia de bajas temperaturas en la superficie del mar, que a su vez refuerzan la estabilidad asociada al APSO. Una capa de inversión térmica caracteriza en forma casi permanente la atmósfera de la costa del norte grande cercana a los 1.000 m de altitud (Rutllant et al., 1998).

Por otra parte la Cordillera de Los Andes, con más de 4.000 m, constituye una barrera para la humedad proveniente del océano Atlántico y limita las lluvias de verano en el altiplano (invierno Boliviano) a ocasionales lloviznas en la región preandina (Rutllant et al., 1998).

De esta forma, el desierto más árido del planeta se caracteriza en el área costera por el desarrollo de abundante nubosidad baja (camanchaca), temperaturas medias diarias entre 12°C (en invierno) y 21°C (en verano), y precipitaciones anuales promedio de 3 a 4 mm. La nubosidad baja, limitada en su desarrollo vertical por la base de la inversión térmica, es generalmente retenida por la Cordillera de la Costa que, con 1.000 a 2.000 m.s.n.m., constituye una eficiente barrera a la penetración de humedad hacia el desierto interior. No obstante, perturbaciones atmosféricas atrapadas en la costa producen periódicamente entradas de camanchaca por el levantamiento de la base de inversión térmica (Rutllant et al., 1998).

El área de interés se encuentra inserta dentro de una angosta faja costera clasificada

por Papadakis, como clima de “Desierto tropical marino” de acuerdo al Mapa Agroclimático de Chile (INIA, 1979) y clasificada por Köppen como clima “Desértico con nublados Abundantes” (I.G.M., 1989).

Como indica su clasificación BWn (ver Figura 4.7), el clima de esta zona se caracteriza por una escasa oscilación térmica diaria en torno a los 18°C, un régimen hídrico de desierto absoluto y una elevada nubosidad y humedad relativa, a diferencia del clima de desierto interior, de cielos limpios, gran sequedad atmosférica y fuertes oscilaciones diarias de temperatura con la consiguiente alta contra radiación nocturna.

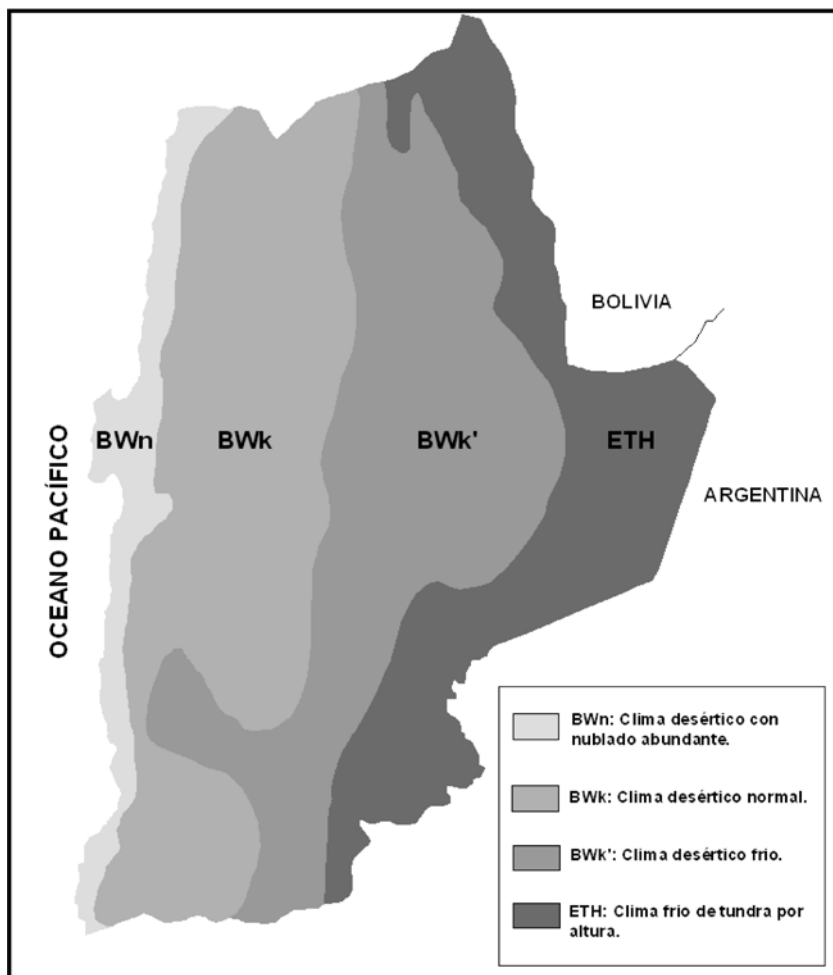


Figura 4.7. Clasificación climática modificada de Köppen para la Región de Antofagasta.

Específicamente, respecto a la presencia de flora en el área de estudio, no se observan especies botánicas, sólo predominan terrenos áridos donde eventualmente tras alguna precipitación florecen algunos conjuntos de plantas, pero desaparecen al terminar la humedad de los suelos.

4.3.2 Parámetros meteorológicos

Con el objetivo de establecer la caracterización general meteorológica de la zona de Alto Portezuelo, se presentan registros a nivel mensual de distintas estaciones ubicadas en torno al área en estudio.

Se incorporaron registros de las siguientes estaciones:

Estación	Latitud	Longitud	Elevación (m.s.n.m.)	Propiedad	Parámetros	Periodo de registro
UCN (Antofagasta)	23° 40'	70° 24'	44	UCN	Pp - T - H - E	1990 – 2006(*)
Portezuelo	23° 41'	70° 16'	556	Dr. Alcayaga	T - V	1949 - 1963
Estación Uribe	23° 34'	70° 15'	580	GEN	T - H - E	1988 - 1990

(*) La precipitación (Pp) considera el período 1969 – 2006.

Tabla 4-3. Estaciones meteorológicas y caracterización del registro.

Debido a la ubicación de Alto Portezuelo y a la escasez de registros in situ, se analizaron las estaciones UCN, Uribe y Portezuelo para obtener una triangulación y de esta forma interpolar las variables meteorológicas que inciden en el lugar (ver Anexo A).

4.3.2.1 Temperatura media

Se observa un régimen térmico bastante homogéneo en su variación estacional. Debido al efecto regulador que provoca el mar, su temperatura media es entorno a los 18°C. Las menores temperaturas se presentan durante los meses de invierno (junio, julio y agosto), donde alcanza valores medios mínimos en torno a los 12°C. Aumenta conforme avanzan los meses de primavera, hasta alcanzar los mayores valores en verano (enero y febrero), donde se mantiene en una media máxima de 21°C, disminuyendo gradualmente hasta la entrada de otoño (ver Figura 4.8).

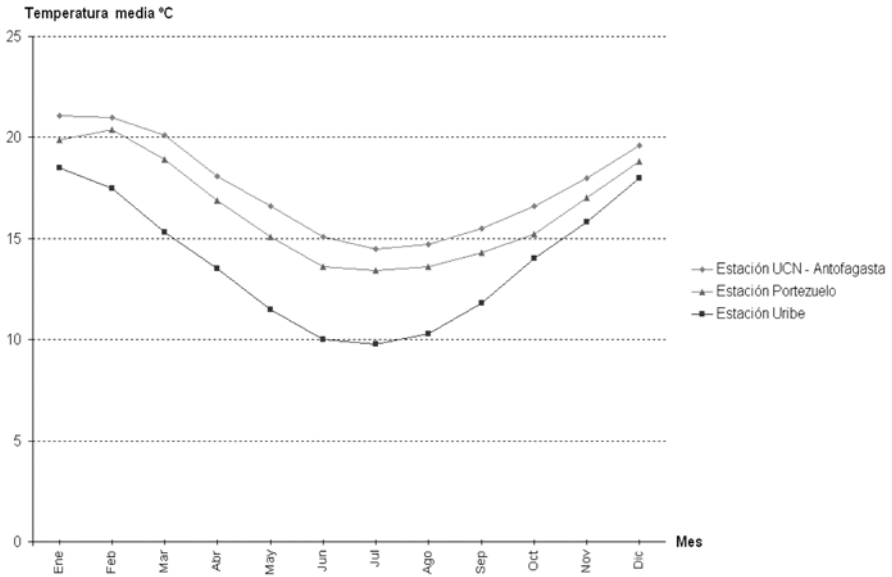


Figura 4.8. Gráfico de temperatura media.

Se estima una temperatura media anual en el área de estudio en torno a los 14°C, ya que en una distribución vertical de temperatura, ésta decrece en la atmósfera a razón de 0,65°C por cada 100 m aproximadamente (Monsalve, 1999). Eventualmente, es posible que por razones de altitud y viento, en los periodos fríos se presenten temperaturas cercanas a 0°C.

4.3.2.2 Humedad relativa

Respecto a las mediciones de humedad relativa media mensual de la estación UCN, se observa una distribución homogénea con un promedio en torno al 72%, esto debido principalmente a su ubicación en zonas costeras, su dependencia directa con la temperatura del aire, vientos y calor específico del mar.

En cambio, las mediciones de humedad relativa media mensual de la estación Uribe, muestra un contraste significativo con un promedio anual del 60% (ver Figura 4.9).

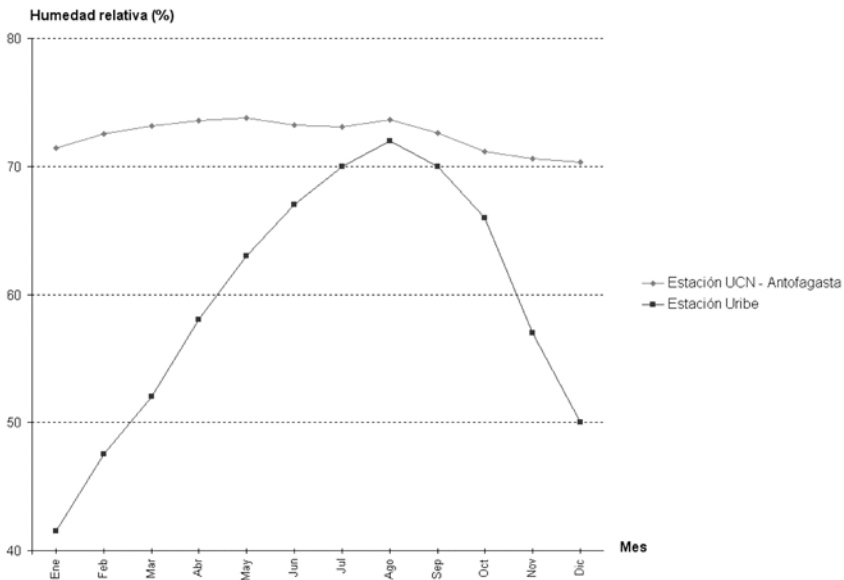


Figura 4.9. Gráfico de humedad relativa.

Las diferencias entre los valores de la estación de la franja costera y los de estación Uribe dejan de manifiesto el efecto de la Cordillera de la Costa impidiendo el ingreso de la humedad costera en cantidad significativa hacia el interior.

4.3.2.3 Evaporación

La evaporación mensual promedio presenta una similitud con la distribución de temperaturas y una estrecha relación con la radiación solar. Es por esto que para la estación UCN se observa un notorio incremento en temporada de verano de 5,6 mm/día con un promedio anual de 3,8 mm/día.

Pero notoriamente más elevadas, se aprecian las tasas de evaporación de estación Uribe, esto debido a la escasa nubosidad y alta radiación durante el día, con una fluctuación entre los 10,9 mm/día y 4,8 mm/día, entregando un promedio anual de 7,5 mm/día (ver Figura 4.10).

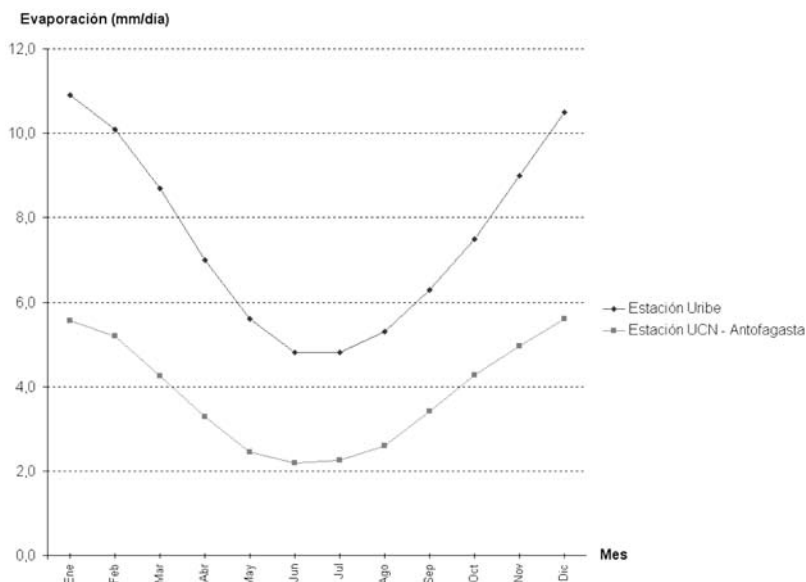


Figura 4.10. Gráfico de evaporación mensual media.

4.3.2.4 Velocidad del viento

En relación a la velocidad del viento del área de Alto Portezuelo, no se encontraron mediciones realizadas en el sector. Sólo se logró acceder a dos registros históricos, sector de Portezuelo (Anexo A-9) y sector Planta Altonorte, ambos ubicados en la misma longitud geográfica.

Debido a la necesidad de tener una aproximación de las características del viento, se realizaron mediciones de velocidad con un anemómetro en temporada de verano (febrero, 2007), durante el periodo de una semana.

Se observan en estas mediciones, viento uniformemente bajo por la mañana proveniente del Este hasta cercana las 11:00 hrs., para luego comenzar un aumento sistemático y elevado de ráfagas, hasta alcanzar valores máximos cercanos a los 12 m/seg proveniente del Oeste.

Si se realiza una comparación de este resultado con la escala anemométrica de Beaufort, esta velocidad de viento se cataloga como grado 6 y definida como brisa fuerte (Anexo A-10).

Según los estudios de viento realizados en el sector de la Planta Altonorte y sector de bajo Portezuelo, las velocidades máximas se presentarían en verano (enero y febrero) con valores promedios en torno a 7 m/seg (Planta Altonorte), teniendo velocidades mínimas promedios en invierno (julio) de 2,5 m/seg.

Estos resultados concuerdan con la generación de viento, ya que tiene directa relación con la radiación solar y esta disminuye en temporadas de invierno (Alcayaga, 2007).

4.3.2.5 Precipitaciones

Para este efecto, se analizaron las mediciones efectuadas entre los años 1969-2006 por la estación UCN.

En Anexo A-7 se presentan los registros totales de precipitaciones anuales de la estación pluviométrica de la Universidad Católica del Norte.

En la Tabla 4-4 se detallan los promedios mensuales del periodo 1969-2006.

Precipitaciones (mm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom Año
Prom mensual	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	1,4	0,8	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	3,3

Tabla 4-4. Registro de precipitaciones en promedio mensual y anual (1969-2006).

En la Figura 4.11 se puede deducir que las precipitaciones históricas se presentan en el periodo de invierno (junio, julio, agosto) teniendo un promedio mensual máximo de 1,36 mm.

El promedio histórico anual es de 3,3 mm teniendo su máximo registro el año 1991 con 42 mm (ver Figura 4.12)

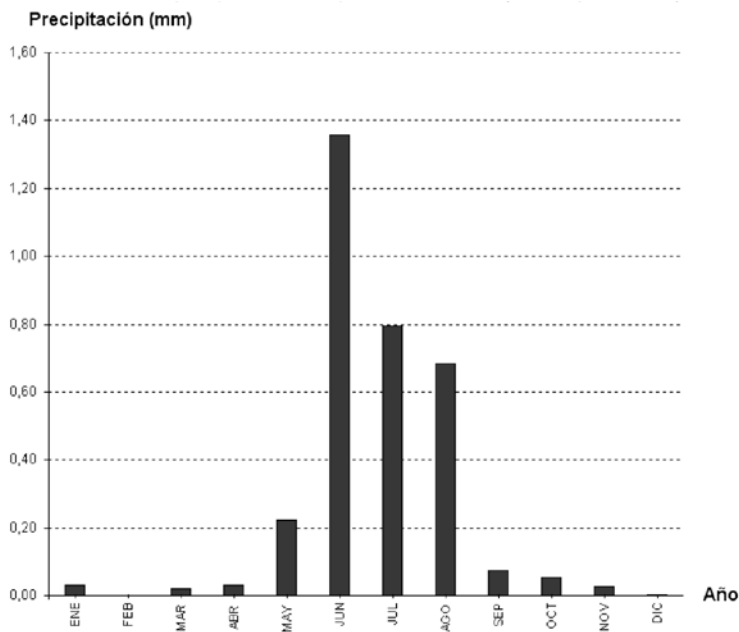


Figura 4.11. Gráfico de precipitaciones en promedio mensual.

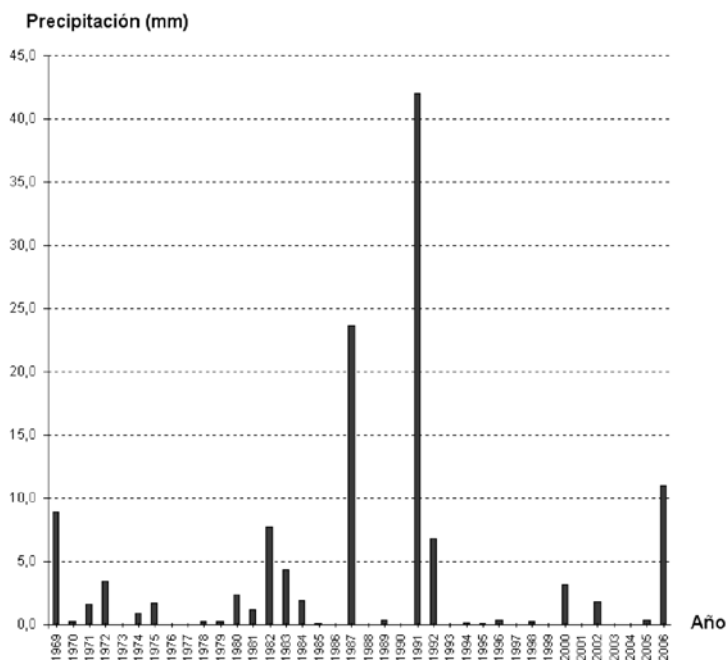


Figura 4.12. Gráfico de precipitaciones en promedios anuales.

Se observa que las precipitaciones son esencialmente de carácter errático y muy variable tanto en el tiempo como en el espacio. Es por esto, que debido a la altitud y ubicación del mismo, los registros utilizados sólo reflejarán una aproximación en la hidrología del área de Alto Portezuelo.

4.4 Hidrología

El análisis del comportamiento hidrológico de la zona es significativo para estudiar el ingreso de aguas superficiales en el vertedero sanitario y su participación en el proceso de degradación de los residuos, generación de líquidos lixiviados y biogás. En el sector alto de la ciudad de Antofagasta, los abanicos aluviales son alimentados por los aportes de una serie de quebradas mayores que drenan la Cordillera de la Costa, entre las cuales destacan por el área de drenaje de sus hoyas hidrográficas, La Chimba (25,6 km²), Salar del Carmen (33 km²), La Cadena (21 km²) y La Negra (43 km²) (Vargas et. al, 2000).

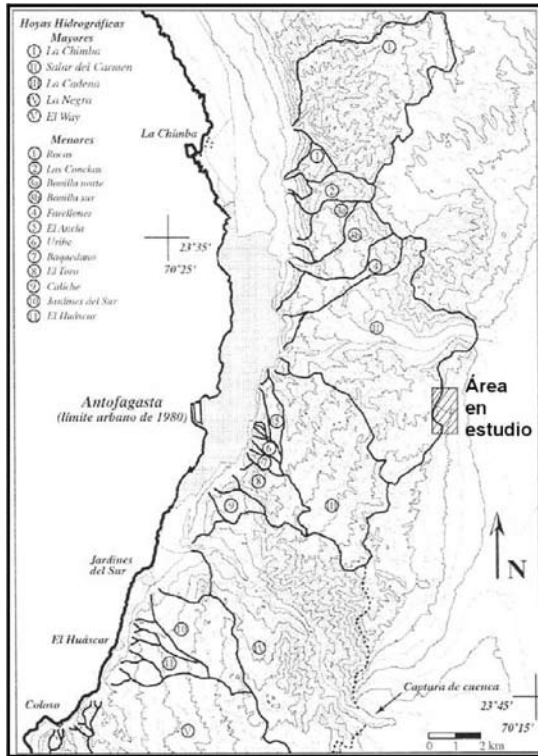


Figura 4.13. Límites de hoyas hidrográficas que drenan sus escurrimientos a la ciudad de Antofagasta y alrededores (Vargas et. al, 2000).

Las quebradas menores que desembocan en el sector central de la ciudad se asocian a hoyas hidrográficas de menos importancia areal, pero con un fuerte desnivel topográfico relacionado al escarpe costero, como las quebradas Farellones (3,8 km²), El Ancla (1,3 km²), Baquedano (0,6 km²), Uribe (0,5 km²) y El Toro (3,2 km²). En este mismo sector, los depósitos aluviales se caracterizan por una matriz de mayor granulometría, dada la menor disponibilidad de sedimentos eólicos en las áreas de drenaje (Vargas et. al, 2000).

A diferencia de la gran cuenca hidrográfica del Salar del Carmen que drena sus escurrimientos hacia la ciudad, el área en estudio está compuesta por una hoya hidrográfica que drena las eventuales escorrentías en dirección Noreste (Depresión del Salar del Carmen). Esta cuenca se origina en las cumbres de los cerros que están inmediatamente al sur del sector y sus elevaciones máximas están en el orden de los 690 m.s.n.m. disminuyendo su altura a 625 m.s.n.m. en los cerros que rodean y tributan a la cuenca.



Figura 4.14. Área en estudio de Alto Portezuelo.

El área drenante de 321.951 m² (32,2 Ha) y un perímetro de 2.328 m, se caracteriza por un relieve sinuoso donde se observan trazas antiguas de escurrimientos aluviales menores que fueron afluentes de 2 escurrimientos principales (ver Figura 4.14).

Debido a las condiciones climáticas y orográficas, el lugar y el entorno cercano, carecen de vegetación y de escorrentías superficiales, como ríos o arroyos y cuerpos

de agua, como lagos o charcos (es decir, una cuenca arreica).

4.4.1 Características hidrológicas de la cuenca

Para el análisis hidrológico de la cuenca se considerará que cada gota que entra, sale por ésta misma (equilibrio hidrológico).

Para efectos de drenaje, se asume como cauces de primer orden, aquellos que no poseen tributarios, cauces de segundo orden, a los que nacen de la unión de dos cauces de primer orden o de un primer orden con uno de segundo orden y de igual forma, para los siguientes cauces prevaleciendo el respeto por el cauce de mayor orden. Para la obtención del índice de pendiente, se asume que las cotas dibujadas en el plano tienen una diferencia de altura de 1 m y para el cálculo de pendiente media de Horton se asume sólo cotas con diferencias de 5 m.

4.4.1.1 Parámetros de forma

Área de la cuenca: $321.951,6125 \text{ m}^2 = 0,321 \text{ km}^2$

Perímetro: $2.328,4520 \text{ m} = 2,329 \text{ km}$

L_a : 0,939 km (longitud del cauce principal)

L_v : 0,930 km (longitud del valle)

L_c : 0,899 km (longitud de un extremo a otro del cauce principal)

Coefficiente de Gravelius:

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0,28 \cdot \frac{2,329}{\sqrt{0,321}} \Rightarrow K_c = 1,151 \quad (\text{ecc. 4.1})$$

Coefficiente de forma de Horton:

$$K_f = \frac{A}{L_a^2} = \frac{0,321}{0,939^2} \Rightarrow K_f = 0,364 \quad (\text{ecc. 4.2})$$

4.4.1.2 Parámetros relacionados con el drenaje

Cursos efimeros completos		
Orden	Nº	Distancia (km)
1er orden	31	3,446
2do orden	8	1,413
3er orden	2	0,795
Total		5,656

Tabla 4-5. Orden de los cursos y longitudes.

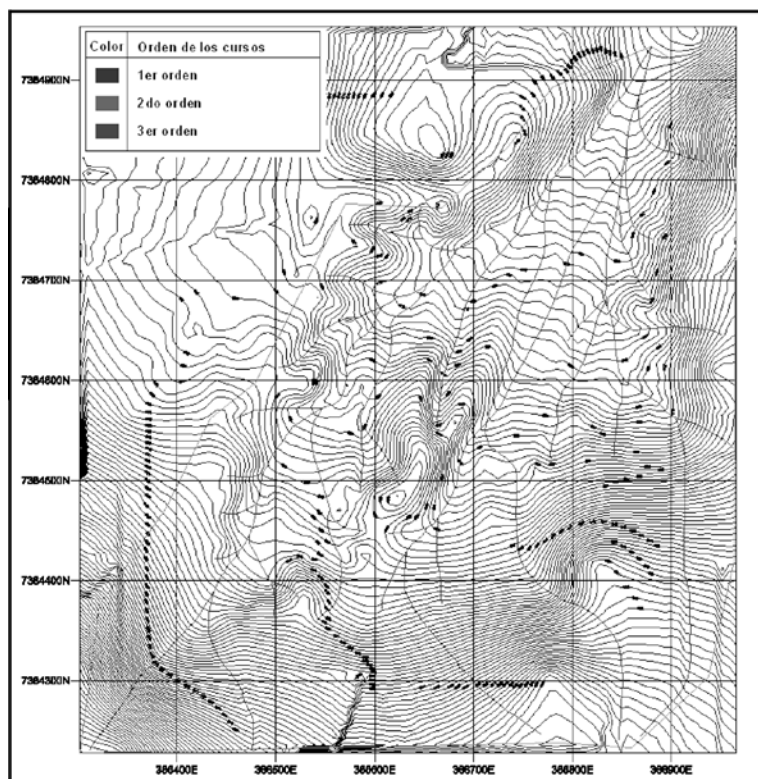


Figura 4.15. Cursos dentro de la cuenca.

Extensión media de la escorrentía superficial:

$$I = \frac{\text{Area total de la hoya}}{4 \cdot \text{Longitud total de cursos}} = \frac{A}{4L} = 0,085 \text{ km} \quad (\text{ecc. 4.3})$$

Densidad de drenaje:

$$D_d = \frac{\text{Longitud total de cursos}}{\text{Area total de la hoya}} = \frac{5,656}{0,321} \Rightarrow D_d = 17,620 \text{ km}^{-1} \quad (\text{ecc. 4.4})$$

Frecuencia de drenaje:

$$F_d = \frac{N^\circ \text{ total de cursos}}{\text{Area total de la hoya}} \Rightarrow F_d = 127,726 \text{ km}^{-2} \quad (\text{ecc. 4.5})$$

Coefficiente de torrencialidad:

$$F_t = \frac{N^\circ \text{ de cursos de 1}^{\text{er}} \text{ orden}}{\text{Area total de la hoya}} \Rightarrow F_t = 96,573 \text{ km}^{-2} \quad (\text{ecc. 4.6})$$

Coefficiente de sinuosidad topográfica:

$$S_t = \frac{L_v}{L_a} \Rightarrow S_t = 0,990 \quad (\text{ecc. 4.7})$$

Coefficiente de sinuosidad hidráulica:

$$S_h = \frac{L_c}{L_a} \Rightarrow S_h = 0,957 \quad (\text{ecc. 4.8})$$

4.4.1.3 Parámetros relacionados con el relieve

Curva hipsométrica:

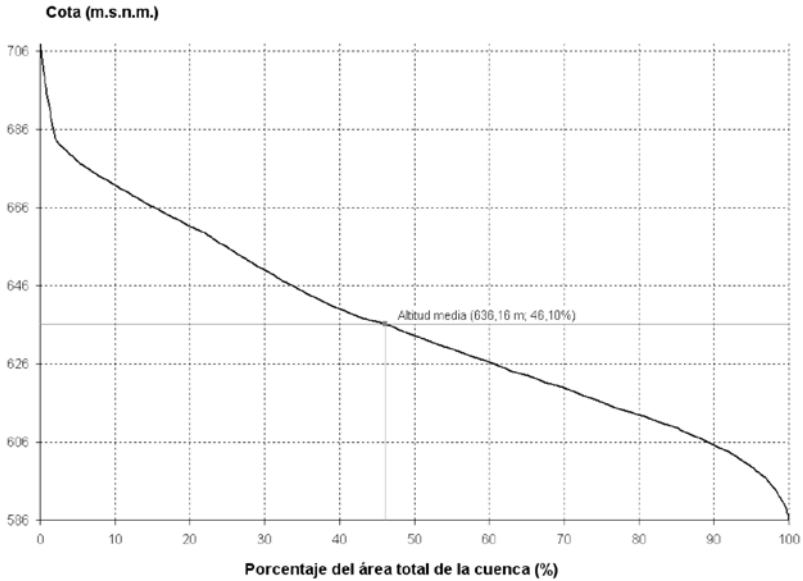


Figura 4.16. Curva hipsométrica de la cuenca.

Rectángulo equivalente:

$$\text{Largo} = L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{(1,12)^2}{K_c^2}} \right] \Rightarrow L = 0,716 \text{ km} \quad (\text{ecc. 4.9})$$

$$\text{Ancho} = l = \frac{A}{0,716} \Rightarrow l = 0,448 \text{ km} \quad (\text{ecc. 4.10})$$

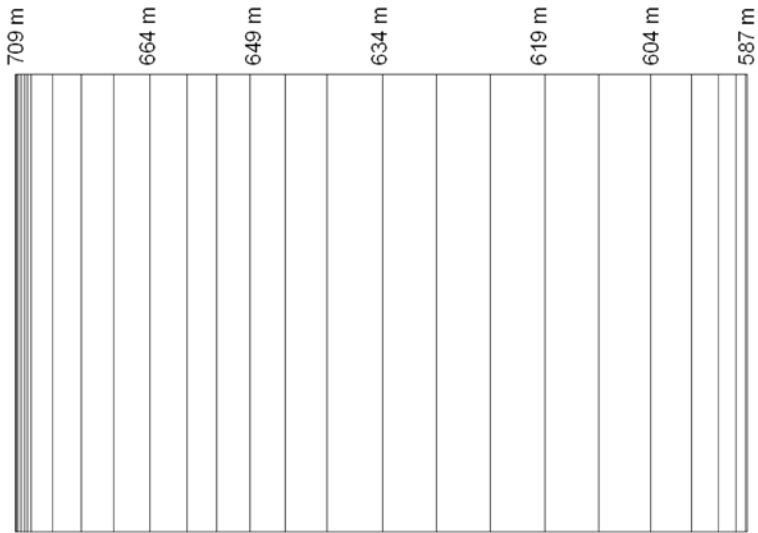


Figura 4.17. Rectángulo equivalente de la hoja en estudio.

Relación Hipsométrica:

$$R_H = \frac{S_s}{S_b} = \frac{\text{Área sobre la curva}}{\text{Área bajo la curva}} = \frac{23,509}{16,190} = 1,452 \quad (\text{ecc. 4.11})$$

Índice de pendientes:

$$m = \frac{h}{L} = \frac{\text{desnivel máximo}}{\text{long. mayor del rect. eq.}} = \frac{0,123}{0,716} \Rightarrow m = 0,172 \quad (\text{ecc. 4.12})$$

Pendiente media de la cuenca según Horton:

$$m = \frac{C \times \sum L_i}{A} = \frac{5 \cdot 12996,7812}{321951,6125} \Rightarrow m = 0,2018 \quad (\text{ecc. 4.13})$$

Donde:

L_i = Longitud de la curva i

C = desnivel entre curvas (5 m)

A = Área de la cuenca

Pendiente media de la cuenca según Benson:

$$m = \frac{H_a - H_b}{L_{ab}} = \frac{657 - 592}{575,8819} \Rightarrow m = 0,1129 \quad (\text{ecc. 4.14})$$

Donde:

Ha = Elevación del punto situado a 85% de la salida del curso principal.

Hb = Elevación del punto situado a 10% de la salida del curso principal.

Lab = Distancia entre a y b siguiendo el curso principal.

4.4.1.4 Pendiente media del cauce principal

Pendiente por cota

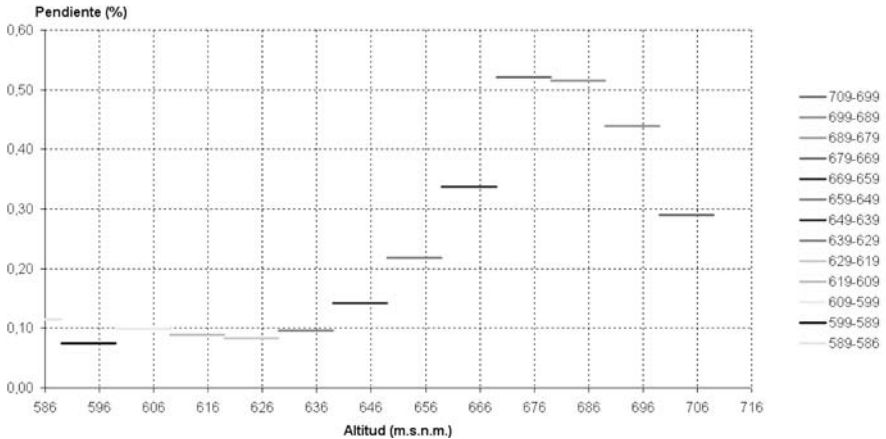


Figura 4.18. Gráfico de pendientes por cada 10 m de altitud del cauce principal.

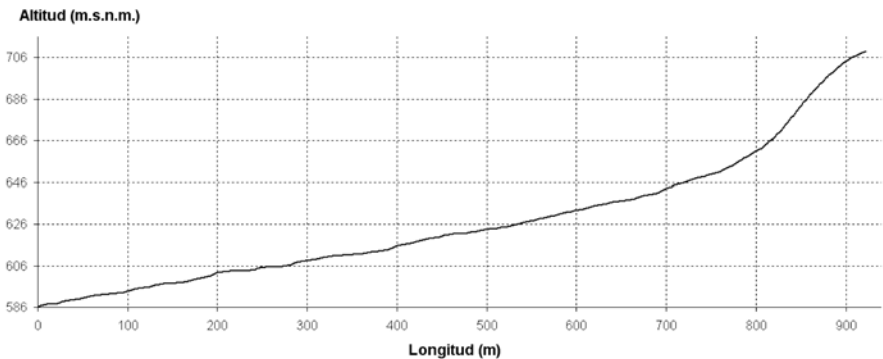


Figura 4.19. Perfil gráfico del cauce principal.

Pendiente por tramo:

El curso de mayor longitud de la cuenca (por atravesar éste toda la hoya) está compuesto por 3 tramos (1ro, 2do y 3er orden), obteniendo en cada uno de ellos una pendiente media.

Pendiente del curso principal					
Orden	Cotas		Distancia (m)	Desnivel (m)	Pendiente media (m/m)
	Inicio	Fin			
1 ^{er}	709	646	201,3	63	0,313
2 ^o	646	637	66,9	9	0,135
3 ^{er}	637	586	636,1	51	0,080

Tabla 4-6. Resumen cálculo de pendiente por cota en el cauce principal.

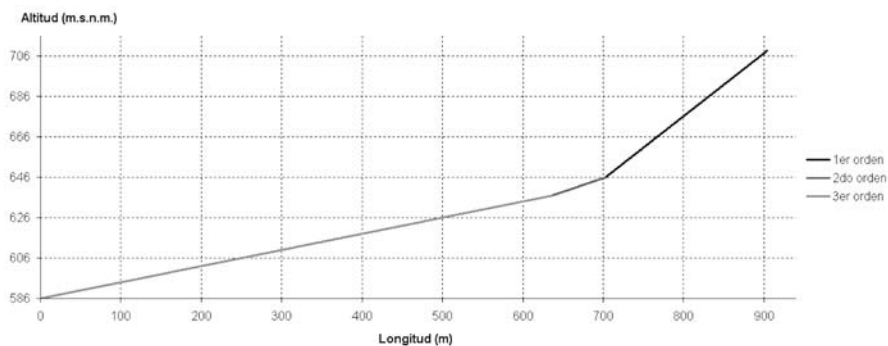


Figura 4.20. Perfil geográfico del cauce principal por ordenes de cauce.

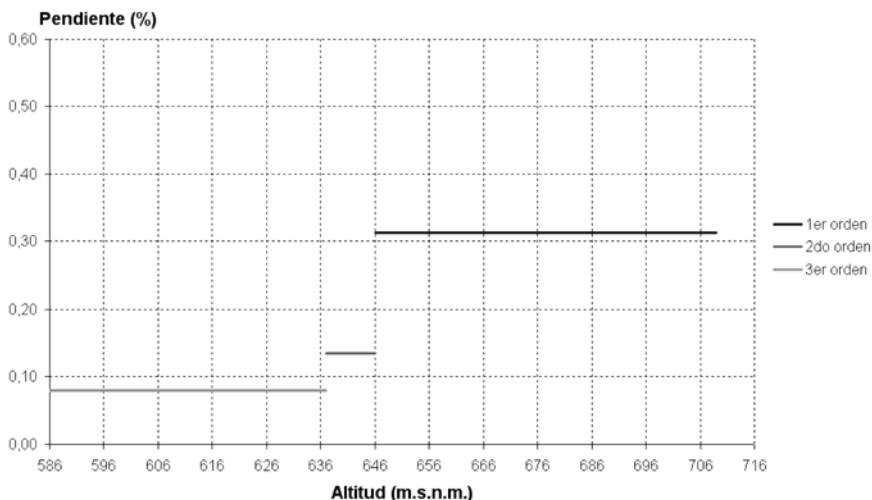


Figura 4.21. Pendientes del cauce principal por ordenes de cauce.

4.4.1.5 Análisis de resultados

Esta cuenca hidrográfica presenta un área de 0, 321 km² y se clasifica como una cuenca pequeña en comparación con hoyas vecinas, como la Hoya de Salar del Carmen de 33 km². Se caracteriza por tener forma regular, tendiendo a ser circular y un factor de forma bajo, que indica estar menos sujeta a crecidas. La cuenca posee un área de drenaje alto, compuesto por cursos efímeros completos que sólo se desarrollan durante o inmediatamente después de los periodos de precipitación, tributando sus escurrimientos superficiales a un cauce principal de 0,939 km de extensión. Posee una extensión de escorrentía superficial media de 0,085 km, con un trazado más bien recto.

La influencia del relieve sobre la respuesta hidrológica de la cuenca es importante, puesto que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades del agua en las corrientes y menor será el tiempo de concentración de la cuenca.

La curva hipsométrica muestra una cuenca que se encuentra aún en desarrollo de formación con una altitud media de 636,16 m.s.n.m. y una relación hipsométrica de 1,45, que representa el estado dinámico de la cuenca. Cuando esta relación es cercana a la unidad, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico.

A través del rectángulo equivalente (ver Figura 4.17) queda de manifiesto la influencia de las características de la hoya sobre la escorrentía, esta muestra en corte una simulación de la distribución de alturas de la curva hipsométrica de la hoya.

El gradiente de pendiente del relieve se estimó bajo tres autores, teniendo mayor exactitud y representación, la pendiente de Horton con un 20,18%. Por lo tanto, se clasifica como un terreno accidentado y de pendiente alta. Ésta posee gran importancia ya que, a través del flujo de agua, se afecta indirectamente el tiempo de respuesta de la cuenca.

Finalmente en los gráficos de pendiente del cauce principal o cauce de mayor longitud, se identifican cauces de 1ro, 2do y 3er orden con pendientes de 30%, 13,5% y 8% respectivamente, teniendo este último la mayor longitud con 636 m.

4.4.2 Precipitaciones máximas

En relación a los escasos registros de precipitación en la zona y de acuerdo a los antecedentes entregados por la estación UCN, se decidió utilizar éste último, ya que posee mayor cercanía al lugar de estudio y su registro cuenta con 38 años de mediciones en precipitaciones. No obstante, a pesar que esta estación se ubica a 44 m.s.n.m. (zona costera), se estima que para el sector Alto Portezuelo, se esperen montos similares a los registrados en el borde costero, aunque pudiera esperarse un incremento de las precipitaciones en función de la elevación.

En relación a las precipitaciones máximas, se observa que existe una estrecha relación entre los montos anuales y los correspondientes a la precipitación máxima diaria. Esta situación se debe principalmente a la baja cantidad de eventos que se registran, de tal forma que el total anual de precipitación corresponde en la mayoría de los casos a uno o dos eventos registrados en el año.

A su vez, la duración de los eventos rara vez excede las 24 horas, por lo que, de acuerdo a los registros disponibles, las precipitaciones máximas en la zona se pueden representar a través de la serie de excedencia anual de las precipitaciones máximas diarias.

En la Tabla 4-7 se entrega el ajuste de frecuencia efectuado a la serie de excedencias anuales de las precipitaciones máximas en 24 horas de la estación U.C.N.

Período de retorno (años)	10	20	50	100
Precipitación máxima (mm)	18,5	24,5	32,2	38

Tabla 4-7. Precipitaciones máximas en 24 horas.

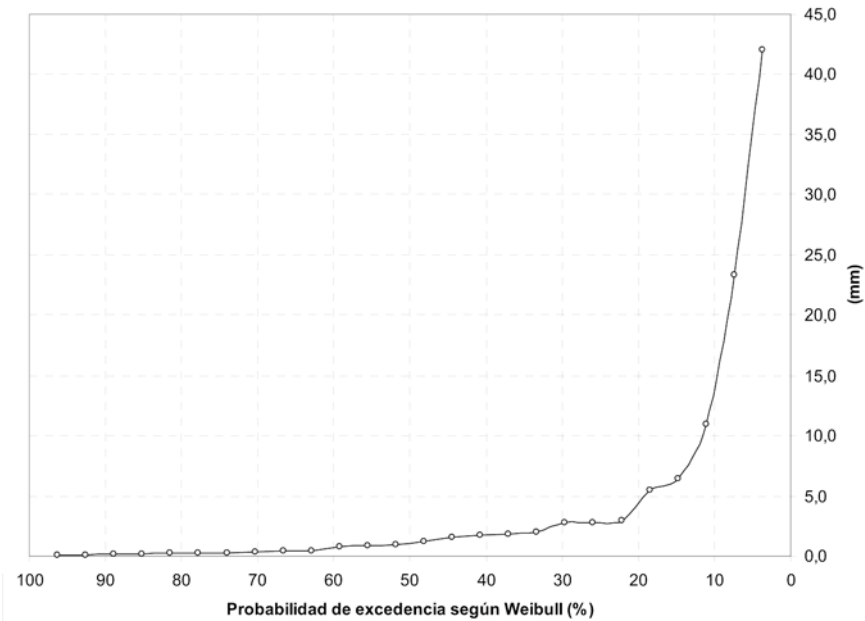


Figura 4.22. Precipitaciones máximas en 24 horas, estación UCN.

Con el objeto de estimar la magnitud de los caudales máximos instantáneos en la cuenca, se calcula el tiempo de concentración y coeficiente de escorrentía para cada periodo de retorno.

4.4.2.1 Tiempo de concentración

Se entiende como tiempo de concentración de una cuenca, al tiempo necesario para que la partícula de agua hidráulicamente más alejada alcance el punto de salida de la cuenca.

Para su estimación se consideraron parámetros hidrológicos y características morfológicas de la cuenca, como su pendiente y tamaño de la cuenca, determinándose el tiempo de concentración a través de las siguientes fórmulas propuestas por el Manual de Carreteras de la Dirección de vialidad (2002) y Monsalve (1999):

- Normas españolas

$$T_c = 18 \left(\frac{L^{0,76}}{S^{0,19}} \right) \quad (\text{ecc. 4.15})$$

- California Culverts Practice (1942)

$$T_c = 56,867 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (\text{ecc. 4.16})$$

- Giandotti

$$T_c = 60 \left(\frac{4A^{0,5} + 1,5L}{0,8H_m^{0,5}} \right) \quad (\text{ecc. 4.17})$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración (min).

L: Longitud del cauce principal desde la salida de la hoya al punto más alejado hidráulicamente (km).

S: Pendiente promedio de la cuenca (m/m).

A: Área de la hoya (km²).

H: Diferencia de nivel total entre cotas extremas de la cuenca (m).

H_m : Diferencia de nivel entre cota media de la cuenca y la salida (m).

- Ecuación de retardo del Soil Conservation Service (SCS)

$$T_c = \frac{100L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{1900S^{0,5}} \quad (\text{ecc. 4.18})$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración (min).

L: Longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo) (pies).

CN: Curva número del SCS.

S: Pendiente promedio de la cuenca (%).

Considerando:

L = 0,939 km = 3.080,71 pies

S = 0,2018 m/m = 20,18%

A = 0,321 km²

H = 123 m

H_m = 50,16 m

CN = 77

Autor	T_c (min)
Normas españolas	23,26
California Culvert Practice 1942	8,31
Giandotti	38,91
Curva Número del SCS	19,06

Tabla 4-8. Tiempo de concentración de la cuenca.

Considerando los resultados obtenidos, se adoptará como tiempo de concentración 23,26 min, ya que es el valor más cercano al promedio.

4.4.2.2 Coeficiente de escorrentía

Para establecer que porción de la precipitación de una tormenta se incorpora inmediatamente al cauce como escorrentía directa, existen métodos que, ya sea en términos físicos o semiempíricos, tratan de establecer la infiltración y por diferencia respecto a la precipitación total determinan la precipitación efectiva.

Dado que para la zona, y en general para el norte grande, no se cuenta con los antecedentes cualitativos que permitan un grado de aproximación aceptable, se ha estimado un coeficiente de escorrentía (C), cuya determinación relaciona factores de relieve, infiltración, cobertura vegetal y almacenamiento de agua en el suelo, entre otros.

Para su estimación (ver Tabla 4-9 y Tabla 4-10), se consideró el criterio planteado en el Manual de carreteras de la Dirección de Vialidad (2002), volumen 3.

Factor	C
Relieve	0,24
Infiltración	0,07
Cobertura vegetal	0,14
Almacenamiento superficial	0,10
Total	0,55

Tabla 4-9. Coeficiente de escorrentía de la cuenca para $T_c = 10$ años (Manual de Carreteras, 2002).

Periodo de retorno (años)	10	25	50	100
C	0,55	0,61	0,66	0,69

Tabla 4-10. Coeficiente de escorrentía.

4.4.2.3 Caudales máximos instantáneos

Para la estimación de los caudales máximos instantáneos se utilizó la metodología del Hidrograma unitario triangular (HUT), descartando la aplicación del Hidrograma unitario sintético (HUS), por la imposibilidad de relacionar cuencas existentes en el norte del país, con los parámetros calculados sólo para cuencas de la zona central y del sur de Chile. Además, se descarta la aplicación de la fórmula racional por el comportamiento particular de las precipitaciones. De hecho, de acuerdo a los antecedentes analizados al respecto, en esta zona se verifica que el caudal de crecida

es consecuencia de la persistencia en el tiempo de una determinada tormenta y no exclusiva ni directamente de la intensidad máxima registrada durante la tormenta.

El método de HUT fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, está planteado para cuencas pequeñas y homogéneas.

La teoría del HUT se sustenta en las siguientes propiedades:

La precipitación efectiva se distribuye uniformemente en el tiempo o periodo de duración específica.

La precipitación efectiva se distribuye uniformemente en toda el área de la cuenca de drenaje.

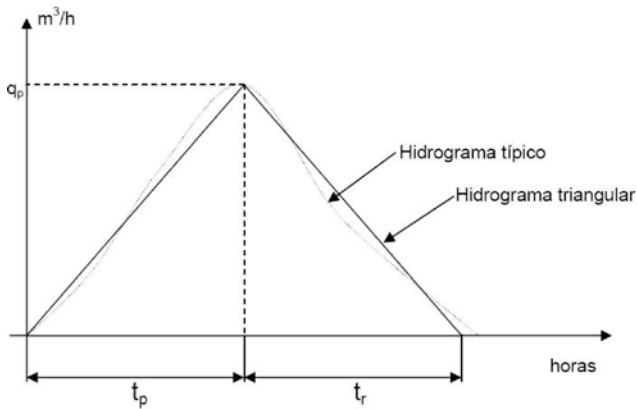


Figura 4.23. Hidrograma unitario triangular.

En consecuencia, se determinaron los parámetros del hidrograma unitario triangular y se aplicó una tormenta equivalente a las precipitaciones máximas en 24 horas.

Para su estimación se utilizaron fórmulas planteadas por Monsalve (1999), dada una lluvia efectiva el caudal máximo resulta igual a:

$$Q_p = \frac{0,20833 AP_e}{T_p} \tag{4.19}$$

$$T_p = \frac{T_r}{2} + 0,6T_c \tag{4.20}$$

$$T_r = \frac{P_e}{P_{max}} \cdot T_{max} \tag{4.21}$$

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (4.22)$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (4.23)$$

Donde:

Q_p : Caudal máximo por milímetro de lluvia efectiva, m3/seg.

A: Área del drenaje de la hoya hidrográfica, km².

T_p : Tiempo al máximo del hidrograma unitario triangular, hra.

T_r : Duración de la lluvia efectiva, hra.

T_c : Tiempo de concentración de la hoya, hra.

P_{max} : Precipitación máxima, mm.

T_{max} : Tiempo de la precipitación máxima, hra.

P_e : Precipitación efectiva, mm.

S: Retención potencial máxima.

CN: Parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía.

Para determinar el valor de la precipitación efectiva se utilizó el método SCS, que emplea la Curva Número (CN). Este valor varía en un rango de 1 a 100 y para este tipo de terreno se asume un valor de 77, que corresponde a una condición hidrológica de paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) y un moderado potencial de escorrentía superficial.

En la Tablas se 4-11 y 4-12 se muestran los resultados obtenidos calculando la precipitación efectiva mediante el Método SCS y el Coeficiente de escorrentía.

Periodo de retorno	$P_{efectiva}$	$T_{efectiva}$	$T_{máx}$	$Q_{máx}$
años	mm	hrs	hrs	m ³ /seg
10	0,14	0,2	0,3	0,029
20	1,02	1	0,7	0,093
50	3,13	2,3	1,4	0,15
100	5,29	3,3	1,9	0,186

Tabla 4-11. Caudales máximos instantáneos, utilizando Método SCS.

Período de retorno	P _{efectiva}	T _{efectiva}	T _{máx}	Q _{máx}
años	mm	hrs	hrs	m ³ /seg
10	10,19	13,2	6,8	0,1
20	14,94	14,6	7,6	0,132
50	21,28	15,8	8,2	0,175
100	26,25	16,6	8,5	0,206

Tabla 4-12. Caudales máximos instantáneos, utilizando Coeficiente de escorrentía.

Se observa que ambos métodos tiene como resultado final la misma tendencia, a pesar que los parámetros de la Tabla 4-12 muestre valores amplificados respecto a la Tabla 4-11.

El Método SCS presenta valores menores de caudales máximos, ya que se basa principalmente en antecedentes del tipo de suelo, en cambio el coeficiente de escorrentía considera además del tipo de suelo, los antecedentes pluviométricos y fluviométricos de la zona en estudio.

Se determina un periodo de retorno de 50 años para sistemas de drenajes con una vida útil supuesta de 30 años, siguiendo las consideraciones que plantea el Manual de Carreteras (2002), volumen 3, donde señala que:

Para un periodo de retorno de 50 años, se tiene en promedio una probabilidad de ser igualado o superado igual a 0,02 en un año cualquiera, sin embargo, la probabilidad que sea igualado o sobrepasado en un período de 10 años sube a 0,18; en un período de 25 años sube a 0,38 y en un período de 50 años sube a 0,64. Es decir, se requiere usar en el diseño un período de retorno alto, para contar con una seguridad de funcionamiento razonable de la obra durante su vida útil.

Además, si se considera la longitud de registro de precipitaciones de 38 años, su intervalo de confianza no debiera superar los 76 años como periodo de retorno (Covarrubias, 2007).

Por lo tanto, de acuerdo a las metodologías aplicadas para calcular los caudales máximos aproximados en la cuenca de la zona de Alto Portezuelo, se sugiere utilizar los valores entregados por la Tabla 4-12, con un caudal máximo de 0,175 m³/seg (175 lt/seg), con un período de retorno de 50 años.

4.5 Hidrogeología

4.5.1 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas identificadas corresponden a las unidades con grados de permeabilidad más representativos tanto del sector en estudio como de su entorno.

Se identifican 3 tipos de unidades:

Unidad impermeable. Representada por rocas volcánicas e intrusivas del Jurásico y rocas sedimentarias continentales y marinas del Cretácico Inferior, son características del Marco Geológico Local.

Unidad intermedia. Se ha considerado como tal a aquellos sectores en los cuales es difícil diferenciar las rocas que componen la unidad impermeable del sedimento, dado principalmente por una mayor erosión de la roca, pero sin lograr borrar completamente su morfología original a pesar de las potentes acumulaciones de sedimentos.

Unidad permeable. Está representada por depósitos sedimentarios de tipo gravitacional e hidrodinámico que se describen a continuación.

4.5.1.1 Depósitos aluviales y coluviales

Se observan depósitos aluviales que corresponden al material depositado en los cauces de la cuenca, que han quedado como evidencia en el fondo, producto de eventuales escurrimientos de agua. Están constituidos principalmente por una mezcla heterogénea de gravas y arenas, así como limos y arcillas, con mala selección, por lo que forman parte de los depósitos permeables. Además, se observan depósitos coluviales que se encuentran distribuidos en los escombros de falda, adosados a los cerros que rodean la cuenca. Estos se forman por procesos de meteorización y transporte de rocas ubicadas en laderas superiores adyacentes y debido a la acción de la gravedad. Debido al grado de permeabilidad que presentan estas unidades detríticas, se convierten en acuíferos potenciales.

Para efecto de esta memoria y debido a la escasa información disponible de sondajes o pozos excavados, sólo se mencionaran las unidades geomorfológicas, dejando para estudios posteriores el análisis de la profundidad que alcanzan estos depósitos y la ubicación de la napa freática.

4.6 Geomorfología local

Se reconocen específicamente tres rasgos geomorfológicos principales que en general, configuran el margen oriental de la Cordillera de la Costa de Antofagasta. Ellos son, de Oeste a Este, Sierra de Antofagasta, Depresión del Salar del Carmen y Sierra Alcalde Poblete. Estos rasgos se distribuyen como franjas de ejes relativamente

paralelos, de orientación Norte-Noreste, donde la Depresión del Salar del Carmen representa un bloque tectónicamente deprimido, confinado entre dos bloques alzados, el de Sierra de Antofagasta y de Sierra Alcalde Poblete.

La Sierra de Antofagasta está formada por un conjunto de cordones montañosos irregulares, relativamente continuos, con una altitud variable entre 800 y 1.140 m.s.n.m., distribuidos en un área aproximada de 200 km². Su límite oriental está controlado por las trazas del Sistema de Fallas de Atacama de orientación Norte-Noreste, configurando un frente de montaña que se expone como un escarpe geomorfológico del orden de 300 m, con respecto a la Depresión del Salar del Carmen.

Estos cordones montañosos están integrados por rocas volcánicas de la Formación La Negra (García, 1967) e intrusivos pertenecientes al Batolito costero, las cuales constituyen el substrato rocoso de las hoyas hidrográficas que convergen hacia la Depresión del Salar del Carmen.

La porción de la Sierra de Antofagasta, entre la quebrada Caracoles y la quebrada La Negra, es denominada Sierra del Ancla.

La cuenca en estudio, está ubicada al norte de la Sierra del Ancla y su relieve sinuoso está compuesto de conos coluviales o abanicos aluviales, que mantienen hacia el Noreste con una pendiente promedio de 17% en su eje transversal central.

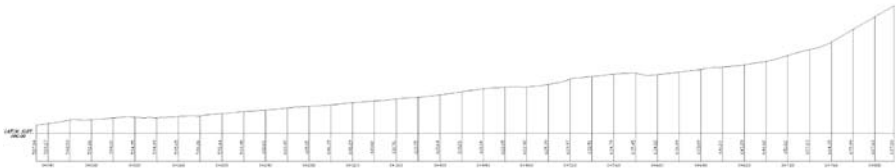


Figura 4.24. Perfil longitudinal de sección central de la cuenca.

Esta cuenca colinda al lado Oeste con una explanada de relieve homogéneo con pendientes suaves o piedemonte y por el Este con el borde oriental de la Cordillera de la Costa.

Como se aprecia en la Figura 4.25 el sector en estudio está rodeado de cerros de mediana altura (aproximadamente 30 m) que tributan a la cuenca con cauces antiguos de flujos de detritos que dividen su parte alta y mantienen hacia una quebrada principal que baja por el piedemonte occidental hasta la Depresión del Salar del Carmen.



Figura 4.25. Vista panorámica respecto al poniente de la cuenca.

4.7 Geología local

En términos generales, la geología del sector se presenta dominada principalmente por afloramientos de rocas estratificadas e intrusivas, cuya edad varía desde el Jurásico Inferior hasta el Cretácico Inferior.

La geología local fue desarrollada en base a los estudios geológicos expuestos en la Carta de Antofagasta y Punta Tetas (Figura 4.26), por González y Niemeyer (2005).

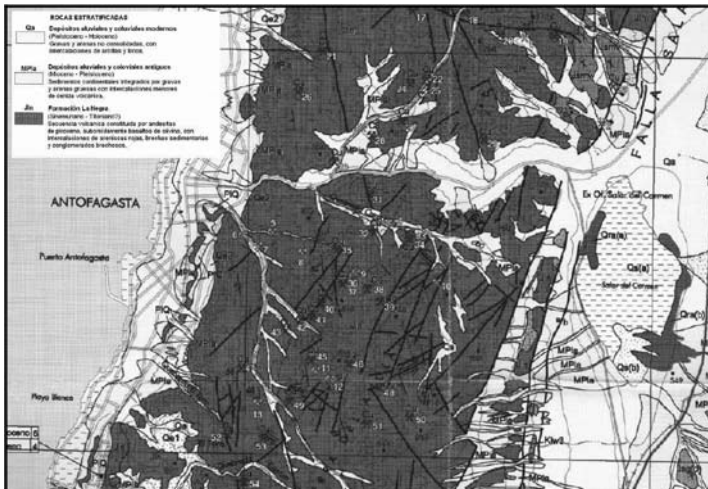


Figura 4.26. Unidades del área en estudio, según Cartas Antofagasta y Punta Tetas, Región de Antofagasta (escala 1:100.000).

Las unidades estratificadas identificadas en el sector, están representadas por:

Rocas volcánicas andesíticas de la Formación La Negra (Jurásico Inferior – Jurásico Superior)

Secuencia volcánica del Jurásico, principalmente continental, de al menos, 7.000 m. de espesor, que aflora como un monoclinal con manteo Oeste, en la Cordillera de la Costa inmediatamente al oriente de Antofagasta.

Está constituida esencialmente por una sucesión de coladas de lavas porfídicas de composición basáltica, andesítico-basáltica y andesítica. En la sucesión de coladas de lava se intercalan niveles de brechas y tobas, así como de areniscas y conglomerados volcánicos.

Depósitos Aluviales y Coluviales Antiguos (Mioceno -Pleistoceno)

Depósitos sedimentarios continentales constituidos principalmente por gravas y arenas. Representan antiguos conos coluviales o abanicos aluviales de baja pendiente, que se encuentran seccionados por los cauces de las quebradas actuales o por corrientes de barro, están constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, con intercalaciones menores de ceniza volcánica retrabajada. Se presentan en parte mal estratificados, semiconsolidados y parcialmente cementados por cloruros (halita) y sulfatos (anhidrita y yeso). Estos depósitos, de hasta 50 m de potencia, rellenan cuencas intramontañas de la Cordillera de la Costa y macizos del Cerro Gallinazo y Cerro Púa, algunas de ellas asociadas a la actividad de las Fallas Salar del Carmen, Caleta Coloso y Salar de Navidad. Las superficies abandonadas de estos depósitos constituyen extensas llanuras o pampas (González y Niemeyer, 2005).

Depósitos Aluviales y Coluviales Modernos (Pleistoceno -Holoceno)

Depósitos no consolidados de gravas y arenas de composición polimíctica y monomíctica que contienen intercalaciones lenticulares de arcillas y limos. Constituyen el relleno actual de las quebradas en cuyas desembocaduras conforman sistemas de abanicos aluviales coalescentes. Su origen está ligado a flujos intermitentes de agua, generados durante lluvias intensas. Debido a que estos depósitos se encuentran aún en formación, se estima que su edad se restringe al lapso Pleistoceno tardío – Holoceno (González y Niemeyer, 2005).

Todas estas rocas forman parte del substrato rocoso de las unidades estratificadas cenozoicas que constituyen la cobertura sedimentaria (Figura 4.27), constituyendo estas unidades sedimentarias, marcadores de la cronología de la deformación Neógena – Cuaternaria.

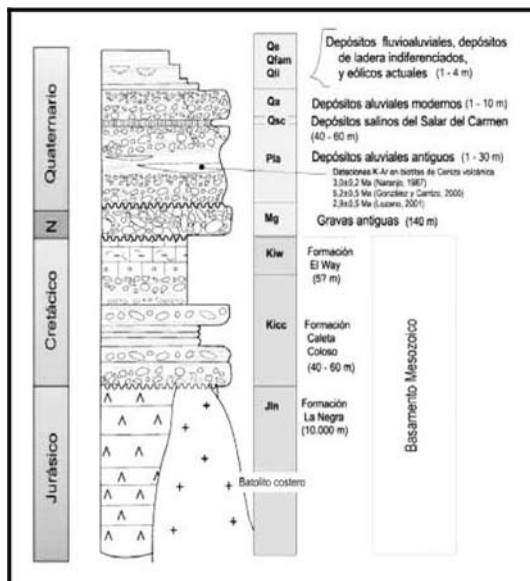


Figura 4.27. Columna estratigráfica generalizada del área en estudio. (Carrizo, 2002).

Tanto el substrato rocoso Mesozoico, como la cobertura sedimentaria Cenozoica se encuentran afectadas por el Sistema de Fallas de Atacama (Arabasz, 1971; Naranjo, 1987), cuya actividad ha producido un importante control en la distribución de los afloramientos y en la configuración de la geomorfología del área en estudio.

4.7.1 Marco tectónico

El marco tectónico que ambienta la región estudiada, está caracterizado por un margen continental activo del tipo destructivo, donde la subducción de la corteza oceánica induce una fuerte erosión tectónica de la placa Sudamericana (Giese y Reutter, 1987). Este ambiente de margen convergente, ejerce un fuerte control sobre la morfología regional del norte de Chile.

En detalle, el área en estudio es parte del antearco del sistema de subducción andino, caracterizado en su porción emergida, por la Cordillera de la Costa y la Depresión Intermedia (Niemeyer, et al., 1996).

En superficie, el antearco se caracteriza por estar segmentado por grandes estructuras de orientación aproximada Norte – Sur. Estas estructuras conforman el Sistema de Fallas de Atacama, asociado a la Cordillera de la Costa y el Sistema de Fallas de Domeyko, expuesto a lo largo de la Precordillera.

4.7.2 Sistema de Fallas de Atacama (SFA)

El término “Sistema de Fallas de Atacama” (Arabasz, 1971), se refiere a una extensa red de fallas asociadas, que se distribuyen a lo largo de la Cordillera de la Costa del norte de Chile (ver Figura 4.28).

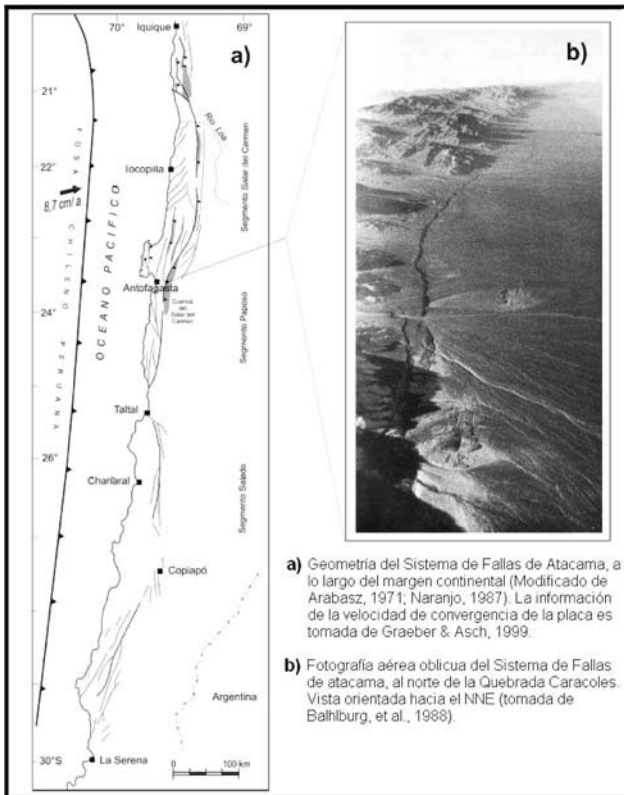


Figura 4.28. Sistema de Fallas de Atacama (Carrizo, 2002).

El SFA configura la estructura general de la Cordillera de la Costa, entre la ciudad de Iquique y La Serena (Arabasz, 1971). Las trazas que lo definen, se expresan relativamente alineadas en dirección Norte -Sur, paralelas al margen continental del norte de Chile, con una extensión aproximada de 1.100 km, entre los 20° y 29° de Latitud Sur.

La deformación del SFA en el área de estudio, segmentan el piedemonte occidental de la Sierra de Antofagasta, formando una estructura regional llamada Falla Salar del Carmen. Sus trazas están acusadas por notorios quiebres morfológicos, relativamente continuos, que desplazan los abanicos aluviales que convergen a la Depresión del Salar del Carmen. Estos quiebres morfológicos constituyen escarpes

de línea de falla, cuyas caras se exponen, casi en su totalidad, orientadas al Este. Los saltos morfológicos asociados a estos escarpes alcanzan alturas hasta de 9 m. Localmente se distinguen 2 fallas principales, La Falla Salar del Carmen, la Falla Sierra del Ancla.

Los sentidos de movimientos en la Falla Salar del Carmen son mayoritariamente normales, acusadas por el sistemático descenso del bloque oriental de la falla. Similar caso presenta la Falla Sierra del Ancla, con un sentido de movimiento normal con una leve componente lateral sinistral.

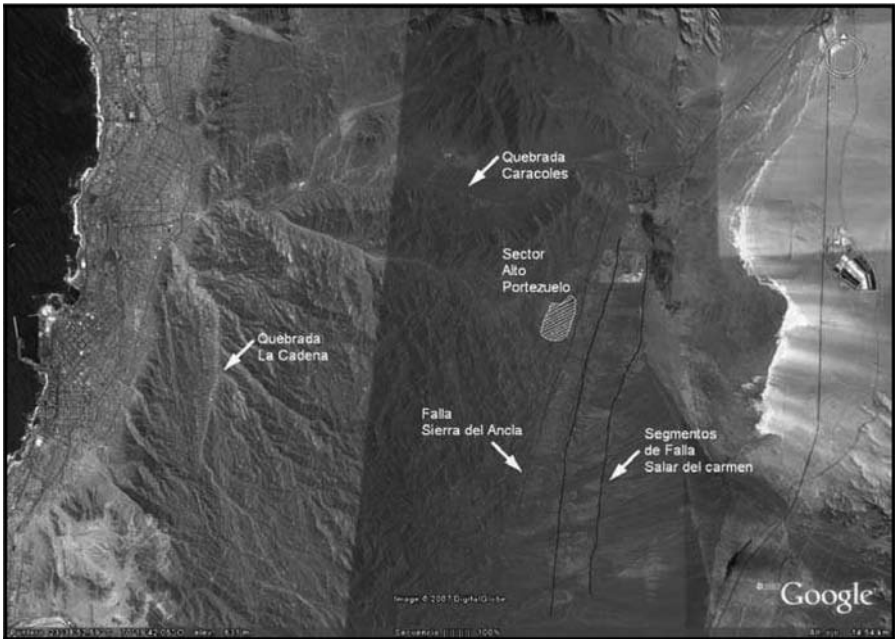


Figura 4.29. Fallas cercanas al área en estudio (Planteado en la imagen según referencia Carta de Antofagasta y Carrizo, 2002).

Según lo expuesto por Carrizo (2002), las geometrías observadas revelan que la deformación de la Falla Salar del Carmen es episódica y acumulativa en el tiempo. Esto explica el desarrollo una zona de intensa deformación, formada por la sumatoria de pequeñas rupturas generadas en varios eventos sísmicos y no por grandes rupturas asociadas a terremotos de gran magnitud. Lo anterior evidencia que la formación de la Falla Salar del Carmen y sus segmentos, en general, sería el resultado de la unión de pequeñas fallas generadas por sismos de pequeña a moderada magnitud, acumulando de esta manera la deformación en el tiempo. Los sismos de mayor envergadura habrían causado rupturas mayores, de trazas más largas y simples.

Es necesario realizar estudios acabados de geología en el área específica de emplazamiento del vertedero sanitario y de esta forma, descartar la actividad de posibles segmentos de la Falla Sierra del Ancla que puedan afectar la estabilidad de taludes y al conjunto de pilas de residuos dispuestos.

4.8 Sismología local

La Región de Antofagasta se encuentra ubicada en la zona norte del margen Chileno del sistema de subducción conformado por las placas de Nazca y Sudamericana, provocando el movimiento entre éstas una frecuente actividad sísmica en la zona.

Dentro de los registros históricos de sismos de gran intensidad en la región, se tiene el ocurrido el 30 de julio de 1995, a la 01 con 11 minutos de la madrugada de una magnitud de momento $M_w = 8,1$ (magnitud Richter $M_s=7,3$) con epicentro costero al sur de la península de Mejillones, aproximadamente a 20 km al noroeste de la ciudad de Antofagasta y a 36 km de profundidad. Este terremoto, de características moderadas a fuertes, corresponde a un sismo típico de subducción (thrust) producto del flotamiento que se produce en las placas de Nazca y Sudamericana. El área afectada se extendió desde la Península de mejillones (23,5° Sur) hasta Paposo (aprox. 25° Sur), involucrando una superficie total de aproximadamente 16.000 km² (Campos y Kausel, 1995).

De acuerdo a las disposiciones generales entregadas por las Normas sísmicas chilenas (NCh 2369. Of2003), Alto Portezuelo se encuentra ubicado en la zona sísmica 3 con una aceleración efectiva (A0) de 0,40 g y tipo de suelo II.

4.9 Mecánica de suelos

Se realizó un estudio de mecánica de suelos con el objetivo de determinar las características físicas y propiedades mecánicas del subsuelo en el área en estudio, todo esto con el propósito de analizar el comportamiento del suelo ante la aplicación de una carga (en este caso residuos) y con que facilidad transmite líquidos percolados a los estratos inferiores del subsuelo. Además, se quiere definir la capacidad del suelo para ser compactado tanto para preparar la base del vertedero como para utilizarlo en la cubierta diaria de residuos.

4.9.1 Exploración del subsuelo

4.9.1.1 Estratigrafía

A través de las calicatas efectuadas por la IMA en el año 2003, se logró hacer una descripción estratigráfica en 16 puntos ubicados dentro de la cuenca en estudio (Anexo C-1). Su distribución se muestra en Figura 4.30.

El área en estudio de Alto Portezuelo se caracteriza por un subsuelo de estructura homogénea, rodeado de cerros de mediana altura que aportan material coluvial y aluvial a la superficie de la cuenca. El subsuelo se divide principalmente en dos estratos identificables a simple vista y presentes en la mayoría de las calicatas situadas dentro de la cuenca.

Se identifica un primer tipo de subsuelo, compuesto de material fino, con gravas aisladas de TM 2" y estrato de 0,20 m de espesor promedio, presentes generalmente, en la zona central de la cuenca dividido por cauces secos de antiguas escorrentías superficiales, que transportaron detritos aluvionales distribuyéndolos aguas abajo de la cuenca. También se observan algunos suelos porosos en el sector poniente de la cuenca, con cavidades expuestas en superficie, producto de precipitaciones que infiltran y lava las sales solubles o poco solubles presentes en el subsuelo.

Además, se observa un segundo tipo de subsuelo, compuesto generalmente de gravas subredondeadas y angulares, con un estado de cementación débil y presencia de bolsones de aire. Su compacidad varía desde suelta a densa en estratos profundos. Para calicatas cercanas al oriente de la cuenca, afloran estratos rocosos, con material generalmente fracturado o meteorizado de TM 3".

De la descripción estratigráfica, se consideraron como puntos característicos de la cuenca, las calicatas 10 y 15 (color verde en Figura 4.30), ya que representan los estratos más comunes tanto del sector central como de la salida de la cuenca. A continuación se detallan sus características.



Figura 4.30. Distribución de calicatas en el área de estudio.

Calicata n°10. Posee una profundidad de 2,00 m y su capa superficial se compone de materia fina (limo y arena) de espesor 0,20 m, presenta gravas redondeadas con un T.M. de 3" y granos de arena subredondeadas con 30% en grava. El Contenido de finos se estima entre un 5-10%. Su estructura es homogénea con una distribución medianamente graduada. Se identifica una compactidad media densa y se observan rocas subredondeadas cementadas y con abundancia en sales (ver Figura 4.31).



Figura 4.31. Cara lateral de calicata n°10.

Calicata n°15. Posee una profundidad de 3,00 m. Su capa superficial se compone de material fino (limo y arena) de espesor 0,20 m, presenta gravas subredondeadas y redondeadas con un T.M. de 3" y granos de arena subangulares y redondeados con 40% en grava. El Contenido de finos se estima entre un 5-10%. Su estructura es homogénea con una distribución medianamente graduada. Se identifica una compactidad densa y se observan bolones aislados de T.M. 8" y rocas subredondeadas con cementación débil. Además, presenta bolsones de aire y abundancia en sales (ver Figura 4.32).



Figura 4.32. Cara lateral de calicata nº15.

4.9.1.2 Ensayos

Personal del Laboratorio de Investigación y Ensayo de Materiales (LIEMUN) realizó la toma de dos muestras representativas de subsuelo en el área donde se ubican las calicatas 10 y 15 (M1 y M2 respectivamente) para su posterior ensayo en laboratorio, realizando 2 ensayos in situ para cada uno de los sectores elegidos, una de densidad a través del cono de arena (ver Figura 4.33) y prueba de infiltración por método de doble anillo (ver Figura 4.34).



Figura 4.33. Ensayo de densidad in situ, Cono de arena.



Figura 4.34. Prueba de infiltración, Método doble anillo.

A continuación se detallan los ensayos realizados en laboratorio para cada una de las muestras (M1 y M2).

Granulometría.

Límites de consistencia.

Densidad de partículas sólidas.

Clasificación U.S.C.S. (Sistema de Clasificación Unificado de Suelos)

Densidad máxima y mínima.

Proctor modificado.

Razón de soporte de California (CBR).

Corte directo.

Sales solubles totales.

4.9.2 Análisis de resultados

4.9.2.1 Clasificación

Con el objeto de determinar una clasificación del tipo de subsuelo presente en la cuenca en estudio, se realiza un estudio de granulometría a las muestras M1 y M2.

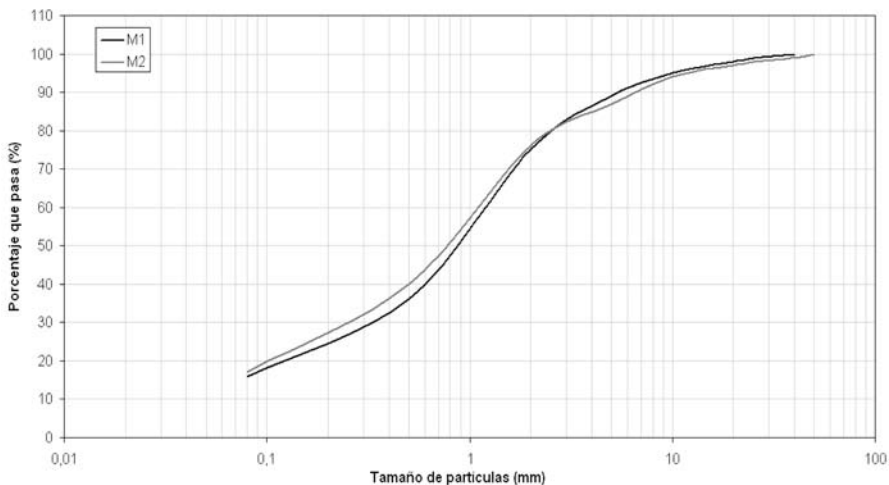


Figura 4.35. Curvas distribución de tamaños de partículas para muestra 1 y 2.

En general, el análisis de tamizado para ambas muestras identifica al subsuelo de tipo homogéneo y con una distribución bien graduada de sus partículas. Esto se refleja con un coeficiente de uniformidad bastante alto y un coeficiente de curvatura dentro de los rangos (Tabla 4-13), presentando sólo la muestra M2 una leve graduación discontinua. En la Figura 4.35 se observa una distribución promedio de grava de un 25%, arena 62% y limo 13%.

Coefficientes	M1	M2
Cu	23,4	21,6
Cz	1,4	1

(*) Granulometría bien graduada
Cu > 4 gravas Cu > 6 arenas
1 < Cz < 3

Tabla 4-13. Coeficiente de uniformidad y curvatura (*).

Respecto a los límites de consistencia, ambas muestras se caracterizan como no plásticas, debido a una baja o nula presencia de partículas de arcillas. De acuerdo al sistema de clasificación unificado (U.S.C.S.) las dos muestras se clasifican como arena limosa (SM) con una fracción aislada de gravas de tamaño máximo 3" y como A-3 en el sistema de clasificación AASHTO (BOWLES, 1982).

El análisis de las sales solubles totales presentes en las muestras, indican para M1 un 0,60% y para M2 un 0,64%, cumpliendo con el contenido de sales permisible

recomendado por el Manual de Carreteras (2002). Por lo tanto, es probable que las sales presentes en el subsuelo sean poco o no solubles en agua, como es el caso de carbonatos.

4.9.2.2 Relación densidad -humedad

La densidad relativa (DR) del subsuelo depende directamente de los intersticios entre partículas y de la forma de contacto que tengan entre sí. Para la muestra M1, es impracticable el cálculo del DR ya que presenta una densidad in situ menor que su densidad mínima, probablemente se deba a la presencia de cavidades y sales no solubles en la muestra, impidiendo recrear en laboratorio, las condiciones naturales en terreno donde se estableció la densidad in situ. Para el caso de la muestra M2, se obtiene una DR de 31%, clasificando al suelo como suelto.

A través de los resultados del ensaye de proctor modificado, se aprecia un subsuelo físico-mecánico muy estable y con una compacidad homogénea. Se logra una densidad máxima compactada seca (D.M.C.S) con un contenido de humedad óptima de un 12%, que es bastante superior al contenido de humedad in situ.

Ensaye de Proctor modificado (Nch 1534-2, Of. 79)	M1	M2
Densidad máxima compactada seca (D.M.C.S.) (kg/m ³)	2.040	2.040
Humedad óptima (%)	12,0	10,4

Tabla 4-14. Relación humedad -densidad

Ensaye de Cono de arena (Nch 1516 Of. 79)	M1	M2
Densidad seca (kg/m ³)	1.434	1.549
Humedad (%)	1,4	2,5

Tabla 4-15. Densidad in situ

Ensayo de Densidad máxima y mínima	M1	M2
Densidad mínima método A (ASTM D 4254) (kg/m ³)	1.466	1.420
Densidad máxima método 1B (ASTM D 4253) (kg/m ³)	1.972	1.936

Tabla 4-16. Densidad máxima y mínima

Por lo tanto, en este tipo de subsuelo, ante cualquier proceso de compactación, es necesaria la adición de agua para alcanzar la humedad óptima deseada. Esto se confirma al ser mayor la densidad máxima obtenida por compactación en el ensaye de proctor modificado que la densidad máxima obtenida por vibrado, ya que en suelos no cohesivos, al aumentar la humedad, la tensión capilar disminuye haciéndose más efectivo el efecto de compactación (Salgado et al., 1985).

4.9.2.3 Capacidad de soporte

Para poder determinar la capacidad de resistencia y deformación del suelo frente a sollicitaciones, se realizaron los ensayes de razón de soporte de California (CBR) y corte directo.

La prueba de CBR se realiza principalmente para evaluar el material de subrasante y correlacionarlo con el comportamiento del pavimento.

De acuerdo a los resultados obtenidos de CBR determinados para la condición natural del suelo, estos varían entre 65 y 88%. Esta diferencia se explica, por la variación del 2% en gravas que posee M2 respecto a M1, incrementando el CBR en un 26%. El subsuelo presente es altamente sensible, debido a las características angulosas de las gravas, provocando una variación considerable ante un leve cambio en la zona intermedia de la distribución granulométrica.

Haciendo una comparación aproximada entre resultados obtenidos del CBR y el sistema de clasificación unificado de suelos (U.S.C.S.), se tiene para un subsuelo de arenas limosas un rango de CBR de 10 a 40% y la razón de soporte CBR obtenida es de 65% y 88% (ver Anexo C-2). Por lo tanto, ambas muestras supera ampliamente la condición, aprobando su utilización como base en infraestructura de apoyo.

Para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante (K_0), se analizaron los ensayos de CBR para ambas muestras, considerando el caso más desfavorable de CBR, medido para 0,1" de penetración y a 90% de compactación, se obtiene para M1 y M2 un K de 9 kg/cm³ y 12 kg/cm³, respectivamente.

A través de la relación entre K_0 y capacidad de soporte (Anexo C-2), se obtiene para M1 y M2 un valor aproximado de capacidad de soporte admisible del subsuelo de 2,57 kg/cm² y 3,23 kg/cm², respectivamente. A través del análisis de los resultados del ensayo de corte directo, se obtuvieron las envolventes de falla tanto para el esfuerzo cortante máximo como esfuerzo crítico o residual, éstos se muestran en las Figuras 4.36 y 4.37.

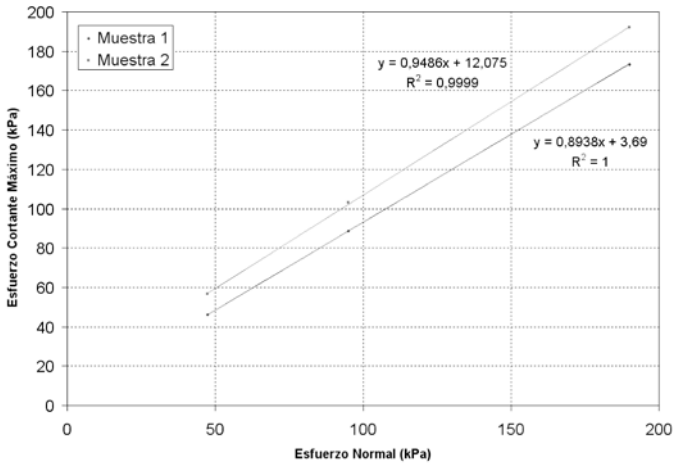


Figura 4.36. Envolvente de falla para esfuerzo cortante máximo.

La resistencia al corte de un suelo determina factores tales como la estabilidad de talud, capacidad de carga admisible para una cimentación y el empuje de un suelo contra un muro de contención. El conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelo (Berry y Reid, 1993).

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{ecc. 4.23}$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte.

σ' = Esfuerzo normal efectivo.

c' = Cohesión efectiva.

ϕ' = Ángulo de fricción interna efectiva.

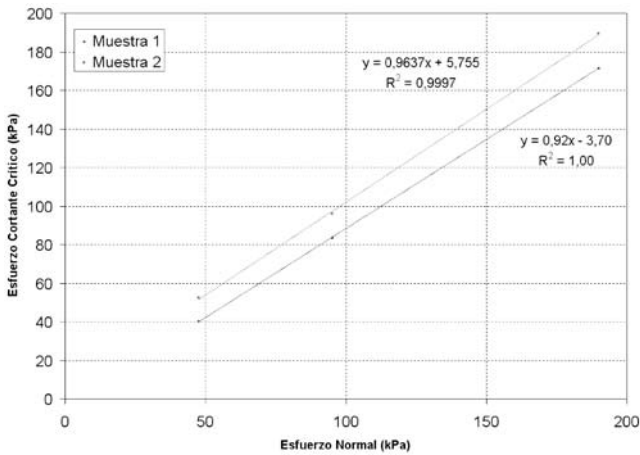


Figura 4.37. Envolvente de falla para esfuerzo cortante crítico o residual.

Aplicando la teoría de resistencia al corte planteada por Coulomb y Terzaghi (Ecc. 4.23) a las envolventes de falla, se obtiene para un esfuerzo cortante máximo de la muestra M1 un ángulo de fricción efectiva de 41,8° y 43,5° para la muestra M2, con una cohesión de 3,7 kPa (0,04 kg/cm²) y 12,1 kPa (0,12 kg/cm²) respectivamente.

De forma similar, se obtiene para un esfuerzo cortante crítico o residual de la muestra M1 un ángulo de fricción efectiva de 42,6° y 43,9° para la muestra M2, con una cohesión de 3,7 kPa (0,04 kg/cm²) y 5,8 kPa (0,06 kg/cm²) respectivamente.

Tipo de suelo	Compacidad		
	Flojo	Medianamente denso	Denso
	Ángulo de rozamiento interno en función de la densidad inicial (*)		
Limo no plástico	26 a 30	28 a 32	30 a 34
Arena uniforme fina a media	26 a 30	30 a 34	32 a 36
Arena bien graduada	30 a 34	34 a 40	38 a 46
Mezclas de arena y grava	32 a 36	36 a 32	40 a 48

(*) Hough (1957) sugiere emplear los valores más bajos de cada rango para los suelos redondeados o para aquellos que poseen partículas débiles (micas o esquistos) y los más elevados para suelos con partículas angulosas y resistentes.

Tabla 4-17. Valores del ángulo de fricción interna efectiva en suelos granulares no plásticos en función de la granulometría y compacidad (González de Vallejo, 2002).

Se obtienen valores superiores de ángulos de fricción efectiva, característicos de suelos nortinos (salinos), debido a factores tales como:

Compacidad natural del suelo.

Distribución granulométrica bien graduada.

Características de las partículas (forma).

Humedad y densidad.

Salinidad del suelo (afecta directamente a la cohesión).

Un suelo bien graduado, posee partículas de distintos tamaños, con lo que los granos medianos pueden ocupar los poros de las partículas más gruesas, las partículas más finas los espacios entre las medianas, y así de forma sucesiva. Por lo tanto, esta mejor posibilidad de estibación da lugar a que en un suelo bien graduado se pueda alcanzar una estructura más densa y más resistente que en un suelo uniforme (González de Vallejo, 2002).

Para obtener un ángulo de fricción representativo del tipo de suelo, se realiza un análisis de ángulos de fricción y cohesiones resultantes para cada una de las deformaciones producidas en el ensaye de corte directo.

Al analizar la gráfica en Figura 4.39 bajo un primer criterio, se observa en el suelo M1 un pick en la cohesión de 8,8 kPa (0,09 kg/cm²) con una deformación de 4,2 mm, para luego caer bruscamente su resistencia. Con esta deformación de referencia se tiene un ángulo de fricción efectiva de 39,3° (ver Figura 4.38). Para un segundo criterio, se consideran el intercepto de tangentes a la curva, obteniéndose un ángulo de de 35°.

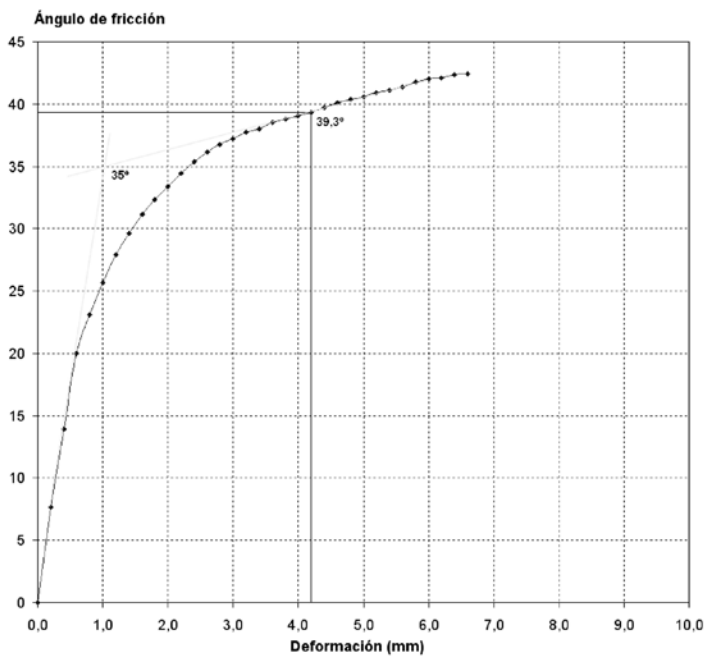


Figura 4.38. Gráfica de ángulo de fricción vs. deformaciones de suelo M1.

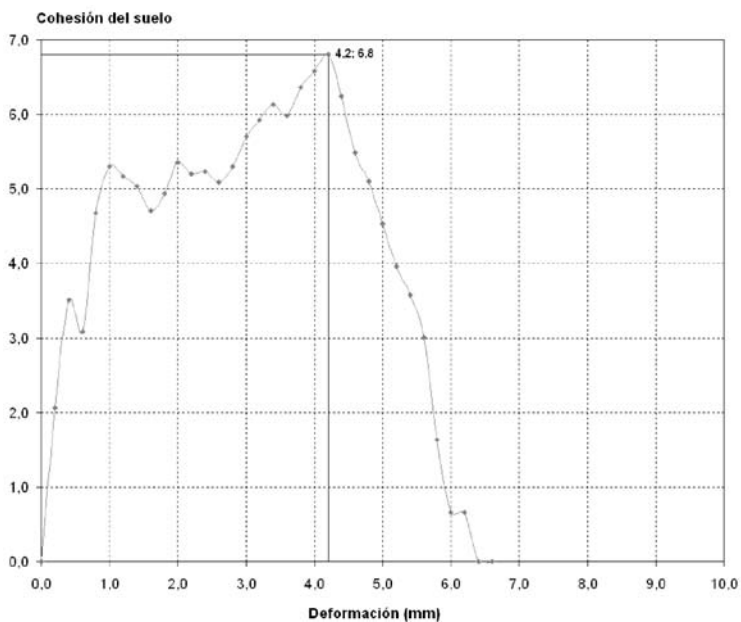


Figura 4.39. Gráfica de cohesión efectiva vs. deformaciones de suelo M1.

De la misma forma, se analiza la gráfica en Figura 4.41 para un primer criterio, se observa en el suelo M2 un pick de 19,8 kPa (0,20 kg/cm²) con una deformación de 1,2 mm para luego caer lentamente su resistencia y con un ángulo de fricción efectiva de 24,9° (ver Figura 4.40). Para un segundo criterio, se considera el intercepto de tangentes a la curva, obteniéndose un ángulo de de 36.9°.

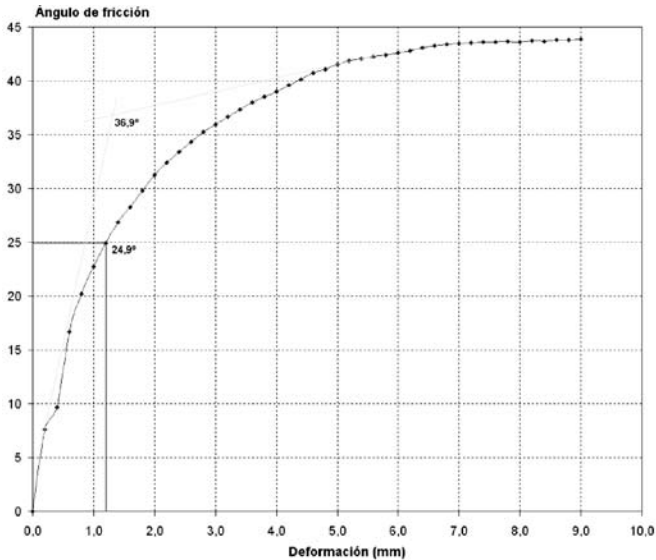


Figura 4.40. Gráfica de ángulos de fricción vs. deformaciones de suelo M2.

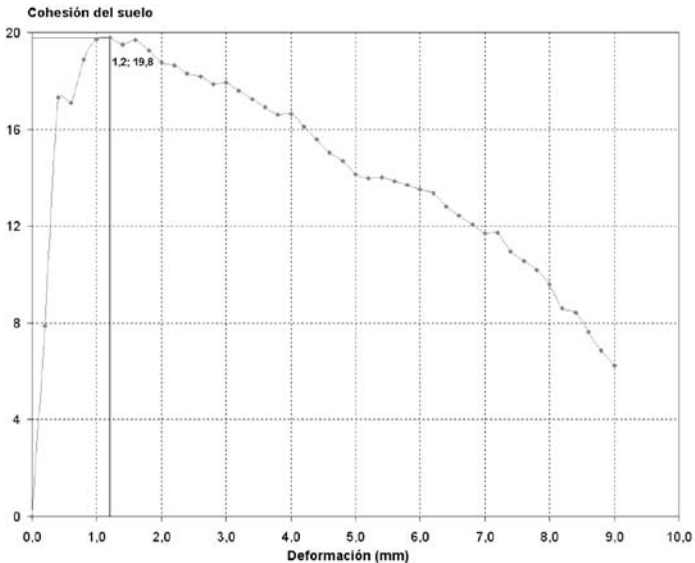


Figura 4.41. Gráfica de cohesión efectiva vs. deformaciones de suelo M2.

Se evidencia en estas comparaciones una mayor resistencia al corte en el suelo M1, causado probablemente por cristales de sales que ayudan a aumentar la fricción entre las partículas, pero una brusca pérdida de resistencia, siendo M1 el caso más desfavorable respecto al suelo M2 y más representativo de las muestras.

Por lo tanto, de acuerdo a los dos criterios aplicados, se sugiere para el subsuelo un ángulo de fricción interna efectiva de 35° y una cohesión efectiva de 0.

4.9.2.4 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que presenta un medio poroso para permitir el flujo de un fluido. Existen varios factores que intervienen en su valor, dentro de estos están:

Densidad (porosidad, índice de vacíos).

Distribución de tamaño de partículas.

Forma y orientación de las partículas.

Grado de saturación o presencia de aire.

Tipo de cationes y espesor de las capas adsorbidas asociadas con los minerales de arcilla, cuando están presentes.

Viscosidad del agua, a que varía con la temperatura.

Heterogeneidad y anisotropía del suelo.

El coeficiente de permeabilidad (k) puede definirse como la velocidad de flujo producida por un gradiente hidráulico unitario (ecc. 4.24)

$$I = k * i \quad \text{ecc. 4.24}$$

Donde:

I = tasa de infiltración (m/seg)

k = coeficiente de permeabilidad (m/seg)

$$i = \text{gradiente hidráulico} = \frac{h+L}{L} \sim 1$$

L = profundidad del frente húmedo.

h = altura de líquido acumulado sobre la superficie del suelo.

Los resultados de la prueba infiltración arrojaron un coeficiente de permeabilidad de $1,53 \times 10^{-4}$ m/seg para M1 y $1,42 \times 10^{-4}$ m/seg para M2. Estas mediciones tienen un grado de permeabilidad mediano (10^{-3} a 10^{-5}) y se consideran de buen drenaje, correspondiendo a un tipo de suelo de arenas medias a finas.

Es importante hacer notar la capacidad de permeabilidad que posee el subsuelo, ya que en primera instancia en sector calicata 10, se ocuparon aproximadamente 800 litros para hacer la prueba de infiltración, logrando saturar el suelo sólo después de 550 litros para realizar las mediciones respectivas. Esta cantidad de agua fue insuficiente, debiendo posteriormente cargar más agua para realizar las lecturas finales.

Aplicando la Ley de Darcy (ecc. 4.24) y suponiendo que el gradiente hidráulico no pasará de un valor de 1, este resultado define una tasa de infiltración de $1,53 \times 10^{-4}$ m/seg para M1 y $1,42 \times 10^{-4}$ m/seg para M2.



5. Marco normativo

El estado a través de la Ley de bases generales del medio ambiente (LBGMA), (Ley 19.300, 1994), que entró en vigencia el 9 de marzo de 1994, reconoce las competencias legales y técnicas existentes en los distintos servicios sectoriales y la necesidad de coordinar la gestión ambiental conjunta con cada uno de ellos a través de CONAMA. Esta normativa también ofrece un marco regulador para asegurar las garantías constitucionales relacionadas con el medio ambiente y establece instrumentos de gestión ambiental como el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), normas de calidad ambiental, normas de preservación de la naturaleza y conservación del patrimonio ambiental, normas de emisión, planes de manejo, prevención y descontaminación, normando la responsabilidad por daño ambiental. Regula también cuáles proyectos o actividades son susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, por lo que requieren someterse al SEIA. Dentro de estas actividades están las plantas de disposición de residuos y estériles, la producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas y aquellos proyectos de saneamiento ambiental como las plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, vertederos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos.

El instrumento de gestión ambiental preventiva más importante con que cuenta CONAMA es el SEIA, que regula la presentación de proyectos por parte del sector privado, entre ellos los de disposición final de RSD, a través de estudios de impacto ambiental que deben ser evaluados por distintos servicios públicos y requieren también un proceso de participación y consulta ciudadana, sin que éste tenga un carácter vinculante para su aprobación o rechazo por parte de las comisiones regionales de medio ambiente (COREMA).

Además de definir las características de diseño y localización, los proyectos que ingresan al SEIA deben contar con detalle el nivel tecnológico de control de riesgos que una actividad de esta naturaleza tiene, información que es sometida al análisis de una veintena de servicios públicos con diferente responsabilidad en la evaluación de los mismos, debiendo ajustarse a las normas internacionales, nacionales y regionales aplicables.

5.1 Normas vigentes

Las normativas que definen la política y regulan las competencias del Ministerio de Salud a través de los Servicios de Salud son las siguientes:

Resolución N° 2444/80:

Estas son normas mínimas de operación de vertederos donde se establece que ningún sitio de disposición final podrá funcionar sin la autorización sanitaria

respectiva del Servicio Nacional de Salud, la que sólo será otorgada cuando éste constate que el recinto de disposición cumpla ciertas condiciones indicadas en la resolución.

Algunos requisitos exigidos al sitio propuesto para vertedero son: la proximidad de éste al límite urbano, la ausencia de inundaciones, tener un cierre perimetral y un camino de acceso en buen estado.

Además ésta señala aspectos relacionados con la gestión del vertedero en términos de la presencia de personal y un administrador, con todos los elementos de seguridad necesarios para vigilar el cumplimiento con las normas. Se requiere la disponibilidad de contenedores para reciclaje y los equipos mecánicos para mover, compactar y cubrir la basura no recuperable.

En cuanto a la operación del vertedero, con la excepción del administrador nadie debe recuperar material. En el caso del administrador se permite solamente la recuperación de productos de origen mineral o materiales imputrescibles como metales, vidrios, plásticos, maderas, papel, etc.

Para la cobertura diaria de los residuos ésta exige con una capa de tierra compactada de 55 cm de espesor. Prohíbe la quema de residuos, la entrada de menores de edad y todo tipo de animales al recinto. Se debe registrar el origen y cantidad (volumen o tonelaje) de los residuos recibidos y el destino y volumen de los materiales recuperados.

Respecto al cierre de un vertedero, la norma exige que al abandonar el terreno se deba disponer todos residuos cubiertos con tierra y posteriormente no se debe utilizar el lugar para construcciones habitacionales sin permiso de la autoridad sanitaria.

Esta resolución no menciona medidas para reducir el impacto de un vertedero sobre el ambiente en términos de control de la producción de líquidos lixiviados y biogás, ni la implementación de sistemas de monitoreo durante la etapa de operación y después del cierre. También falta claridad sobre otros tipos de residuos, como residuos asimilables o industriales, que se puedan recibir en un recinto de este tipo.

Decreto Supremo N° 553/90, Código Sanitario:

El Código Sanitario vigente corresponde al antiguo decreto con fuerza de Ley N° 725/67, debidamente actualizado a través del Decreto Supremo N° 553/ 90, del Ministerio de Salud, que establece que en toda actividad de construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier planta de tratamiento de residuos será necesaria la aprobación previa del proyecto por el Servicio Nacional de Salud. También le corresponde autorizar la instalación y vigilar el funcionamiento de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios de cualquier clase.

Decreto N° 144/61:

Esta normativa regula que los sistemas destinados a la incineración de residuos deberán contar con la autorización de la autoridad sanitaria, aprobación que se otorga cuando se estima que la combustión puede efectuarse sin producción de humos, gases no quemados, gases tóxicos o malos olores y sin que escapen al aire cenizas o residuos sólidos (Artículo 2º). Además, prohíbe dentro del radio urbano de las ciudades, la incineración libre, ya sea en la vía pública o en los recintos privados, de hojas secas, basuras u otros desperdicios (Artículo 6º).

Código Sanitario:

Contiene la normativa técnica, tanto desde la perspectiva de la prevención como de la sanción a fin de precaver y sancionar eventuales daños a la salud de la población proveniente del deterioro ambiental. Este Código entrega a los directores de los Servicios de Salud, en sus respectivos territorios, la función de “velar por el cumplimiento de las disposiciones del Código Sanitario y de los reglamentos, resoluciones e instrucciones que lo complementen y sancionar a los infractores” (Art. 9º letra a). Regulando, de esta forma, la potestad sancionadora que se ha entregado al servicio, principalmente a través del “sumario sanitario” (Libro X, Código Sanitario, Arts. N° 161 y siguientes).

DFL N° 1 del Ministerio de Salud de 1989:

Establece aquellas materias o actividades que requieren autorización sanitaria expresa, entre ellas toda actividad que se dedique al transporte, acopio y disposición final de residuos sólidos.

Ley N° 19.300 de 1994 sobre bases del medio ambiente:

Establece un marco legal que se encuentra reglamentado y desarrollado en normativas muy importantes para el quehacer de los Servicios de Salud, tales como los decretos supremos:

N° 30 de 1997: Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

N° 16 de 1997: Plan de prevención y descontaminación atmosférica de la Región Metropolitana del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

Una de las situaciones complejas por las que atraviesa el marco jurídico sobre residuos es que desde la promulgación del Código Sanitario en 1967, solamente se han dictado normas mínimas para la operación de basurales y normas sanitarias para lugares de trabajo. Un ejemplo de ello, es que se encuentran en diferentes fases de elaboración los reglamentos sobre manejo sanitario de residuos peligrosos, de disposición final de RSD y asimilables, de instalaciones de residuo de tipo orgánico

vegetal y de manejo de residuos hospitalarios. En 1999 se elaboró el anteproyecto para una ley general de aseo. En elaboración se encuentra un reglamento para el manejo de lodos, una norma de calidad de residuos orgánicos, de preferencia del tipo vegetales y una norma de emisión para incineradores de residuos.

En el nivel regional, junto a la CONAMA, son los Servicios de Salud y SESMA en la Región Metropolitana, las entidades que concentran el mayor nivel de atribuciones en materia de regulación y fiscalización, aún cuando son estos últimos quienes tienen las facultades que otorga el Código Sanitario, para controlar y sancionar a las actividades que operan en el transporte y disposición de residuos, hayan sido evaluadas en el sistema de evaluación de impacto ambiental o bien que estén operativas desde antes de la década de los noventa. El instrumento de gestión que condiciona el funcionamiento de los sistemas de recolección, transporte y los sitios de disposición final en este caso es de carácter sanitario y es una resolución sanitaria que autoriza finalmente la operación de la actividad, toda vez que esté en pleno cumplimiento de las normativas vigentes.

5.2 Normas en proyecto

Con fecha 3 de enero de 2003 se inició el periodo de consulta pública del Reglamento de vertederos sanitarios elaborado por el Ministerio de Salud con el apoyo de la comisión nacional del medio ambiente (CONAMA). Este documento es bastante más completo que la norma anterior.

Se define un vertedero sanitario como: “Una instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen los residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos a la salud de la población y daño para el medio ambiente, en el cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y cubiertas con material de cobertura a lo menos al final de cada día de operación y que cumple con las disposiciones del presente reglamento” (CONAMA, 2003).

Por lo tanto, se trata de otro tipo de instalación que el propuesto por la resolución N° 2444/80, así destacando la diferencia entre un vertedero de residuos y un vertedero sanitario controlado.

La autorización para vertederos sanitarios queda en manos de los Servicios de Salud y entrega un glosario de definiciones de varios aspectos relacionados con vertederos. Especifica lo que debe incluir un proyecto de vertedero sanitario, dentro de éstas exige como mínimo contemplar el diseño de ingeniería incluyendo las proyecciones de población, planos relevantes, determinación de los volúmenes disponibles, un programa constructivo, el diseño del sistema impermeabilizante y coberturas, el diseño de los sistemas de manejo de lixiviados, biogás y escorrentías superficiales y las especificaciones técnicas completas para la construcción, operación y cierre

del vertedero. Además, el proyecto debe contener un plan de operación, monitoreo, cierre y contingencias.

Con respecto al sitio, el reglamento especifica el perímetro mínimo a viviendas y aeropuertos. El sitio debe ser seco y no expuesto a escorrentías superficiales o inundaciones con periodos de retorno inferiores a 100 años, a no ser de la incorporación de medidas en el proyecto de ingeniería para mitigar este efecto. El sitio no puede estar ubicado sobre fallas geológicas activas ni estar expuesto a deslizamiento de terreno ni subsidencias.

El diseño del vertedero debe contemplar la topografía, disponibilidad del material de cobertura, la posición de la napa freática, la capacidad de soporte del suelo, la hidrología e hidrogeología. Adicionalmente, se debe determinar el volumen máximo disponible y las cotas finales.

El Reglamento define los requerimientos mínimos de impermeabilización en función de la precipitación anual y exige que se incorpore una estimación de la generación de los líquidos lixiviados y el diseño de los sistemas necesarios para su control. De la misma forma se debe estimar la producción de biogás. Para la etapa operativa del vertedero, el reglamento señala lo mismo que la resolución N° 2444, respecto al registro de la cantidad de residuos depositados y la cobertura diaria de ellos. Éste especifica en más detalle las características del material de cobertura y el proceso de compactación de los residuos.

Para el monitoreo y control del vertedero el reglamento detalla sistemas de monitoreo de aguas subterráneas y producción de biogás e incluye una sección sobre el plan de cierre del vertedero.



6. Características de los residuos sólidos

6.1 Generación de residuos sólidos en Antofagasta

La generación de residuos sólidos en la región, según el catastro de residuos sólidos realizado por el Ministerio de Salud (2005), fue de 251.850 ton/año en donde Antofagasta aportó 116.922 ton/año (9743,5 ton/mes), correspondiente al 46,4% del total generado.

Actualmente la gestión de RSD y residuos asimilables, dentro de la ciudad de Antofagasta, es desarrollada tanto por la empresa privada como por la municipalidad. Para tales efectos la ciudad se encuentra dividida en tres áreas de retiro:

Área sur empresa HIMCE Ltda.: se extiende desde calle Rancagua hasta comunidad Coloso, sector Salar de Carmen y barrio industrial “La negra”. Esta empresa retira aproximadamente el 34,7% de los residuos de la ciudad.

Área norte empresa Aseo Industriales Casino: se extiende desde calle Rancagua, Antonio Rendic, Av. Isabel Riquelme, Montegrande y cobija por el Sur, Diagonal Pérez Zujovic y los Topacios por el norte, línea de cerro o borde urbano por el este y borde costero. Esta empresa retira aproximadamente el 28,9% del total de residuos.

Área servicio municipal: abarca desde la Av. Diagonal, calle Los Topacios al norte hasta el límite urbano, cubriendo el 7,2% del total de residuos.

Todos estos RSD y residuos asimilables son derivados al vertedero Municipal La Chimba. Además se incorpora un 29,2% del total de residuos, que es trasladado por particulares al recinto (como residuos provenientes de movimientos de tierra y escombros de la construcción). En la siguiente Tabla 6-1 se observa el detalle mensual de residuos RSD y asimilables generados en la ciudad los años 2005 y 2006.

año	2005				2006				
	IMA (ton)	HIMCE (ton)	Particulares (ton)	Total RSU (ton)	IMA (ton)	CASINO (ton)	HIMCE (ton)	Particulares (ton)	Total RSU (Ton)
Enero	3.292	4.140	1.918	9.350	1.345	2.628	3.864	4.028	11.865
Febrero	2.806	4.265	1.604	8.675	612	3.268	3.567	3.067	10.514
Marzo	3.048	3.900	1.583	8.531	748	3.428	3.849	3.422	11.447
Abril	2.865	3.630	2.301	8.796	665	3.147	3.617	2.540	9.969
Mayo	1.224	3.710	3.318	8.252	794	3.470	3.689	2.693	10.646
Junio	2.911	3.550	3.125	9.586	691	3.164	3.428	3.046	10.329
Julio	2.977	3.520	3.792	10.289	693	3.368	3.768	3.601	11.430
Agosto	3.275	4.960	2.732	10.967	741	3.441	3.851	3.540	11.573
Septiembre	3.152	3.660	3.463	10.275	674	2.468	3.739	2.287	9.168
Octubre	3.185	3.815	3.752	10.752	783	2.489	3.742	3.159	10.173
Noviembre	3.223	3.735	3.748	10.706	847	2.973	3.938	3.897	11.655
Diciembre	3.504	3.830	3.409	10.743	748	3.798	4.131	2.623	11.300
Total	35.462	46.715	34.745	116.922	9.341	37.642	45.183	37.903	130.069

Tabla 6-1. Generación detallada de residuos sólidos en 2005 y 2006 (Dirección de aseo, IMA).

año	2005				2006				
mes	IMA (ton)	HIMCE (ton)	Particulares (ton)	Total RSU (ton)	IMA (ton)	CASINO (ton)	HIMCE (ton)	Particulares (ton)	Total RSU (Ton)
Enero	3.292	4.140	1.918	9.350	1.345	2.628	3.864	4.028	11.865
Febrero	2.806	4.265	1.604	8.675	612	3.268	3.567	3.067	10.514
Marzo	3.048	3.900	1.583	8.531	748	3.428	3.849	3.422	11.447
Abril	2.865	3.630	2.301	8.796	665	3.147	3.617	2.540	9.969
Mayo	1.224	3.710	3.318	8.252	794	3.470	3.689	2.693	10.646
Junio	2.911	3.550	3.125	9.586	691	3.164	3.428	3.046	10.329
Julio	2.977	3.520	3.792	10.289	693	3.368	3.768	3.601	11.430
Agosto	3.275	4.960	2.732	10.967	741	3.441	3.851	3.540	11.573
Septiembre	3.152	3.660	3.463	10.275	674	2.468	3.739	2.287	9.168
Octubre	3.185	3.815	3.752	10.752	783	2.489	3.742	3.159	10.173
Noviembre	3.223	3.735	3.748	10.706	847	2.973	3.938	3.897	11.655
Diciembre	3.504	3.830	3.409	10.743	748	3.798	4.131	2.623	11.300
Total	35.462	46.715	34.745	116.922	9.341	37.642	45.183	37.903	130.069

Figura 6.1. Comparación mensual de RSD y asimilables generados en año 2005 y 2006.

Actualmente no se cuenta con un registro detallado histórico de RSD y asimilables generados (mes a mes), sólo se logró obtener de la Dirección de aseo de la IMA, la estimación de los años 2005 y 2006.

La Figura 6.1 muestra un crecimiento de 9,7% en la generación de RSD y asimilables del año 2006 respecto al año anterior.

Los factores que intervienen en la generación de residuos son variados, pero principalmente en Antofagasta se debe al aumento en la actividad económica (principalmente minera, con la consecuente generación de nuevas plazas de trabajo), nuevos proyectos mineros e instalación de empresas de servicios relacionados con el rubro minero e industrial, aumento en la población estable de la ciudad (ver Tabla 6-2) y población flotante (trabajadores de otras ciudades), así como la apertura de nuevos centros comerciales (Mall Plaza Antofagasta, Supermercados, etc.).

De acuerdo a estos factores, se estima una generación actual aproximada de RSD y residuos asimilables per cápita (PPC) de 1,05 kg/hab-día, según los registros de la Dirección de aseo de la IMA. Esta tasa se encuentra cercana al valor promedio que entrega el Ministerio de Salud para zonas urbanas con una generación PPC de 1 kg/hab-día, por lo tanto, la tasa promedio obtenida es sólo un valor de referencia para analizar el comportamiento de la generación de residuos sólidos en los últimos 10 años en la ciudad de Antofagasta.

Año	N° Hab	Aseo calles ton/año	Oper. poblac. ton/año	Saneam. ambiental ton/año	Manten. playas ton/año	Total Aseo Público ton/año	RSD ton/año	RSD + Asimilables ton/año	RSD + Asimilables ton/mes	PPC kg/hab - día
1997	281.235	16.625	-	-	950	17.575	87.658	105.233	8.769	1,03
1998	288.663	19.368	-	-	875	20.243	102.854	123.097	10.258	1,17
1999	296.099	22.846	-	-	1.065	23.911	107.709	131.620	10.968	1,22
2000	303.538	21.716	-	1.500	1.261	24.477	110.424	134.901	11.242	1,22
2001	309.956	10.460	-	3.625	1.512	15.597	91.730	107.327	8.944	0,95
2002	316.389	11.161	4.162	3.401	1.305	20.028	93.908	113.936	9.495	0,99
2003	322.819	15.604	3.671	3.672	4.326	27.272	88.754	116.026	9.669	0,98
2004	329.223	16.728	4.700	4.876	5.364	31.668	83.376	115.044	9.587	0,96
2005	335.672	17.946	5.459	5.318	7.862	36.585	80.337	116.922	9.744	0,95
2006	341.942	17.988	2.359	6.845	8.574	35.766	97.867	130.069	10.839	1,04
									media	1,05

Tabla 6-2. Resumen generación de residuos sólidos urbanos en Antofagasta. (Dirección de aseo, IMA).

6.2 Composición de RSD

Según los estudios pertenecientes a la Dirección de aseo de la IMA, realizados por la consultora Tesam-Roche (1995), los RSD generados en Antofagasta se caracterizan por un bajo porcentaje de materia orgánica (32,97%), en comparación con la Región Metropolitana (45,79%). Los residuos de papel y cartones (20,18%) y los residuos plásticos (12%), son levemente superiores a los de Santiago (17,12% y 9,72% respectivamente). Se explica esta situación, por consumo mayoritario de alimentos envasados y bajo consumo de frutas y verduras, todo esto ligado a factores económicos (como el poder adquisitivo), factores climáticos (zonas hiperáridas), factores geográficos (lejanía de centros de abastecimiento y productores de frutas y verduras).

En la Tabla 6-3 se presenta una caracterización de los residuos sólidos que son generados en la ciudad de Antofagasta.

Componente	RSD (%)	Comercial (%)
Materia orgánica	32,97	12,33
Papeles y cartones	20,18	19,53
Plásticos	12,00	6,90
Vidrios	9,18	3,72
Metales	8,70	11,50
Otros	16,97	46,03

Tabla 6-3. Caracterización por componente de RSD y comerciales.

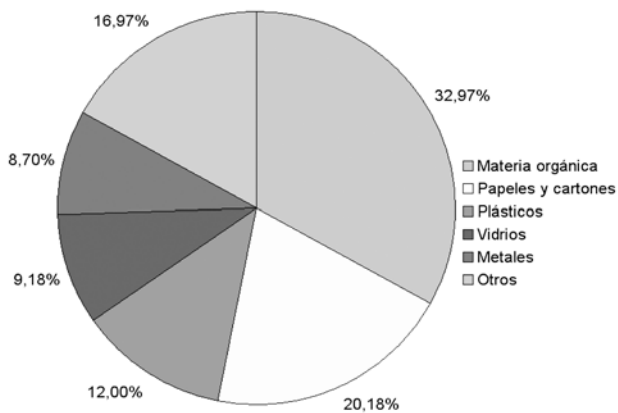


Figura 6.2. Caracterización por componente de residuos domiciliarios.

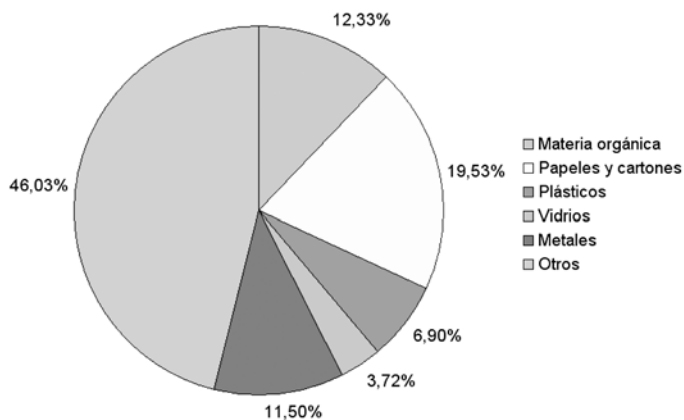


Figura 6.3. Caracterización por componente de residuos comerciales.

En la Tabla 6-4 se presenta la caracterización de los residuos sólidos asimilables o residuos industriales no peligrosos.

Componente	Asimilable (%)
Materia orgánica	1,22
Chatarra	5,50
Papeles y cartones	12,60
Plásticos	0,19
Vidrios	42,75
Madera	0,61
Metales	1,22
Otros	35,95

Tabla 6-4. Caracterización por componente de residuos asimilables (D. de aseo, IMA, 1995).

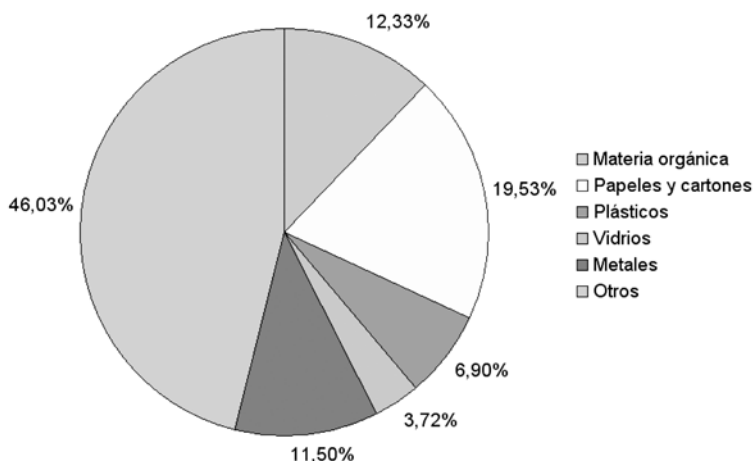


Figura 6.4. Caracterización por componente de residuos asimilables.

Debido a la antigüedad de los registros, se sugiere realizar un estudio actualizado de caracterización de RSD y asimilables, para analizar la situación actual de la ciudad. Esta herramienta ayudará a programar y desarrollar con eficiencia un plan de gestión integral de residuos para Antofagasta.

6.3 Proyección de residuos sólidos 2007 - 2037

A través del estudio de proyección poblacional (ver Anexo B) y la tasa de PPC de la ciudad de Antofagasta proyectada en el tiempo bajo un modelo exponencial (ecc 6.1),

con una tasa de crecimiento relativa de residuos de $\alpha = 0,01$ para zonas urbanas ó $\alpha = 0,005$ para zonas rurales y con PPC0 del año base (Szantó, 2007).

$$PPC = PPC_0 * e^{\alpha t} \quad \text{ecc. 6.1}$$

A través de los valores entregados por este modelo matemático y multiplicado por el número de habitantes por año, se obtiene una aproximación de los residuos que se generarán en el tiempo.

Para calcular los volúmenes de disposición de residuos sólidos domiciliarios y asimilables se divide las cantidades proyectadas residuos por la densidad compactada de 0,6 ton/m³ para el caso vertedero sanitario controlado convencional (Tchobanoglous, 1998) y de 1 ton/m³ para vertedero controlado de alta densidad (HD) sin reciclaje (IMABE, 2007). Además, se estimaron los volúmenes de disposición de HD asumiendo un 20% de reciclaje sobre la fracción orgánica e inorgánica de los residuos sólidos a disponer.

En la Tabla 6-5 se muestra el volumen generado por los 3 sistemas de disposición final de residuos sólidos proyectados en los siguientes 30 años en la ciudad de Antofagasta.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 6-5 para los sistemas de vertido de residuos descritos, se observa en una proyección de 30 años, que el método de vertedero sanitario convencional acumula aproximadamente 10.700.000 m³, para el método de vertedero controlado de HD sin reciclaje un 40% menos, con aproximadamente 6.400.000 m³ y para el método de vertedero controlado de HD con aplicación de reciclaje, un 52% menos con aproximadamente 5.100.000 m³.

Esto revela la importancia de aplicar un sistema adecuado de reciclaje y de aplicar la mayor compactación de disposición a los residuos sólidos descartados y de esta forma, minimizar el volumen y dar mayor vida útil al terreno donde se ubica el vertedero controlado.

Periodo	Año	N° habitantes	PPC kg/hab/día	Peso anual ton/año	Compactación convencional		Compactación de HD sin reciclaje		Compactación de HD con reciclaje 20%	
					Volumen m³/año	Volumen acumulado m³/año	Volumen m³/año	Volumen acumulado m³/año	Volumen m³/año	Volumen acumulado m³/año
0	2007	349.123	1,05	133.801	223.002	223.002	133.801	133.801	107,041	107,041
1	2008	355.513	1,06	137.620	229.366	452.368	137.620	271.421	110.096	217.137
2	2009	361.905	1,07	141.502	235.837	688.205	141.502	412.923	113.202	330.338
3	2010	368.319	1,08	145.457	242.429	930.634	145.457	558.380	116.366	446.704
4	2011	374.726	1,09	149.475	249.125	1.179.758	149.475	707.855	119.580	566.284
5	2012	380.805	1,10	153.426	255.710	1.435.469	153.426	861.281	122.741	689.025
6	2013	386.880	1,11	157.440	262.401	1.697.869	157.440	1.018.722	125.952	814.977
7	2014	392.977	1,13	161.529	269.215	1.967.084	161.529	1.180.250	129.223	944.200
8	2015	399.039	1,14	165.669	276.115	2.243.199	165.669	1.345.919	132.535	1.076.735
9	2016	405.143	1,15	169.894	283.156	2.526.355	169.894	1.515.813	135.915	1.212.650
10	2017	410.678	1,16	173.945	289.909	2.816.264	173.945	1.689.758	139.156	1.351.807
11	2018	416.234	1,17	178.071	296.784	3.113.048	178.071	1.867.829	142.456	1.494.263
12	2019	421.760	1,18	182.248	303.747	3.416.795	182.248	2.050.077	145.798	1.640.062
13	2020	427.332	1,20	186.512	310.853	3.727.648	186.512	2.236.589	149.209	1.789.271
14	2021	432.860	1,21	190.823	318.038	4.045.686	190.823	2.427.412	152.658	1.941.929
15	2022	441.950	1,22	196.788	327.981	4.373.667	196.788	2.624.200	157.431	2.099.360
16	2023	451.231	1,23	202.940	338.234	4.711.900	202.940	2.827.140	162.352	2.261.712
17	2024	460.707	1,24	209.284	348.807	5.060.708	209.284	3.036.425	167.428	2.429.140
18	2025	470.382	1,26	215.827	359.712	5.420.420	215.827	3.252.252	172.662	2.601.801
19	2026	480.260	1,27	222.574	370.957	5.791.376	222.574	3.474.826	178.059	2.779.861
20	2027	490.345	1,28	229.532	382.553	6.173.929	229.532	3.704.358	183.625	2.963.486
21	2028	500.643	1,30	236.708	394.513	6.568.442	236.708	3.941.065	189.366	3.152.852
22	2029	511.156	1,31	244.107	406.845	6.975.287	244.107	4.185.172	195.286	3.348.138
23	2030	521.890	1,32	251.738	419.563	7.394.851	251.738	4.436.910	201.390	3.549.528
24	2031	532.850	1,33	259.608	432.680	7.827.530	259.608	4.696.518	207.686	3.757.215
25	2032	544.040	1,35	267.724	446.206	8.273.736	267.724	4.964.242	214.179	3.971.393
26	2033	555.465	1,36	276.093	460.155	8.733.891	276.093	5.240.335	220.874	4.192.268
27	2034	567.129	1,38	284.724	474.539	9.208.431	284.724	5.525.058	227.779	4.420.047
28	2035	579.039	1,39	293.625	489.374	9.697.805	293.625	5.818.683	234.900	4.654.946
29	2036	591.199	1,40	302.804	504.673	10.202.478	302.804	6.121.487	242.243	4.897.189
30	2037	603.614	1,42	312.270	520.449	10.722.927	312.270	6.433.756	249.816	5.147.005

Tabla 6-5. Proyección de residuos sólidos generados en Antofagasta entre 2007 – 2037.



7. Prediseño de ingeniería básica

7.1 Elección del método de disposición final

Para la determinación del método de disposición final de los residuos sólidos generados en la ciudad de Antofagasta, se buscó utilizar un sistema innovador y acorde a las nuevas tendencias de cuidado medio ambiental, donde se lograra minimizar el volumen de disposición final y a su vez, presentara una alternativa a la disposición de residuos que se realiza en los vertederos sanitarios convencionales, donde estos residuos son dispuestos mezclados y no existe una segregación previa de residuos para su posterior reciclaje.

De acuerdo a estas observaciones y al análisis realizado en los capítulos anteriores, como las características de lugar y las proyecciones de volúmenes de residuos sólidos en el tiempo, se ha decidido utilizar el sistema de vertedero controlado de alta densidad (HD).

Es importante hacer notar que debido al alcance de esta memoria, sólo se mencionará las características generales de la planta de tratamiento y queda para estudios posteriores el análisis del sistema de gestión de residuos sólidos urbanos que se implementará en la planta para lograr su rendimiento óptimo. Por lo tanto, se asumen valores promedios para la producción de balas de alta densidad y propiedades físicas planteadas por la empresa española IMABE (Tabla 7-1).

7.1.1 Descripción del sistema de vertido de alta densidad (HD)

De acuerdo a lo expuesto en el punto 2.4.1.3, este sistema procesa residuos sólidos domiciliarios y residuos asimilables, quedando excluidos los residuos peligrosos o industriales no asimilables. Para el caso de residuos provenientes del área de la construcción, se dispondrán en un sector habilitado donde no se mezclen con otro tipo de residuos y en su eventualidad puedan ser reutilizados para obras como relleno o soporte para taludes.

El sistema de vertido de alta densidad, incorpora una planta de tratamiento de residuos sólidos, donde se realiza el proceso de recuperación y prensado, cercana al vertedero o instalada en un lugar estratégico dentro de la ciudad, evitando el uso de una estación de transferencia (ver Figura 7.1).



Figura 7.1. Planta de tratamiento de residuos sólidos de Meruelo, España. (IMABE, 2007).



Figura 7.2. Transporte de balas de alta densidad (IMABE, 2007).

El área de operación de la planta, debe ser una estructura que contemple una zona de descarga de los residuos, una zona de compactación y una de pos-compactación para cargar las balas a los camiones o plataformas que transportan las balas al vertedero (ver Figura 7.2).

Esta planta procesa residuos sólidos domiciliarios y asimilables, recogido por camiones recolectores proveniente de la ciudad y lo incorpora a través de cintas transportadoras metálicas, donde personal calificado segrega y selecciona residuos reciclables, disminuyendo el volumen de residuos sólidos a disponer.

Tanto la cinta alimentadora, como la prensa embaladora cuentan con fosos comunicados a una red de drenaje controlado, para evacuar los líquidos escurridos de los residuos sólidos y conducirlos a un tratamiento adecuado.

Los residuos que no son reciclados (residuos de rechazo), continúan en el proceso a la sección de prensa embaladora donde se comprimen a una densidad de 850 a 1.200 kg/m³ (dependiendo del tipo de prensa), obteniéndose poliedros regulares de 6 caras que son embalados con alambres de hierro recocido de 4 mm, dándoles estabilidad geométrica para su posterior transporte y disposición en pilas, reduciendo los problemas de futuros asentamientos en el vertedero.

Desde el punto de vista operacional, se utiliza menos material de cobertura, ya que los residuos sólo se cubren en su parte superior al finalizar la construcción modular de la pila, lo que significa una reducción de 70 a 75% de cobertura diaria en comparación con un vertedero convencional. Debido a esto, se obtiene un frente de trabajo amplio descubierto para empalmar con otras pilas (ver Figura 7.3).



Figura 7.3. Colocación de balas de alta densidad (IMABE, 2007).

Se mejora considerablemente el control de las operaciones en el vertedero, ya que posee una menor área de exposición de residuos. Esto asegura la eliminación de recolectores y tráfico de vehículos en el frente de trabajo, permitiendo un óptimo desplazamiento de maquinarias que disponen balas de residuos compactados, con el consecuente ahorro de tiempo y combustible que esto implica.

De esta forma, se logra dar mayor vida útil al terreno de disposición, colocando entre un 40 a 60% más de residuos en el mismo espacio que el sistema de vertedero sanitario convencional, donde los residuos son dispuestos mezclados y sin ninguna clasificación aparente (ver Figura 7.4).



Figura 7.4. Vista panorámica de un vertedero de alta densidad (IMABE, 2007).

El sistema de compactación está constituido por una o más unidades que procesan entre 57 a 60 ton/hra, cada una dependiendo del modelo y requerimientos de la planta (Tabla 7-1).

Producción media RSU por hora	57-60 ton
Dimensión de la bala	1.100 x 1.100 x longitud variable
Potencia instalada bombas principal	4 x 57 = 228 kw
Potencia instalada bombas auxiliares	7,5 kw
Fuerza máxima de prensado	269 ton
Boca de alimentación	2.000 x 1.100 mm.
Volumen cámara de carga	2,42 m ³
Presión específica de compactación	20 kg/cm ²
Densidad RSU s/compactar	200-240 kg/m ³
Densidad RSU compactado	1.000-1.200 kg/m ³
Peso aprox. bala RSU long. 2.000 mm.	2.500 kg
Balas por hora aprox.	22 a 24
Tipo de atado	Longitudinal en el sentido de prensado
Acción de atado	En el interior del túnel con la bala bajo presión
Posición de atado	Vertical con respecto a la bala
Material de atado	Alambre de hierro recocido de Ø 4 mm
Número de alambres	5 por bala
Capacidad deposito hidráulico	6.000 lt
Peso aprox. de la maquina	90.000 kg

Tabla 7-1. Especificaciones de producción de balas de RSD y asimilables (IMABE, 2007).

7.2 Capacidad de la cuenca y proyección de niveles finales

Para la determinación de la capacidad volumétrica de la cuenca se consideraron factores como la topografía del terreno y las proyecciones de residuos sólidos en el tiempo (Tabla 6-5). El análisis volumétrico fue realizado con los programas computacionales Surfer version 8 y corroborado con Land Desktop 2007.

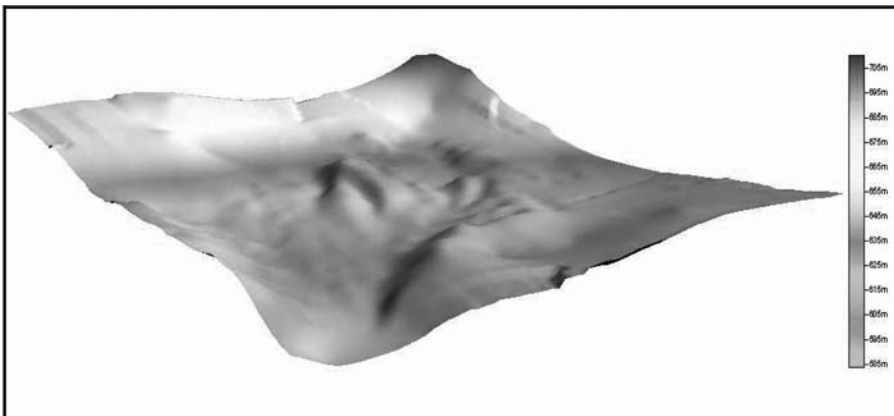


Figura 7.5. Modelación tridimensional de la cuenca de Alto Portezuelo.

Como se observa en la Figura 7.5, la cuenca de Alto Portezuelo posee una pequeña área disponible para disposición de residuos bajo la cota 650 m.s.n.m., con un volumen aproximado de 2.165.000 m³. En su zona central se observa una colina con un volumen de 61.000 m³, compuesta de 2 pequeñas quebradas donde se observan depósitos coluviales y afloramientos de estrato rocoso, por lo que no se considerará su remoción, ya que elevarían los costos del proyecto.

Si el volumen disponible de la cuenca es comparado con los volúmenes de residuos sólidos acumulados en el tiempo, calculados en la Tabla 6-5, se tiene que dentro de las tres curvas (ver Figura 7.6), la alternativa de compactación de alta densidad (HD) con aplicación de reciclaje es el sistema más óptimo de los métodos descritos, pero el volumen disponible del sector es insuficiente, obteniendo un horizonte no superior a 15 años, por lo tanto, es necesario ampliar el área de disposición final y de esta forma extender la vida útil del proyecto.

Al analizar la topografía del lugar, el área de disposición puede ser extendida al poniente de la cuenca y mediante diferencias de volúmenes sobre la superficie del terreno, se estima un volumen adicional aproximado sobre el terreno de 2.567.000 m³. De acuerdo a estos resultados, se obtiene para el sector de Alto Portezuelo, una capacidad volumétrica bruta aproximada de 4.732.000 m³, lo que significa una vida útil estimada de 28 años para la aplicación del método de compactación de HD con reciclaje.

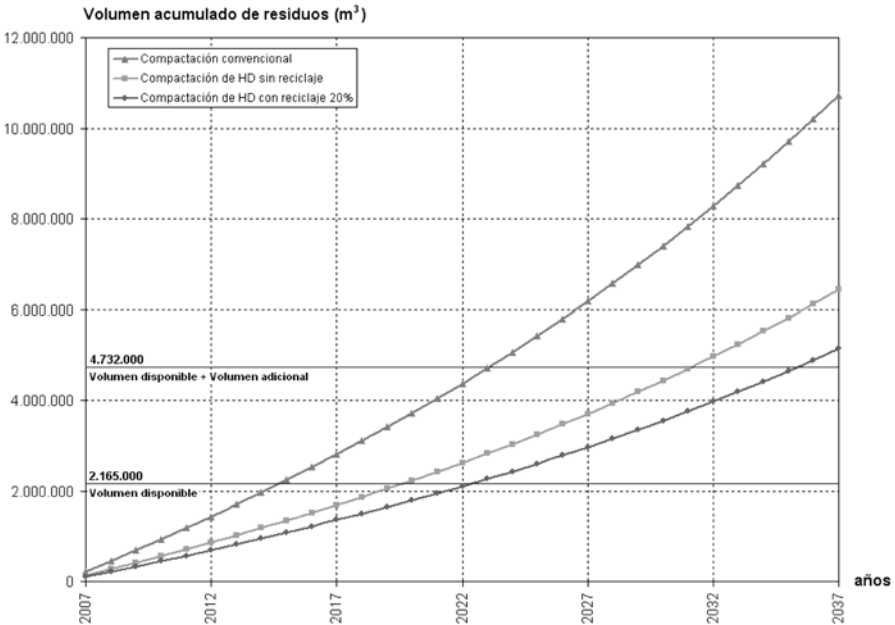


Figura 7.6. Proyección de residuos sólidos generados en Antofagasta al 2037.

En este método se asume la aplicación de un sistema de segregación y reciclaje de un 20% del total de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, considerando dentro de este porcentaje, la clasificación tanto de la fracción inorgánica como orgánica. Por lo tanto, las balas de HD contienen tanto residuos de rechazo como fracción reciclable.

El porcentaje considerado es conservador si se toma en cuenta los estándares de reciclaje en algunos países europeos que bordean el 80% de sus residuos, por lo que se podría obtener una mayor vida útil del vertedero si se pone énfasis en la aplicación de programas integrales de minimización y reciclaje.

Los otros métodos de compactación quedaron descartados en su aplicación, debido a que no consideran las nuevas políticas ambientales de disposición final que otorgan un valor agregado a los residuos reciclados (Política de producción limpia) y no conceden una mayor vida útil al proyecto (Tabla 7-2).

Método de disposición de RSD y asimilables	Vida útil (años)
Compactación convencional	16
Compactación de HD sin reciclaje	24
Compactación de HD con reciclaje	28

Tabla 7-2. Comparación vida útil de Alto Portezuelo para cada método de disposición final.

En la Figura 7.7 se muestra el área de disposición de residuos y las áreas adicionales de terreno para disponer las balas de alta densidad.

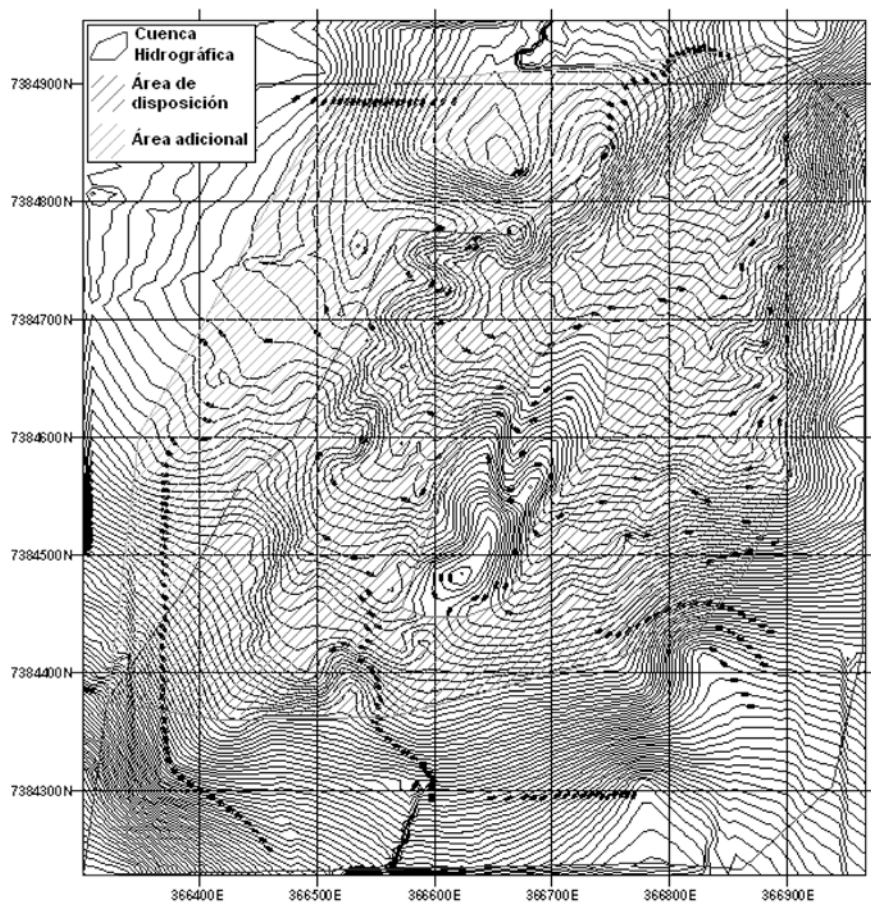


Figura 7.7. Área de disposición final de balas de alta densidad.

La Figura 7.8 muestra los contornos finales del vertedero controlado al cumplirse la capacidad volumétrica total del sector de Alto Portezuelo.

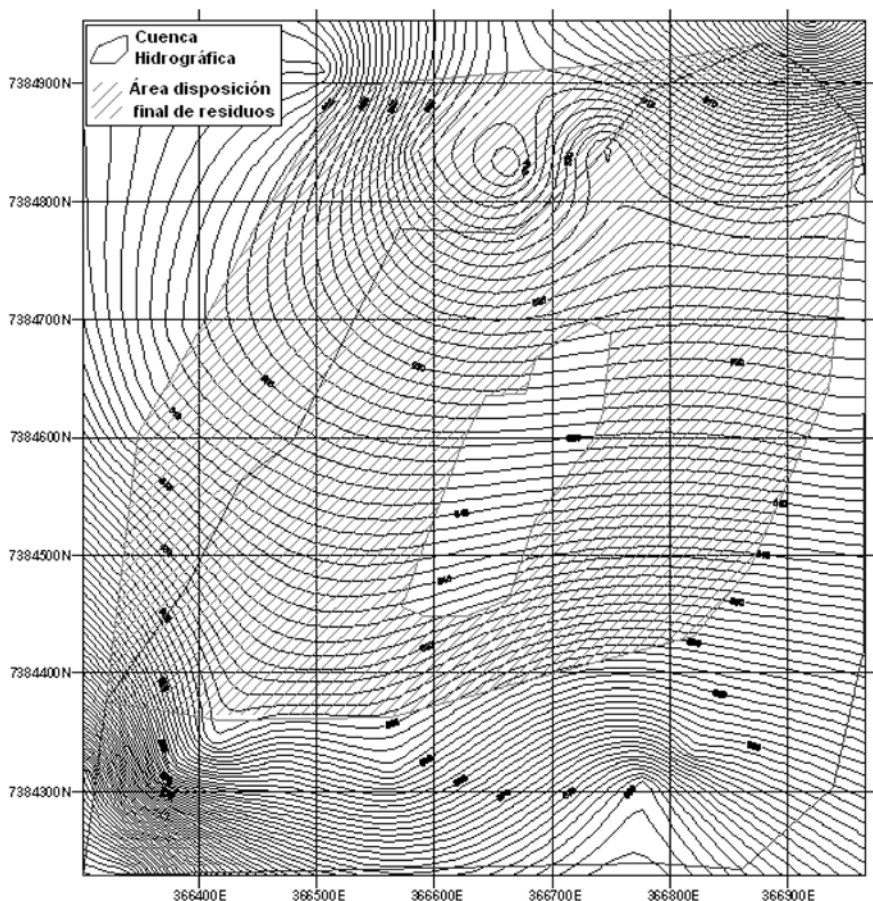


Figura 7.8. Contornos finales vertedero controlado de alta densidad.

7.3 Preparación de terrenos

7.3.1 Infraestructura de apoyo

De acuerdo a lo planteado en 7.2 y 4.9, referido a la capacidad volumétrica de la cuenca y la buena capacidad de soporte del suelo, se determinó utilizar como infraestructura de apoyo, el sistema de terrazas o plataformas para distribuir las áreas de disposición de las balas de alta densidad.

Su construcción se basa en cortes compensados que siguen la línea del terreno, distribuyendo el material extraído en la misma plataforma de apoyo o de relleno para otras y de esta forma aminorar los costos por volúmenes de corte.

Según lo especifica el artículo 15 del Proyecto de Reglamento de Rellenos Sanitarios (2003), se consideran en los taludes de terrazas, pendientes no superiores a 1(Vertical):3(Horizontal), para evitar la inestabilidad o corrimiento de la masa del suelo. Además, debido a la elevada pendiente del terreno natural (20,18%), se sugiere realizar un escalonamiento previo de la base donde se apoyará la terraza (recomendación mencionada en Manual de carreteras vol. 3, 2002).

Se sugiere para cada terraza una pendiente de bombeo de 2% en dirección al centro de ésta, donde se ubicará el sistema de drenaje de líquidos percolados que colectará los posibles flujos producto de la degradación de los residuos o infiltración de aguas lluvias sobre la base.

7.3.2 Distribución de terrazas

La distribución de las plataformas está dividida en dos etapas de ejecución. En una primera etapa, se sugiere el emplazamiento de terrazas en el área disponible dentro de la cuenca, comenzando su construcción desde la zona más baja hasta alcanzar las faldas de cerro que rodean la cuenca y una segunda etapa, que se desarrolla en el área adicional (sector poniente). Además, se configuran dentro del vertedero, las vías de acceso y calles secundarias que derivan a las terrazas donde se disponen las balsas de alta densidad. En la Figura 7.9 y Figura 7.10 se muestra la estructuración de las plataformas de apoyo para la primera y segunda etapa del proyecto.

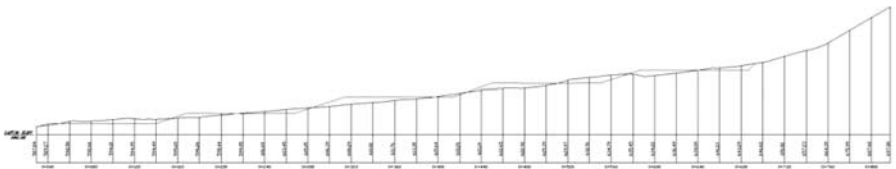


Figura 7.9. Perfil longitudinal de terrazas, sector etapa 1.

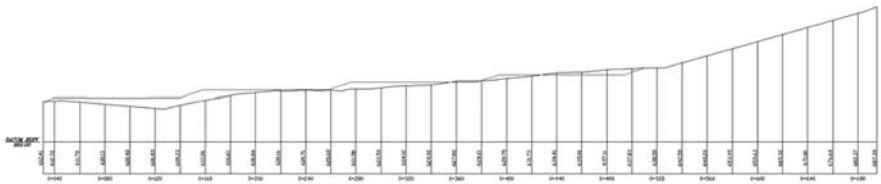


Figura 7.10. Perfil longitudinal de terrazas, sector etapa 2.

Como se observa en la Figura 7.11, la distribución de las plataformas están identificadas y sectorizadas de acuerdo a la planificación de disposición de balas. Su colocación debe realizarse en forma ordenada, en pilas de 4 filas verticales (4,5 m sobre la plataforma), evitando disponer balas que presenten algún tipo de inestabilidad geométrica. Si para tal caso, algunas balas presentasen una no conformidad, deberán ser dispuestas en un sector dentro del vertedero destinado exclusivamente para ello.

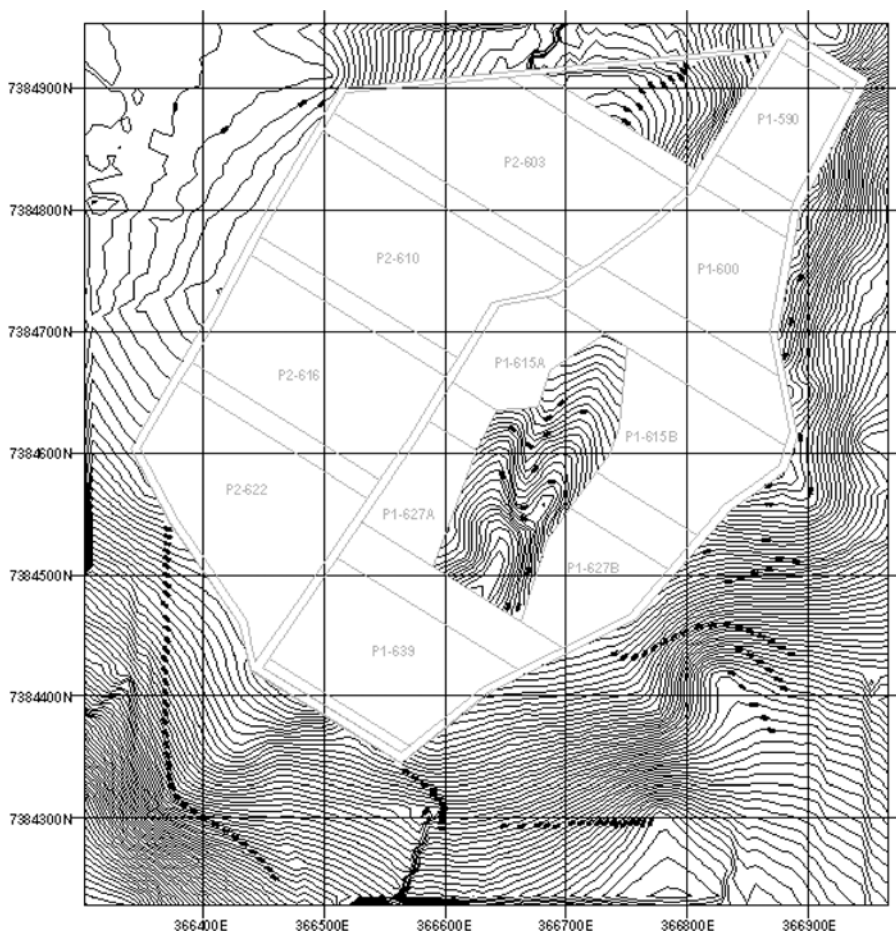


Figura 7.11. Distribución en planta de terrazas.

En las Tablas 7-3 y 7-4 se muestran los volúmenes de corte compensados aproximados de acuerdo a la distribución de plataformas dentro del vertedero y a las etapas del proyecto.

Terraza	Área terraza m ²	Área talud m ²	Área total m ²	Volumen de corte m ³	Volumen de terraplén m ³
P1-590	7.164	825	7.989	17.779	1.777
P1-600	12.219	2.257	14.476	17.996	26.639
P1-615A	6.469	5.620	12.090	39.578	31.532
P1-615B	12.211	3.747	15.958	638	21.605
P1-627A	5.739	1.626	7.365	24.653	4.893
P1-627B	7.714	3.564	11.278	2.139	10.523
P1-639	15.311	6.629	21.940	35.870	21.590
Total	66.827	24.268	91.095	138.652	118.557

Tabla 7-3. Movimiento de tierra mediante volúmenes de corte compensado para etapa 1.

Terraza	Área terraza m ²	Área talud m ²	Área total m ²	Volumen de corte m ³	Volumen de terraplén m ³
P2-603	21.881	2.938	24.819	42.657	40.199
P2-610	20.247	4.265	24.512	33.852	25.155
P2-616	18.711	3.400	22.111	9.785	16.902
P2-622	16.799	3.285	20.084	32.598	15.807
Total	77.638	13.888	91.526	118.892	98.063

Tabla 7-4. Movimiento de tierra mediante volúmenes de corte compensado para etapa 2.

7.3.3 Material de cobertura intermedia de pilas

El material de cobertura o de empréstito se utiliza para cubrir las pilas de balas de alta densidad, en su plano horizontal según el desarrollo de las pilas con el fin de eliminar la presencia de vectores sanitarios, mejorar la estética del vertedero y limitar el contacto con humedad o filtración superficial.

Según el artículo 33 del Proyecto de Reglamento de Rellenos Sanitarios, esta cobertura deberá tener las siguientes características:

Ser fácilmente trabajable con maquinaria, incluso en humedades superiores a la óptima.

Una vez compactada, alcanzar una permeabilidad que permita controlar la infiltración de aguas lluvias y que posibilite el control del paso de gases o vapores a través de la pila de alta densidad.

Tener una granulometría bien graduada y un tamaño máximo de partículas de 3/4.

Presentar una vez compactada una permeabilidad máxima de 10^{-4} cm/seg.

La cobertura deberá colocarse sobre las pilas, debiendo esparcirse y compactarse, alcanzando un espesor final mínimo de 20 cm en toda la superficie y para las pilas que se superpongan sucesivamente, pudiendo alcanzar hasta los 25 m como cota máxima, de acuerdo a la capacidad de soporte del suelo. Por lo tanto, se debe contar con un volumen aproximado de cobertura para la primera y segunda etapa de 66.827 m³ y 77.638 m³, respectivamente.

Estos áridos pueden ser obtenidos de las mismas excavaciones en progreso o de fuentes de empréstito extraído de los sectores aledaños de Alto Portezuelo (ver Figura 7.12), donde se observan suelos de buena calidad y con una distribución granulométrica bien graduada.

Para el caso de estos terrenos se sugiere previamente verificar los límites de pertenencias mineras vecinas en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

De acuerdo a las capacidades de cada terraza, se muestran en las Tablas 7-5 y 7-6 los volúmenes aproximados de cobertura y de disposición final para niveles verticales de 5 pilas de balas de residuos de alta densidad.



Figura 7.12. Área de empréstito, sector poniente cuenca de Alto Portezuelo.

Terraza	Volumen cobertura m³	Volumen RSD + asimilables m³
P1-590	7164	211.525
P1-600	12219	417.827
P1-615A	6469	440.198
P1-615B	12211	165.789
P1-627A	5739	278.019
P1-627B	7714	134.620
P1-639	15311	517.466
Total	66.827	2.165.445

Tabla 7-5. Volúmenes de cobertura y de residuos dispuestos para etapa 1.

Terraza	Volumen cobertura m³	Volumen RSD + asimilables m³
P2-603	21881	699.141
P2-610	20247	555.165
P2-616	18711	461.214
P2-622	16799	851.992
Total	77.638	2.567.512

Tabla 7-6. Volúmenes de cobertura y de residuos dispuestos para etapa 2.

7.4 Estudio de generación de líquido percolado, sistema de monitoreo y control

Este estudio tiene como objetivo estimar la cantidad de agua percolada a través de los residuos (lixiviado) que se puede presentar en el vertedero. Este lixiviado tiene características físico – químicas especiales que lo convierten en una de las fuentes más importantes de contaminación al medio ambiente.

A través de un balance de agua es posible hacer una estimación aproximada del líquido percolado generado y así de esta forma dimensionar las instalaciones para su manejo y tratamiento.

7.4.1 Balance de agua

Se utilizó el Balance de agua planteado por C. W. Thornthwaite (1944), que establece una relación entre la suma de todas las cantidades de agua que entran en el vertedero y la sustracción de las cantidades de agua consumidas en las reacciones químicas,

así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua (ver ecc. 7.1).

Como entradas al vertedero se consideraron las precipitaciones mensuales puntas y como salidas, las evapotranspiraciones mensuales, la capacidad de campo o capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla y la fracción de la precipitación que se pierde por escurrimiento superficial, que se considera como pérdida o salida.

Percolación =

Precipitación – (Escorrentía superficial + Evapotranspiración + Retención) ecc. 7.1

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación punta mensual (mm)	0,8	0	0,8	0,8	5,5	42	23,3	11	1,2	2	0,4	0,1
Escurrimiento (mm)	0,5	0	0,5	0,5	3,6	27,7	15,4	7,3	0,8	1,3	0,3	0,1
Infiltración (mm)	0,3	0	0,3	0,3	1,9	14,3	7,9	3,7	0,4	0,7	0,1	0
Evapotranspiración Potencial Ajustada (mm)	76,3	67,6	64,9	56,1	48,7	39,4	39,3	40,7	44,8	55,1	60,6	71
Diferencia (mm)	-76	-67,6	-64,6	-55,8	-46,8	-25,1	-31,4	-37	-44,4	-54,4	-60,4	-71
Capacidad de absorción del suelo espesor (20 cm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diferencia de capacidades mes a mes (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Evapotranspiración real (mm)	0,3	0	0,3	0,3	1,9	14,3	7,9	3,7	0,4	0,7	0,1	0
Percolación mensual (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 7-7. Balance hídrico para el cálculo de producción de lixiviado.

Considerando las precipitaciones puntas mensuales históricas (ver Anexo A-7) y el balance de agua (ecc. 7.1) se determina en la Tabla 7-7 que existiría una nula percolación debido a la alta tasa de evapotranspiración en el suelo que evapora la infiltración que se logra captar.

Además, si se considera que la planta de tratamiento de residuos sólidos retira una parte de la fracción orgánica y los residuos descartados se disponen en balas de alta densidad, el porcentaje de humedad será bastante bajo, tendiendo a ser nulo.

Es por esto, que se sugiere innecesario implementar algún sistema de recolección de líquidos percolados o de un sistema de monitoreo y control. Sólo se utilizará un sistema de impermeabilización de fondo para proteger la base del vertedero.

7.4.2 Diseño del sistema de impermeabilización de fondo

Para el material de base se debe utilizar áridos de tamaño máximo de partículas de 3/4", compactados al 95% de su D.M.C.S. Se debe obtener una superficie lisa, evitando elementos punzantes como gravas angulosas que superen el tamaño máximo establecido. Su espesor no debe ser menor a 40 cm y con una conductividad

hidráulica equivalente máxima de 10-5 cm/seg. Sobre esta capa se coloca una cubierta de HDPE (Polietileno de alta densidad) con un espesor de 1,5 mm, acompañada de un geotextil de prolipropileno no tejido, para luego colocar una última capa de tierra (arena o material de cobertura) de 60 cm de espesor, con áridos de tamaño máximo de partículas de 3/4", compactados al 95% de su D.M.C.S. (ver Figura 7.13).

Componente	Descripción	
Overliner	T.M. 3/4", 95% D.M.C.S	60cm
Liner	Geotextil: Prolipropileno no tejido Geomembrana: HDPE 1,5 mm	
Base	T.M. 3/4" 95% D.M.C.S Infiltración < 10 ⁻⁵ cm/seg	>40cm

Figura 7.13. Sistema de impermeabilización de fondo.

Respecto a las láminas de este material, se debe prestar especial cuidado. Se recomienda el transporte de los rollos embalados y que conserven el recubrimiento que los protege de los rayos UV hasta su instalación. Al momento de ser colocadas, deben ser cubiertas con la capa superior en el menor periodo posible (menor a 20 días) y así evitar el deterioro por radiación solar.

Durante la colocación de las láminas se sugiere hacerlo en un orden que impida que se unan tres láminas en un punto (ver Figura 7.14). Se debe considerar en la instalación la dilatación y contracción de la lámina por cambios de temperatura, además de protegerlas contra el viento (se pueden utilizar sacos con arena para la fijación momentánea). Por ningún motivo se debe transitar sobre la lámina con equipo o maquinaria con oruga o cadena, ya que podría dañar la lámina.

Las soldaduras deben ser realizadas por personal técnico especializado y con experiencia. Se debe contar además con el equipo adecuado tanto para realizar las soldaduras, como para verificar su sellado.

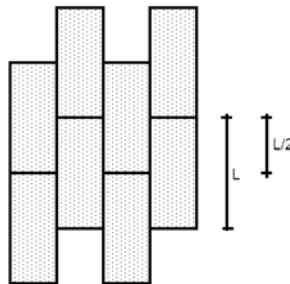


Figura 7.14. Recomendación para instalación de láminas HDPE sobre la base (Szantó, 2007).

7.4.3 Manejo de escorrentías superficiales

Las obras de drenaje tienen la finalidad de captar, conducir y evacuar escurrimientos superficiales que puedan generar precipitaciones eventuales, mitigando el ingreso de agua desde el exterior (laderas de cerros) a los sectores de disposición de residuos o calles secundarias de distribución y de esta forma evitar la erosión o formación de charcos sobre las terrazas.

Para esto se sugiere el diseño de un canal abierto excavado en tierra, no revestido, para un gasto máximo de 175 lt/seg, con una profundidad no menor a 0,5 m y una pendiente suave que evite la sedimentación y erosión en las vías de drenaje. Su derivación final deberá desembocar en un sector aguas debajo del vertedero.

7.5 Estudio de cantidad de biogás generado, sistema de monitoreo y control

Para determinar la generación de biogás que el vertedero controlado producirá durante su vida útil, se ocupó el modelo propuesto por Environmental Protection Agency (EPA) con el software LandGEM (Landfill gas emissions model).

Esta modelación considera las proyecciones a 30 años de las cantidades de residuos sólidos generados anualmente que se dispondrán dentro del vertedero controlado (Tabla 6-5).

Se utilizaron parámetros definidos por EPA para vertederos en zonas áridas, donde la constante de la tasa de generación de metano, $k = 0,02$ año⁻¹ y la capacidad de potencial para generar metano, $Lo = 100$ m³/ton.

Si se realiza una comparación de la definición de una zona árida (que establece precipitaciones menores a 250 mm) y la precipitación anual de Antofagasta de 3,3 mm de agua caída, se puede realizar un ajuste al modelo en la tasa de generación de metano, resultando un $K = 0,01$ año⁻¹ (Norton, 2007).

Es importante señalar que este modelo predictivo de generación de dióxido de carbono y metano está basado en los estudios de vertederos sanitarios donde los residuos son dispuestos mezclados y sin ningún tipo de clasificación.

Por lo cual, los valores señalados en Figura 7.15 son el caso más desfavorable y extremo de gases que pueden ser generados en vertederos controlados de alta densidad.

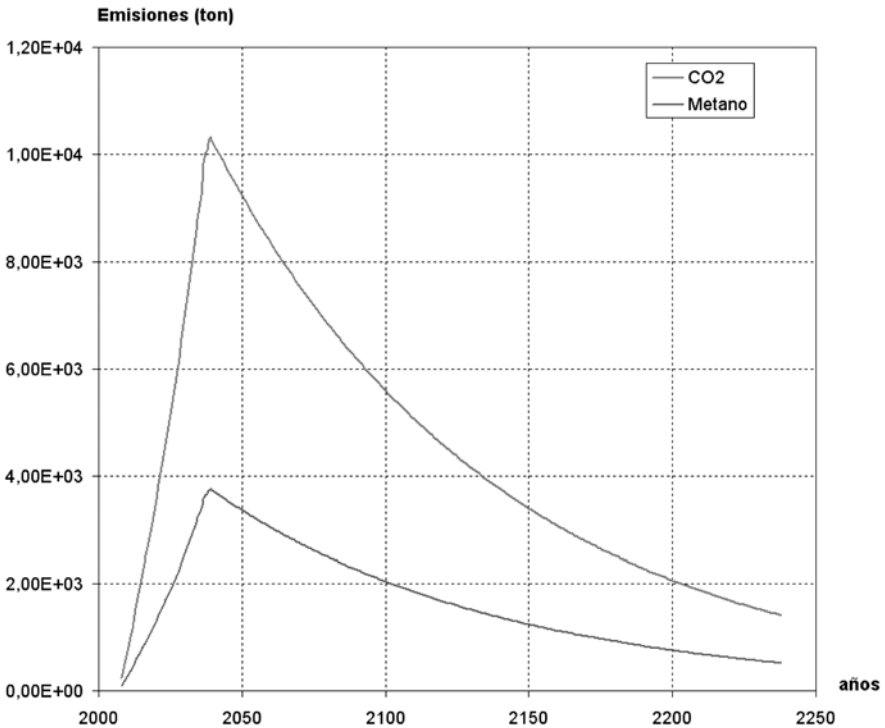


Figura 7.15. Generación en el tiempo de CO₂ y Metano.

De acuerdo al artículo 20 del Proyecto de Reglamento de Rellenos Sanitarios (2003), que especifica a los vertederos sanitarios que tengan una altura total mayor a 6 m, deberán incorporar sistemas de recolección y control de biogás.

Debido a la compacidad y al bajo contenido de humedad del sistema de balas de alta densidad, se sugiere implementar el sistema pasivo de drenaje de biogás a través de chimeneas, dispuestas en un radio de influencia de 30 a 50 m. Este sistema aprovecha la capacidad de migración horizontal que tiene el biogás para viajar a través de los residuos y por diferencia de presión ser evacuado por la chimenea fuera de la pila de balas.

Las chimeneas deben ser construidas desde el inicio del vertedero y de tal manera que permitan una muy alta permeabilidad para la migración del biogás, dando como resultado una baja cantidad de gas concentrado en el cuerpo de residuos que no es evacuado. Las chimeneas de drenaje pueden construirse de dos maneras:

Tubos de hormigón perforados de 900 mm de diámetro (junta enchufe campana)
(ver Figura 7.16).

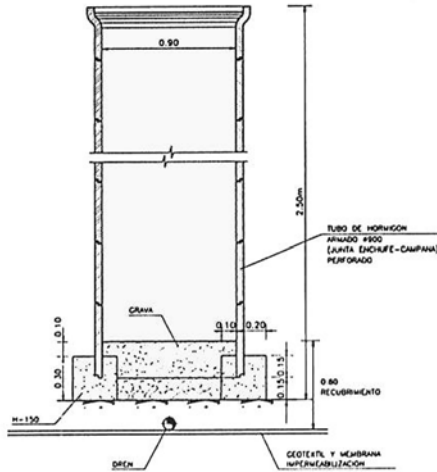


Figura 7.16. Chimenea con tubo de hormigón perforado para drenaje pasivo de biogás (Szantó, 2007).

Tambores perforados de 200 litros (ver Figura 7.17). La superficie total de orificios debe ser mayor al 10 % de la superficie del tambor y diámetro de los orificios > 5 cm. Se recomienda el llenado con piedra bola o grava. Es importante que no contenga cal o material soluble que pueda descomponerse en la atmósfera agresiva del biogás generado.

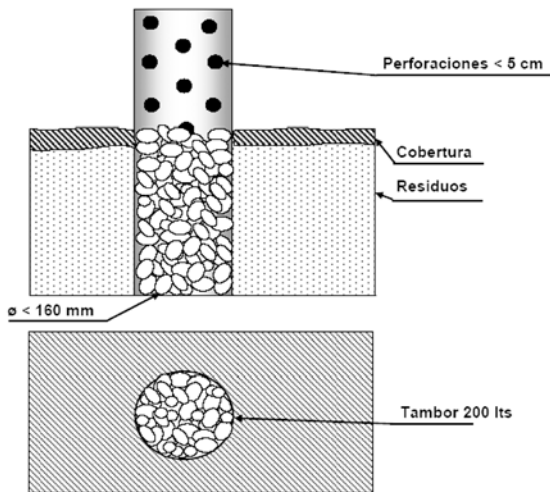


Figura 7.17. Chimenea con tambor para drenaje pasivo de biogás (Szantó, 2007).

7.6 Plan de cierre y abandono

La clausura del vertedero controlado se lleva a cabo cuando se han alcanzado los contornos finales proyectados o capacidad disponible del terreno para disponer balas de alta densidad. Para este efecto, se debe desarrollar previamente un plan de cierre del vertedero controlado, para poder garantizar el funcionamiento de los controles ambientales durante la clausura y posclausura.

En el plan de clausura deben desarrollarse los siguientes pasos:

Diseño de cobertura final

El propósito de cubrir las pilas finales de residuos depositados, es aislarlos completamente, para minimizar o evitar la infiltración de líquidos a través de los residuos depositados, así como orientar la salida del biogás por chimeneas colocadas en el vertedero. La cobertura final es el elemento central en la recuperación del entorno y tiene como finalidad impedir, con un mínimo de mantenimiento, el ingreso de aguas pluviales a la masa de residuos, suprimir la proliferación de vectores ambientales, limitar el potencial de incendios, evitar la erosión, evitar la migración de biogás y lixiviado fuera de ésta mientras finaliza el proceso de estabilización de los residuos. En la Figura 7.18 se muestra un esquema de una cobertura final tipo.

Componente	Descripción
Capa superficial	Cobertura de suelo, disponible localmente o de empréstito
Capa protectora	
Capa de drenaje	Arena, grava o geotextil para separación
Capa de barrera	Geomembrana (HDPE o PVC)
Capa subbase	Suelo nativo compactado

Figura 7.18. Componentes típicos que constituyen una cobertura final o sellado de vertedero.

Un sellado moderno de vertedero, se conforma de una serie de capas, cada una de las cuales tiene una función especial. La capa subbase de suelo se utiliza para contornear la superficie del vertedero, la capa barrera se utiliza para restringir la entrada de líquidos en el vertedero y la salida de gases del vertedero a través de la cubrición. Se utiliza la capa de drenaje para transportar las aguas lluvias que se filtran a través del material de cubrición fuera de la capa protectora para proteger las capas de drenaje y barrera. La capa superficial se une para contornear la superficie del vertedero y para servir como soporte de la vegetación que se utilizarán en el diseño de clausura a largo plazo.

Estabilidad de taludes

Se debe garantizar la estabilidad física de los taludes buscando evitar deslizamientos de la masa de residuos mediante la utilización de un ángulo de reposo adecuado.

Estabilización geotécnica

Serán todas las obras de ingeniería necesarias para mantener estable la masa de residuos entre las que se consideran los muros o diques de contención con el fin de evitar deslizamientos. Se debe realizar un análisis de estabilidad de taludes de toda la geometría de sellado del vertedero.

Diseño del sistema para el control de escurrimientos pluviales

El objetivo fundamental de los interceptores pluviales es captar y desviar los escurrimientos de agua, impidiendo que lleguen al sitio, por lo que deben ser ubicados en su perímetro y donde se requieran. Estos sistemas se proyectarán para captar una cantidad de agua determinada por el escurrimiento probable del agua de lluvia. Las fórmulas para el cálculo del gasto, requieren del conocimiento de la precipitación pluvial, del área a drenar, de su topografía y del ciclo hidrológico en dicha área. Estas obras de drenaje, se recomienda diseñarlas con capacidad para manejar caudales iguales o mayores al de una tormenta con periodo de retorno de 50 años.

Se deberá elaborar un cálculo para determinar los gastos, pendientes hidráulicas, velocidades máximas y mínimas, así como la dimensión de los ductos.

Diseño del sistema para el control del biogás

Una vez finalizada la operación del vertedero, se deberán tomar las medidas necesarias para asegurar la correcta evacuación a través de chimeneas del biogás generado.

7.6.1 Mantenimiento posclausura

Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de posclausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un periodo de al menos 20 años. Este periodo puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente. El programa debe incluir el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento), mantenimiento de las áreas verdes, etc.

De igual forma de debe dar inicio a las actividades de monitoreo de los parámetros establecidos en el plan de cierre durante igual número de años.

Una vez terminada la cobertura final, según corresponda, se deberá iniciar de acuerdo a los plazos establecidos en el plan de cierre, las obras necesarias para la habilitación del uso al que será destinado el sector del vertedero.

7.6.2 Uso final

El proyecto final para la reinserción del vertedero al entorno, una vez estabilizado y acondicionado, debe contemplar las restricciones de uso del suelo para el cual fue autorizado. Comúnmente los proyectos contemplan la construcción de parques, jardines, áreas deportivas, viveros y otro tipo de proyectos, en los que se considera la baja capacidad de soporte del suelo. Se recomienda contemplar desde el inicio de la operación del vertedero, la instalación y mantenimiento de los árboles que se deseen colocar, que permitirá aislar a mediano plazo la operación del vertedero del entorno inmediato, así como contribuir a la minimización de la migración de olores a comunidades cercanas y mejorar el impacto visual al entorno. Se debe estudiar qué tipo de árboles son los recomendables para la zona y que sean resistentes al ambiente de operación. Para el aprovechamiento de los vertederos clausurados con el fin de habilitarlos como áreas verdes, parques, jardines y en general como un sitio deportivo recreacional, será necesario que el sitio se encuentre estabilizado y que además se cuente con un estudio de riesgo crónico-toxicológico, que garantice la compatibilidad entre el sitio y el uso pretendido, sin riesgo de afectación a la salud pública.

7.7 Costos involucrados

A continuación se detallan los costos aproximados de la habilitación de la planta de segregación y embalado de residuos sólidos descartados y los costos de la construcción del vertedero controlado.

Cantidad	Un	Descripción	Valor Un	Total
1	C/U	Prensa H-240/5000 - Alimentador metálico - Transporte y seguro - Montaje, puesta en marcha y pruebas	US\$ 985.460	US\$ 985.460
Subtotal			US\$ 985.460	

Tabla 7-8. Costo planta (prensas y equipos).

Cantidad	Un	Descripción	Valor Un	Total
505.160	kwh	Consumo eléctrico prensa (173 kwh*2920 hra / año)	US\$ 0,12	US\$ 59.083
27.010	kwh	Consumo eléctrico alimentador prensa (9,25 kwh*2920 hra / año)	US\$ 0,12	US\$ 3.159
210.444	kg	Alambre recocido 4 mm. (1,5 kg / ton de residuos)	US\$ 1,17	US\$ 246.219
1	C/U	Mantenimiento anual (periodo 5 años)	US\$ 28.156	US\$ 28.156
Subtotal			US\$ 336.617	
Costo unitario			US\$ 2,40	

Tabla 7-9. Costos de operación anual (media 175.370 ton/año).

El costo unitario de US\$ 2,40 por tonelada de producción, se estima bajo el supuesto de una segregación de 20% de reciclaje y producción media anual proyectada de 140.296 ton de residuos de rechazo embalados (sólo considera el costo neto, sin los costos de transporte de balas ni disposición en el vertedero). Si se realiza del mismo modo un análisis de costos aproximados del actual vertedero que ascienden US\$1.404.000 anuales, se obtiene un costo neto de US\$8 por tonelada de residuos dispuestos mezclados en un vertedero convencional, sin ningún sistema de reciclaje.

Cantidad	Un	Descripción	Valor Un	Total
138.652	m3	Volumen de corte	US\$ 6,8	US\$ 945.969
118.557	m3	Volumen de relleno	US\$ 2,9	US\$ 346.658
66.827	m3	Volumen de cobertura	US\$ 2,9	US\$ 195.401
91.095	m2	Geomembrana de HDPE de 1,5 mm	US\$ 2,6	US\$ 234.615
91095	m2	Geotextil de prolipropileno no tejido	US\$ 0,7	US\$ 63.493
Subtotal			US\$ 1.786.136	

Tabla 7-10. Costos asociados etapa 1.

Cantidad	Un	Descripción	Valor Un	Total
118.892	m3	Volumen de corte	US\$ 6,8	US\$ 811.154
98.063	m3	Volumen de relleno	US\$ 2,9	US\$ 286.734
77.638	m3	Volumen de cobertura	US\$ 2,9	US\$ 227.012
91.526	m2	Geomembrana de HDPE de 1,5 mm	US\$ 2,6	US\$ 235.725
91526	m2	Geotextil de prolipropileno no tejido	US\$ 0,7	US\$ 63.794
Subtotal			US\$ 1.624.418	

Tabla 7-11. Costos asociados etapa 2.

Cantidad	Un	Descripción	Valor Un	Total
1	C/U	Etapla 1	US\$ 1.786.136	US\$ 1.786.136
1	C/U	Etapla 2	US\$ 1.624.418	US\$ 1.624.418
1	C/U	Planta de segregación y embalado	US\$ 985.460	US\$ 985.460
Subtotal			US\$ 4.396.014	
19% IVA			US\$ 835.243	
Total			US\$ 5.231.257	
US\$ observado			\$ 513	
Total \$			\$ 2.683.634.742	

Tabla 7-12. Costos totales.



8. Conclusiones

De acuerdo a la investigación desarrollada en esta memoria, respecto a los residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados en la ciudad de Antofagasta, se puede concluir que:

Se realizó un análisis a la estadística disponible del periodo 1997 – 2006, determinándose una tasa de generación per cápita de 1,05 kg/hab-día. Este valor presenta gran similitud con la tasa de generación per cápita de la Región Metropolitana de 1,10 kg/hab-día (Szantó, 2006).

Se observa un crecimiento de 9,7% en la generación de residuos sólidos domiciliarios y asimilables del año 2006 respecto al año 2005. Los factores de este incremento pueden ser variados, pero tiene directa relación con el aumento en la actividad económica (principalmente minería, con la consecuente generación de nuevas plazas de trabajo), nuevos proyectos mineros e instalación de empresas de servicios relacionados con el rubro minero e industrial, aumento en la población estable de la ciudad y población flotante (trabajadores de otras ciudades), así como la apertura de nuevos centros comerciales (Mall Plaza Antofagasta, supermercados, etc.).

La caracterización de residuos sólidos domiciliarios disponible de la ciudad de Antofagasta, indica un bajo porcentaje de materia orgánica (32,97%), en comparación con la Región Metropolitana (45,79%). Los residuos de papel y cartones (20,18%) y los residuos plásticos (12%), son levemente superiores a los de Santiago (17,12% y 9,72% respectivamente). Se explica esta situación, por consumo mayoritario de alimentos envasados y bajo consumo de frutas y verduras, todo esto ligado a factores económicos (como el poder adquisitivo), factores climáticos (zonas hiperáridas), factores geográficos (lejanía de centros de abastecimiento y productores de frutas y verduras).

Debido a los problemas de gestión y disposición final que posee en la actualidad la ciudad de Antofagasta, es de suma urgencia que la administración municipal realice estudios acabados de caracterización de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, ya que los antecedentes disponibles no consideran los cambios de hábitos de consumo que han presentado los habitantes de Antofagasta en los últimos 12 años de evolución. Su determinación dará las directrices para la aplicación de un sistema de gestión integral de residuos sólidos adecuado dentro de la ciudad.

En relación a las características del sector de Alto Portezuelo:

La ubicación del terreno se encuentra próxima a 12 km de la ciudad, medidos por la ruta 26 (quebrada Caracoles). Cuenta con un acceso alternativo de tierra, que serpentea por las piscinas decantadoras desde la ruta 26 internándose 7,5 km al Este. Se sugiere utilizar esta última alternativa, como acceso al sector de Alto Portezuelo, ya que evitaría el tráfico por la ruta 26 de camiones que transportan residuos. Para esto se debe acondicionar el camino de tierra, de modo que pueda tener tráfico en ambas direcciones. Este acceso ayudaría a bajar los costos de combustible para el transporte de residuos, al recorrer una menor distancia y lograr subir al sector con

pendientes relativamente suaves.

El plano regulador comunal vigente designa al sector como zona de desarrollo urbano modificado (ZUDC 09), que abarca áreas de quebrada Caracoles (Salar del Carmen) y sector La Negra. Esta clasificación la define como una zona de desarrollo condicionado con reserva para uso industrial y actividades productivas peligrosas.

Según el plano de pertenencias mineras de SERNAGEOMIN, señala hasta al mes de junio del año 2007, que en el sector de Alto Portezuelo no se presenta ninguna pertenencia minera vigente.

La hoya hidrográfica está compuesta por cursos efímeros completos que sólo se desarrollan durante o inmediatamente después de los periodos de precipitación, tributando sus escurrimientos superficiales a un cauce principal en dirección Noreste (Depresión del Salar del Carmen). Esta planicie se encuentra deshabitada, por lo tanto, carece de peligrosidad en caso de flujos aluvionales.

A pesar que se identificó el Sistema de Fallas de Atacama que se encuentra cercano al sector de Alto Portezuelo, es necesario realizar estudios acabados de geología en el área específica del vertedero sanitario y de esta forma, descartar la actividad de posibles segmentos de Falla Sierra del Ancla que puedan afectar la estabilidad de taludes y al conjunto de pilas de residuos dispuestos.

Se identifica un subsuelo de tipo homogéneo y con una distribución bien graduada de sus partículas, con una clasificación de arenas limosas (SM). Presenta bajos niveles de sales solubles, por lo que es probable que las sales que se aprecian sean poco o no solubles al agua. Respecto a la capacidad de soporte admisible del suelo, este puede soportar hasta 26 ton/m², por lo tanto, la altura del vertedero sanitario no debiera superar los 25 m.

En relación al prediseño o de ingeniería básica aplicada al vertedero:

Para la determinación del método de disposición final de los residuos sólidos generados en la ciudad de Antofagasta, se buscó utilizar un sistema innovador y acorde a las nuevas tendencias de cuidado medio ambiental, donde se lograra minimizar el volumen de disposición final y a su vez, presentara una alternativa a la disposición de residuos que se realiza en los vertederos sanitarios convencionales, donde estos residuos son dispuestos mezclados y no existe una segregación previa de residuos para su posterior reciclaje.

Las proyecciones de los volúmenes de residuos sólidos domiciliarios y asimilables, bajo la compactación de alta densidad con un 20% de reciclaje de fracción orgánica e inorgánica, demuestran que el método propuesto otorga la mayor vida útil para el sector de Alto Portezuelo, con un horizonte de proyecto de 28 años.

Para la determinación del porcentaje de reciclaje, se utilizó el mismo valor planteado

por la estrategia de reciclaje de residuos sólidos de la Región Metropolitana, donde especifica un reciclaje no menor a 20%. Este valor es conservador, si se toma en cuenta los estándares de reciclaje en países europeos que bordean el 80% de sus residuos, por lo que se podría obtener una mayor vida útil del vertedero, si se pone énfasis en la aplicación de programas integrales de minimización y reciclaje.

De acuerdo a la geomorfología de Alto Portezuelo, se descartó el movimiento de tierra para eliminar la colina que se encuentra en la zona central de la cuenca, debido a que no es rentable. Se optó por ocupar el sector poniente como área adicional para el desarrollo de la segunda etapa del proyecto.

El diseño de terrazas se desarrolló para lograr una infraestructura de apoyo estable donde disponer las balas de alta densidad. Su construcción se basa en cortes compensados que siguen la línea del terreno, distribuyendo el material extraído en la misma plataforma de apoyo o de relleno para otras y de esta forma aminorar los costos por volúmenes de corte.

A través del método de balance de agua de Thorntwaite, se determinó que la infiltración se anula debido a la alta tasa de evapotranspiración en la zona árida, que disipa el agua que logra captar el suelo, por lo que la entrada de agua a los residuos confinados en pilas de alta densidad es poco probable, de acuerdo a los estudios desarrollados en España por Universidades de Cantabria y Politécnica de Cataluña. Además, si se considera que la planta de tratamiento de residuos sólidos retira una parte de la fracción orgánica y los residuos descartados se disponen en balas de alta densidad, el porcentaje de humedad será bastante bajo, tendiendo a ser nulo, según la experiencia de plantas de tratamiento de la empresa IMABE.

De acuerdo a los antecedentes que existen de vertederos en zonas áridas (vertedero sanitario de Calama), la generación de líquidos percolados tiende a ser nula.

Por lo tanto, se sugiere innecesario implementar algún sistema de recolección de líquidos percolados o de un sistema de monitoreo y control. Sólo se utilizará un sistema de impermeabilización de fondo para proteger la base del vertedero.

Respecto al manejo de escorrentías superficiales, se obtuvo un caudal máximo de 175 lt/seg, producto de precipitaciones con un periodo de retorno de 50 años. Este caudal es relativamente bajo en comparación con otras cuencas. Se sugiere la construcción de un canal abierto de tierra (no revestido) en el perímetro del vertedero, con dimensiones de acuerdo al gasto mencionado para captar las escorrentías superficiales que pudiesen escurrir por las laderas de cerro y así evitar el ingreso de agua al sector de operaciones del vertedero.

Los valores obtenidos en el estudio de generación de biogás realizado por el software LandGEM, está basado en estudios de vertederos sanitarios donde los residuos son dispuestos mezclados y sin ningún tipo de clasificación o reciclaje. Por lo tanto, los valores mostrados son el caso más desfavorable y extremo de gases que pueden ser

generados en vertederos controlados de alta densidad. De acuerdo a la normativa, se sugiere la colocación de chimeneas de tipo pasivo para la migración de biogás.

Respecto a los costos asociados al proyecto, se demuestra en forma aproximada, que el método de disposición de alta densidad, ocupa menos recursos (US\$2,4) por tonelada embalada, que el sistema de vertido convencional (US\$8) por tonelada, utilizado actualmente en Antofagasta.

Por lo tanto, tras el análisis detallado de cada uno de los parámetros técnicos que pueden afectar la construcción, operación y cierre del vertedero controlado de alta densidad, se concluye que es factible su implementación en el sector de Alto Portezuelo. Su eficiencia dependerá del sistema de gestión óptimo que se implemente en la ciudad y coordine tanto la operación en la planta de tratamientos de residuos sólidos como la disposición en el vertedero controlado de alta densidad.

9. Referencias bibliográficas

ARROYO GUTIÉRREZ, PEDRO (2004). Gestión de riesgos en un vertedero sanitario comunal, Tesis Construcción Civil.

BOWLES, JOSEPH E. (1982). Propiedades geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill.

CUSTODIO, EMILIO; LLAMAS MANUEL RAMÓN (2001). Hidrología Subterránea. Tomo 1 y 2. Segunda edición. Editorial Omega.

CAMPOS, JAIME; KAUSEL, EDGARD (1995). Estudio del terremoto de Antofagasta del 30 de julio de 1995. Departamento de Geofísica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

CEMPRE URUGUAY (1998). Manual de gestión integral de residuos sólidos urbanos. Compromiso empresarial por el reciclaje.

CONAMA (2001). Estructura de un plan de gestión de residuos sólidos domiciliarios.

CONAMA (2003). Proyecto: "Reglamento de vertederos sanitarios".

CONCHA GÓNGORA, JOSÉ (2003). Beneficios y costos de políticas públicas ambientales en la gestión de residuos sólidos: Chile y países seleccionados, División de desarrollo sostenible y asentamientos humanos, Serie 71, medio ambiente y desarrollo, CEPAL, Naciones Unidas.

DE LA FUENTE, MIGUEL (1995). Estudio de la producción de biogás en una Unidad Experimental de un Vertedero Sanitario, Tesis Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

ESPINACE A., RAÚL; PALMA G., JUAN. y SZANTÓ N., MARCEL (1997). Asentamientos en un vertedero controlado a escala con recirculación de líquidos lixiviados. Académicos E. de Ingeniería en Construcción, U. Católica de Valparaíso. IV Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, octubre, Valparaíso, Chile.

ESPINACE A., RAÚL; OLAETA C., JOSÉ A.; SZANTÓ N., MARCEL y PALMA G., JUAN (1999). Experiencias de reinserción de vertederos mediante la implantación de una cubierta vegetal. Caso chileno. Académicos Escuela de Ingeniería en Construcción, U. Católica de Valparaíso. Residuos, Revista Técnica, año IX, N° 47, marzo-abril, pp. 68-77, publicación con comité editorial, Bilbao, España.

ESPINACE A., RAÚL.; PALMA G., JUAN; SZANTO N. MARCEL; OLAETA C., JOSÉ A. (1997). Recuperación de áreas utilizadas como vertederos controlados de R.S.U. Experiencias y proposiciones. Académicos Escuela de Ingeniería en Construcción, U. Católica de Valparaíso. XII Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, octubre, Copiapó, Chile.

Estudio de caracterización y proyección de los residuos sólidos domiciliarios (1995). Universidad de Chile.

GONZALEZ DE VALLEJO, LUIS (2002). Ingeniería Geológica. 1ra Edición, Editorial Pearson.

GONZALEZ L., GABRIEL; NIEMEYER R., HANS (2005). Cartas Antofagasta y Punta Tetas, Región de Antofagasta. Carta geológica de Chile, N° 89, escala 1:100.000.

IZQUIERDO, JOSÉ LUIS. (2006). Manejo de residuos hospitalarios. Programa de medioambiente de las Naciones Unidas para el convenio de Estocolmo.

MASSANES, MARÍAL. (1996) El biogás proveniente de la basura y su aprovechamiento energético. Tesis Ingeniería Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile.

MINISTERIO DE SALUD, Resolución N° 02444/80, Normas mínimas de operación de basurales ubicados en el gran Santiago y el D.S. N°594, Reglamento de condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.

MONSALVE SÁENZ, GERMÁN (1999). Hidrología en la ingeniería, 2da edición. Editorial Alfaomega.

NORTON, ESTHER; MUNIZAGA, JUAN (2007). Prefactibilidad técnica vertedero sanitario de Mejillones. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte, Chile.

SALGADO ARAVENA, JORGE et. al (1985). Curso de laboratorista vial, Geotecnia, Volumen 1. Laboratorio Nacional de Vialidad.

SESMA (2007). Información general relativa a los residuos domiciliarios. Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente, Región Metropolitana, Chile.

SZANTÓ NAREA, MARCEL (2006). Estudio de caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la R. Metropolitana. Pontificia Univ. Católica de Valparaíso, Chile.

TESAM – ROCHE CONSULTORES (1995). Estudio y plan de manejo de residuos sólidos en la ciudad de Antofagasta.

TCHOBANOGLOUS, GEORGE (1998). Gestión integral de residuos sólidos, volúmenes I y II.

VARGAS, GABRIEL et. al (2000). Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. Revista Geológica de Chile Vol. 27 N°2, pág. 157-176.

VASCONI, PAOLA. (2004). Residuos sólidos domiciliarios en Chile: análisis y propuestas. Fundación TERRAM.

VERGARA, ANA LUISA (2002). Prefactibilidad técnica y económica de un sistema de purificación y utilización del biogás generado en el vertedero sanitario Loma Los Colorados. Tesis Ingeniería Civil de Industrias, Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile.

ANEXO A DATOS METEOROLÓGICOS ESTACIÓN UCN Y ESTACIÓN PORTEZUELO

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	21,2	20,1	19,1	17,4	16,3	14,7	14	14,6	15,7	15,9	17,6	19,5	17,2
1991	20,7	20,6	19,6	17,6	17,1	15,6	15,3	14,5	16,3	16,7	18	19,5	17,6
1992	20,7	20,9	21,7	19,5	18,2	15,7	14,4	14,4	15	16,9	18,6	19,5	18
1993	21,6	20,9	20,3	19,1	16,6	14,8	14,1	14,9	15,2	16,4	17,7	19,1	17,6
1994	20,4	20,3	20,1	18	16,2	14,8	14	14,7	15,9	17,1	18,2	19,8	17,5
1995	21	20,4	19,8	18	16,9	15,7	14	13,8	15,1	16,1	17,7	18,9	17,3
1996	20,6	20,4	19,7	17,9	16,1	13,8	13,8	14,5	15,2	16,4	18,1	19,6	17,2
1997	21,4	21,2	21,2	18,8	19,3	17,8	16,9	17,4	17,3	17,8	19,1	22,2	19,2
1998	23,8	22,9	21,5	19,3	16,7	15,8	15	14,2	14,8	16,3	17,9	19,4	18,1
1999	20,2	21,5	19,9	17,6	16,4	14,9	13,7	14,7	15,2	16,4	17,9	19,4	17,3
2000	21,2	20,3	19,3	18,1	16,1	14,8	13,9	14,5	15,3	15,9	17,4	20	17,2
2001	20,9	21,6	20,1	18,1	15,6	14,2	14	14,6	14,8	16,6	17,4	19,5	17,3
2002	21,2	21,3	20,8	18,2	17,5	14,6	14,4	14,5	15,4	16,8	17,8	19,5	17,7
2003	20,7	21,6	19,7	17,7	16,6	15,3	14,2	14,4	15,1	17,2	18,8	19,2	17,5
2004	20,7	20,7	20	18,3	15,6	14,6	14,5	14,7	16,1	16,6	17,9	19,9	17,5
2004	21,1	20	20	17,1	15,1	14,9	14	14,8	14,7	15,9	17,8	19,2	17,1
2005	21,3	21,6	19,4	17,2	16,2	14,4	15,6	14,6	15,7	16,9	17,9	19,6	17,5
PROM MENSUAL	21,1	21	20,1	18,1	16,6	15,1	14,5	14,7	15,5	16,6	18	19,6	17,6

Tabla A-1. TEMPERATURA MEDIA (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	24,6	23,9	22,4	21,6	19,5	17,9	17,2	17,6	18,8	18,9	20,5	22,7	20,5
1991	24,1	24,2	22,9	21,1	20,3	18,7	18,4	17,3	18,8	19,7	20,8	22,5	20,7
1992	23,9	24,3	25,2	22,7	21,1	18,7	17,4	17,4	18,3	19,7	21,5	22,8	21,1
1993	25	24,4	23,7	22,4	19,7	18	17,2	17,8	18,1	19,5	20,7	22,1	20,7
1994	23,5	23,6	23,6	20,9	19,4	18,2	17,3	17,5	18,8	20,1	21,4	23	20,6
1995	24,6	24	23,3	21,1	20	19,1	17,5	16,8	18	19,2	20,9	22,2	20,6
1996	23,9	23,9	23	21,2	19,3	16,9	17	17,6	18,2	19,5	21,1	22,9	20,4
1997	24,7	24,7	24,9	22,4	22,8	21,3	20,4	20,5	20,2	21	22,3	25,4	22,6
1998	26,9	26,2	24,9	22,6	19,9	19,2	18,2	17,6	17,9	19,2	21,1	22,4	21,3
1999	23,3	24,7	23,4	20,7	19,6	18,7	17	17,6	18,2	19,4	21,1	22,8	20,5
2000	24,7	23,7	23,1	21,6	19,5	18,3	17,1	17,4	18,1	18,8	20,4	23,3	20,5
2001	24,5	25,2	23,6	21,5	19	17,4	17,3	17,6	17,6	19,6	20,5	22,6	20,5
2002	24,6	24,8	24	21,6	20,6	17,7	17,1	17,5	18,2	19,5	20,7	22,6	20,7
2003	24	25,2	22,8	20,8	19,5	18,4	17,2	17,3	17,9	19,9	21,8	22,5	20,6
2004	23,9	24,2	23,4	21,6	19	18	17,5	17,8	18,8	19,4	20,6	23	20,6
2005	24,6	23,2	23,4	20	18,3	17,8	17,3	17,6	17,7	18,7	20,7	22,5	20,2
2006	24,7	25,1	22,7	20,1	19,1	17,3	18,5	17,3	18,3	19,6	20,8	22,8	20,5
PROM MENSUAL	24,4	24,4	23,5	21,4	19,8	18,3	17,6	17,7	18,3	19,5	21,8	22,8	20,7

Tabla A-2. TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	18,4	17,4	16,8	15,8	14,1	12,7	11,9	12,5	13,4	13,5	15,5	17,1	14,9
1991	18	17,9	17,2	15	14,8	13,3	13,3	12,5	14,5	14,6	16	17,1	15,4
1992	18,1	18,3	19,2	17	15,9	13,7	12,4	12,1	12,3	14,7	16,4	17	15,6
1993	19,3	18,2	17,7	16,9	14,7	12,8	11,9	13,2	13,3	14,3	15,5	16,9	15,4
1994	18	17,8	17,5	16,1	13,9	12,6	11,6	12,8	13,9	14,8	15,8	17,5	15,2
1995	18,3	17,9	17,4	15,7	14,7	13,2	11,6	11,6	13	13,8	15,3	16,2	14,9
1996	17,9	17,9	17,5	15,6	14	11,5	11,5	12,3	12,7	14,1	16,1	17	14,8
1997	19	18,8	18,7	16,3	16,9	15,3	14,4	15	15,3	15,3	16,6	19,8	16,8
1998	21,5	20,7	19,2	17,1	14,5	13,5	12,7	11,7	12,5	14,1	15,4	17,1	15,8
1999	17,6	19,4	17,5	15,2	13,9	12,1	11,9	12,6	12,9	14,3	15,4	16,9	15
2000	18,7	17,9	16,7	15,6	13,7	12,5	11,8	12,5	13,1	13,8	15,3	17,5	14,9
2001	18,4	19	17,6	15,6	12,9	11,7	11,3	12,3	12,4	14,2	14,8	17,2	14,8
2002	18,6	18,8	18,9	15,7	15,5	12,4	12,7	12,3	13,5	15,1	15,8	17	15,5
2003	18,2	19,2	17,5	15,5	14,6	13	11,9	12,3	13,1	15,3	16,5	16,8	15,3
2004	18,1	18,4	17,7	16	13,2	12,2	12,3	12,5	14,3	14,6	16	17,6	15,2
2005	18,7	17,6	17,6	15,3	13,1	12,9	11,8	13,1	12,5	14	15,9	17	15
2006	19,2	18,9	17,5	15,4	14,2	12,3	13,7	12,8	14	15,2	15,7	17,2	15,5
PROM MENSUAL	18,6	18,5	17,8	15,9	14,4	12,8	12,3	12,6	13,3	14,5	15,8	17,2	15,3

Tabla A-3. TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	73	73	76	72	75	77	77	78	75	74	72	74	74,7
1991	76	74	80	81	77	75	74	77	76	72	75	74	75,9
1992	74	70	70	76	76	77	73	73	71	73	73	70	73
1993	68	71	72	72	74	71	70	74	70	69	71	70	71
1994	71	71	70	75	74	72	72	72	72	69	69	70	71,4
1995	74	73	73	75	74	76	73	72	75	70	70	73	73,2
1996	70	72	73	72	74	74	76	74	73	71	72	69	72,5
1997	72	71	71	72	73	71	70	76	77	69	68	67	71,4
1998	73	73	72	74	76	74	75	71	73	74	71	72	73,2
1999	71	78	72	72	71	71	73	73	72	72	71	69	72,1
2000	73	75	75	74	74	73	73	72	72	71	68	68	72,3
2001	70	71	76	74	70	70	72	73	70	69	68	71	71,2
2002	67	70	74	69	73	70	75	73	71	71	69	67	70,8
2003	69	72	73	71	74	73	73	73	72	70	69	68	71,4
2004	70	72	72	72	72	73	76	74	73	72	70	69	72,1
2005	71	74	72	76	73	75	68	73	69	71	73	73	72,3
2006	72	73	73	74	74	73	73	74	73	73	71	72	72,9
PROM MENSUAL	71,4	72,5	73,2	73,6	73,8	73,2	73,1	73,6	72,6	71,2	70,6	70,4	72,4

Tabla A-4. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (%)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	6,4	4,9	4,4	4	2,7	2,4	2,5	3,1	3,9	4,7	5,5	7,8	4,4
1991	5,8	6	4,7	3,7	2,8	2,5	2,7	2,9	3,8	5	5,5	6,2	4,3
1992	5,9	6,1	5,2	4	2,8	2,4	2,4	3	4,1			5,7	4,2
1993	6,2	5,2	4,5	3,6	2,5	2,2	2,4	2	3,2	4,6	5	5,2	3,9
1994	5,3	4,8	4,3	3,3	2,6	2,4	2,4	2,5	3,3	4,5	5	5,2	3,8
1995	5,6	5,2	4,1	3,1	2,3	2,1	2,3	2,5	3,2	4,3	5,1	5,5	3,8
1996	5,7	5,3	4,2	3,5	2,6	2,4	2,1	2,6	3,5	4,4	4,9	5,7	3,9
1997	5,5	5,3	4,5	3,3	2,7	2,7	2,7	2,8	3,2	4,7	5,5	6,5	4,1
1998	5,8	5,5	4,7	3,3	2,4	2,4	2,2	3	3,4	4,1	5,3	5,6	4,0
1999	5,5	5	4,2	3,3	2,5	2,3	2,2	2,8	3,6	4,2	5	5,7	3,9
2000	5,4	4,9	4	3,1	2,3	2	2,3	2,4	3,5	4,1	4,9	5,5	3,7
2001	5,5	5,1	3,9	2,9	2,2	2,2	2,1	2,8	3,2	4,2	4,8	5,1	3,7
2002	5,6	5,2	3,9	3,1	2,1	1,8	1,7	2,3	3,2	3,8	4,8	5,5	3,6
2003	5,1	5,3	4	2,9	2,2	1,9	1,9	2,5	3,2	4,1	4,7	5,4	3,6
2004	5,1	5	3,9	3,3	2,3	1,8	1,9	2,3	3,2	4	4,6	5,1	3,5
2005	5,2	4,5	4	2,5	2	1,8	2	2,4	3,1	3,8	4,3	4,5	3,3
2006	4,9	5	3,7	2,9	2,6	2,1	2,4	2,4	3,4	3,9	4,6	5,2	3,6
PROM MENSUAL	5,6	5,2	4,2	3,3	2,4	2,2	2,2	2,6	3,4	4,3	5	5,6	3,8

Tabla A-5. EVAPORACIÓN (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1990	2,4	2,1	2,1	2,1	1,8	1,8	1,9	2	2,2	2,4	2,5	2,2	2,1
1991	2	2,3	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	2,1	2,5	2,4	2,3	2,0
1992	2	2,3	2,1	2								1,9	2,1
1993	2,1	1,8	1,7	1,7	1,9	1,9	2	2	2	2,3	2,4	2,3	2,0
1994	2,2	2,1	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	2	2,1	2,5	2,3	2,2	2,1
1995	1,9	2	1,9	1,8	1,6	1,7	1,9	2	2,1	2,3	2,5	2,2	2,0
1996	2,3	2,2	2,1	2	1,8	1,6	1,7	2	2,1	2,3	2,4	2,4	2,1
1997	1,9	2	1,8	1,7	1,7	2	2,1	2	2,1	2,5	2,6	2,8	2,1
1998	2,4	2,1											2,3
1999	2,3												2,3
2000	2	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,8	1,7	2,1	2,3	2,2	2,1	1,9
2001													
2002	2,2	1,9	1,8	1,9	1,7	1,8	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3	2,5	2,0
2003	2,1	2,1	1,8	1,9	1,7	1,6	1,8	1,8	2,1	2,1	2,2	2,3	2,0
2004	1,9	1,9	1,8	1,7	1,8	1,6	1,7	1,9	2	2,2	2,3	2,2	1,9
2005	2	1,8	1,9	1,7	1,6	1,7	1,8	1,8	2,1	2,2	2,2	2	1,9
2006	1,9	2	1,6	1,5	1,5	1,4				2,6	2,6	2,5	2,0
PROM MENSUAL	2,1	2	1,9	1,8	1,7	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4	2,3	2,0

Tabla A-6. VELOCIDAD DEL VIENTO (m/seg)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1969	0	0	0	0	0	0	2,5	6,4	0	0	0	0	8,9
1970	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0,3
1971	0	0	0	0	0	0	0	1,6	0	0	0	0	1,6
1972	0	0	0	0	0	1,5	0,2	1,8	0	0	0	0	3,5
1973	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0	0	0,9
1975	0	0	0	0	0	1,7	0	0	0	0	0	0	1,7
1976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1978	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0,3
1979	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3
1980	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	2	0	0	2,4
1981	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	1,2
1982	0	0	0	0	5,5	0	0	1	1,2	0	0	0	7,7
1983	0,8	0	0	0	0	0	2,8	0,5	0,3	0	0	0	4,4
1984	0	0	0,8	0	0	0,8	0	0	0	0	0,3	0	1,9
1985	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1
1986	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	0	0	23,3	0	0,3	0	0	0	23,6
1988	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1989	0	0	0	0	0	0	0	0,35	0	0	0	0	0,4
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	42
1992	0	0	0	0,8	3	2,6	0	0	0	0	0,4	0	6,8
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0,2
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0,1
1996	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0,4
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	0,1	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0,3
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	2,8	0,4	0	0	0	0	0	3,2
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0,8	1	0	0	0	0	1,8
2003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4
2006	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	11,0
PROM MENSUAL	0,03	0	0,02	0,03	0,22	1,36	0,79	0,68	0,07	0,05	0,03	0	3,3

Tabla A-7. PRECIPITACIONES MENSUALES (mm)

ESTACIÓN PORTEZUELO

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1949		21	18,6	17,2	15,6	13,4	12,8	12,6	13,3	15	16,7	19	16
1950	19,1	20	19	15,8	15,2	13,1	13,4	12,8	15	15,1	16,4	19	16,1
1951	19,6	19	17,6	16,7	11,7	14,6	15,3	15,1	15,2	16,1	17,4	18	16,3
1952	20,8	21	19	16,2	16,2	12,8	13,7	14,4	15,3	15,2	16,1	19	16,7
1953	20	20	19	16,2	15,7	14,8	13,5	14,2	15,6	14,9	16,7	19	16,6
1954	19,5	21	19	15,8	14	13	12,6	12,7	13,6	14,4	16,4	18	15,9
1955	20,9	20	18,1	16,2	14,4	12,8	11,9	12,4	13,4	14,7	18,3	18	15,9
1956	19,4	20	17,6	15,7	14,3	12,7	12,7	12,9	13,7	15	17,1	19	15,8
1957	20,2	21	19,9	17,6	16,9	15	14,5	14,3	14,5	15,8	17,7	20	17,3
1958	20,8	21	19,9	18,2	15,5	13,9	13,9	13,3	14,2	15,9	17,5	19	16,9
1959	19,5	21	19,4	17,4	15	13,9	13,8	13,6	15	15,2	16,8	19	16,6
1960	19,6	21	19,5	17,9	15,3	14	12,9	13,3	13,9	15,3	17,2	20	16,6
1961	20,7	21	19,1	17	15,3	13,4	12,7	14,5	13,9	15,3	16,6	19	16,5
1962	19,3	19	19	17,5	15,6	13,3	13,2	13,7	14	14,9	16,5	19	16,3
1963	19,7	21	19	17,5	15,5	14							17,7
PROM MENSUAL	19,9	20	18,9	16,9	15,1	13,6	13,4	13,6	14,3	15,2	17	19	16,5

Tabla A-8. TEMPERATURA MEDIA (°C)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM AÑO
1949		2,8	2,2	2,6	2,7	2,7	2,6	2,7	3,1	3,1	3,6	3,1	2,8
1950	2,7	3,1	3,1	3,1	3,1	3,6	3,1	2,7	3,6	3,1	4,0	3,6	3,2
1951	3,6	3,6	2,7	3,1	2,7	3,1	2,7	3,0	3,4	3,6	3,6	3,6	3,2
1952	3,1	3,1	3,1	2,6	2,9	2,6	2,5	3,1	3,7	3,6	4,0	3,4	3,2
1953	2,4	3,0	2,7	3,0	2,6	2,9	2,8	2,6	3,2	3,7	3,8	4,0	3,1
1954	3,5	3,0	2,9	3,1	3,0	2,9	3,1	3,6	3,7	4,0	3,8	3,6	3,3
1955	3,4	3,4	2,9	2,9	2,7	2,6	2,5	2,9	3,0	2,9	3,0	3,3	2,9
1956	3,7	3,6	3,4	3,3	2,7	2,7	3,1	3,1	3,6	3,6	4,0	3,6	3,4
1957	3,6	3,6	3,1	3,1	2,7	2,7	3,1	3,1	3,1	3,6	3,6	3,6	3,2
1958	3,6	3,6	3,6	2,7	2,7	2,2	2,2	3,1	3,6	3,6	3,6	3,6	3,2
1959	3,1	3,1	2,7	2,7	2,7	2,2	2,7	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	2,9
1960	3,1	3,1	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	3,6	3,6	3,6	3,0
1961	3,1	3,1	3,1	3,1	2,7	2,7	2,7	2,7	3,6	3,1	3,1	2,7	3,0
1962	2,7	2,7	2,7	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,7	3,1	3,1	3,1	2,6
1963	3,1	2,7	3,1	2,2	2,2	2,2							2,6
PROM MENSUAL	3,2	3,2	2,9	2,8	2,7	2,7	2,7	2,9	3,3	3,4	3,6	3,4	3,0

Tabla A-9. VELOCIDAD DEL VIENTO (m/seg)

Grado	Definición	Velocidad		
		nudos	km/hra	m/seg
0	calma	< 1	< 1	0 - 0,2
1	ventolina	1 - 3	1 - 5	0,3 - 1,5
2	brisa muy débil	4 - 6	6 - 11	1,6 - 3,3
3	brisa débil	7 - 10	12 - 19	3,4 - 5,4
4	brisa moderada	11 - 16	20 - 28	5,5 - 7,9
5	brisa fresca	17 - 21	29 - 38	8,0 - 10,7
6	brisa fuerte	22 - 27	39 - 49	10,8 - 13,8
7	viento fuerte	28 - 33	50 - 61	13,9 - 17,1
8	temporal	34 - 40	62 - 74	17,2 - 20,7
9	temporal fuerte	41 - 47	75 - 88	20,8 - 24,4
10	temporal muy fuerte	48 - 55	89 - 102	24,5 - 28,4
11	tempestad	56 - 63	103 - 117	28,5 - 32,6
12	huracán	> 64	> 117	> 32,7

Tabla A-10. ESCALA ANEMOMÉTRICA DE BEAUFORT

ANEXO B PROYECCIÓN POBLACIONAL COMUNA DE ANTOFAGASTA (2007 – 2037)

Realizado por:
Dusan Paredes A.
Profesor -Investigador
Instituto de Economía Aplicada Regional IDEAR
Facultad de Economía y Administración
Universidad Católica del Norte
Julio, 2007.

De acuerdo a las indicaciones recibidas por Juan Antonio Munizaga Plaza, memorista de Ingeniería Civil, se precisa plasmar la proyección de la población de la comuna de Antofagasta desde el año 2007 hasta el año 2037. Cabe destacar, que para cumplir el propósito descrito fue necesario recolectar información disponible al respecto, la que fue derivada del Instituto Nacional de Estadística (INE). Según dichos datos, se indica la cantidad total de habitantes, hombres y mujeres de la comuna de Antofagasta entre los años 1990 y 2006 (ver tabla N°1).

DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EXISTENTES

Año	Población		
	Total	Hombres	Mujeres
1990	225.775	112.863	112.912
1991	233.916	117.527	116.389
1992	241.997	122.164	119.833
1993	250.147	126.838	123.309
1994	258.246	131.484	126.762
1995	266.349	136.129	130.220
1996	273.796	140.365	133.431
1997	281.235	144.600	136.635
1998	288.663	148.833	139.830
1999	296.099	153.070	143.029
2000	303.538	157.312	146.226
2001	309.956	160.704	149.252
2002	316.389	164.116	152.273
2003	322.819	167.531	155.288
2004	329.223	170.944	158.279
2005	335.672	174.342	161.330
2006	341.942	177.640	164.302

Tabla N°1. Población total, hombre y mujeres para la comuna de Antofagasta.

Observar y analizar la dinámica de la población en un periodo determinado, nos permite eventualmente hacer proyecciones respecto a ésta. La manera más simple y certera de apreciar la evolución es a través del análisis gráfico. Para ello véase la Figura N°1.

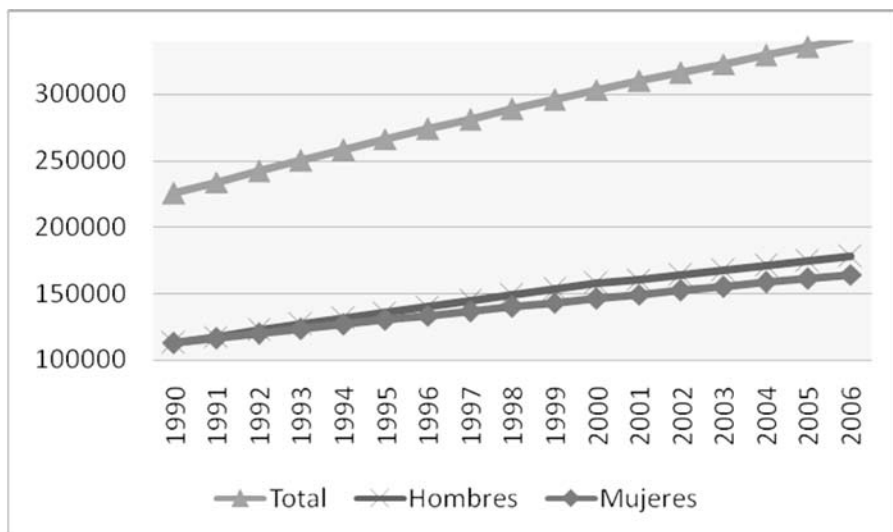


Figura N°1: Evolución de población total, hombre y mujeres para la comuna de Antofagasta.

Como se puede apreciar en el gráfico, la evolución ha sido creciente para hombres y mujeres, en todos los periodos. La cantidad total de población femenina, ha pasado de 112.912 en 1990, a 164.302 en el año 2006.

Dada la reserva e insuficiencia de datos no se permite comprobar la simetría de progresión existente en los datos. Concretamente resulta de vital interés verificar tanto la tasa de crecimiento respecto a un año base, como el crecimiento entre un año y otro. Para ello se muestra la Figura N°2.

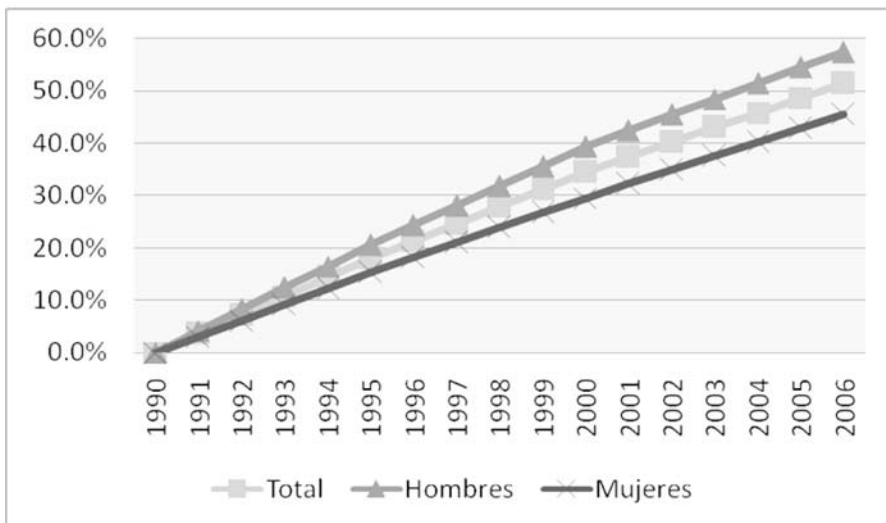


Figura N°2: Crecimiento de población respecto al año base (1990).

En la Figura N°2 se aprecia cuanto ha crecido la población desde 1990 hasta el 2006. En particular, la población de hombres ha crecido cerca del 57,4% en un período de 17 años. Respecto a las mujeres, su población ha crecido al rededor de un 45,5% en un mismo periodo. En resumen la población total ha crecido cerca del 51,5%. Dichos datos comienzan a dejar entrever el rango en que deberían estar determinadas las proyecciones para 30 años.

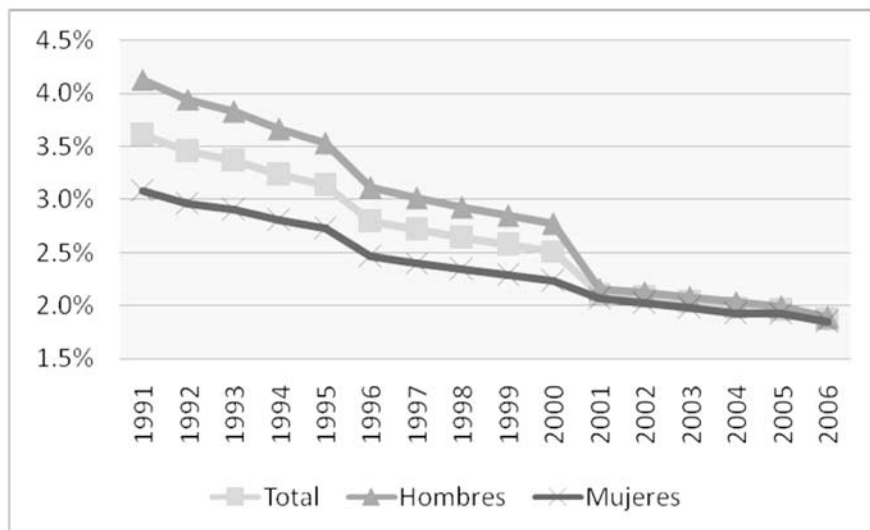


Figura N°3: Crecimiento de población respecto al año anterior.

En la Figura N°3 se explica un fenómeno similar, su diferencia reside en la tasa empleada, debido a que ésta es una tasa variable. A raíz de esto se observan las tasas variables como el crecimiento que ha experimentado la población desde un período a otro. En este análisis se logra apreciar un fenómeno interesante. La población si bien ha crecido cuantiosamente en relación al período base, su tasa de crecimiento año a año ha ido decreciendo considerablemente, especialmente para el caso de los hombres, variando desde aproximadamente un 4% al comienzo del período, a menos del 1,8% en el año 2006. Esto permite identificar un proceso creciente de la población de Antofagasta a un ritmo decreciente, llegando a cerca del 2,3% para toda la población.

Indicador	Año				
	2000	2005	2010	2015	2020
Porcentaje de Población Total	60	62	63,8	65,3	66,7
Crecimiento de la Población (*)	-	2	1,8	1,6	1,3
Tasa Global de Fecundidad (*)	-	2,2	2,1	2,1	2
Relación de Masculinidad	107,6	108,1	108,3	108,2	108
Relación de Dependencia	51	47	43	43	44
Índice de Renovación	21	23	27	31	37
Índice de Dependencia Familiar	12,4	14,6	17,9	19,4	23,4

Tabla N°2. Indicadores demográficos del área total.

El crecimiento de la Población, representa el ritmo de progresión anual medio de habitantes que residen en la comuna de Antofagasta por cada cien ciudadanos. En la tabla N°2 se logra apreciar que presenta una tendencia creciente a ritmo decreciente de menos 65% para el año 2020 respecto del 2005.

Indicador	Año				
	2000	2005	2010	2015	2020
Total	100	100	100	100	100
Menos de 15 años	27,9	26,1	23,8	22,9	22,3
15-64 años	66,3	67,9	69,8	69,9	69,4
65 años o más	5,8	6	6,4	7,2	8,3

Tabla N°3. Distribución total de la población.

La distribución de la población es el porcentaje que representa la población por grandes grupos de edad, respecto del total de la población de la comuna de Antofagasta. La tabla N°3 señala claramente que la mayor concentración de habitantes se presenta en el grupo etario de entre 15 y 64 años, alejándose ambos otros grupos por sobre el 76% respecto del sobresaliente. Con un nivel de envejecimiento promedio del 1,8% de la población total de la comuna de Antofagasta.

Indicador	Año				
	2000	2005	2010	2015	2020
Parvularia (0-4 años)	9,1	8,4	8,1	7,9	7,6
Básica (5-14 años)	18,8	17,8	15,7	15	14,7
Media (15-19 años)	8,7	8,8	9,2	7,9	7,3
Superior (20-24 años)	8,5	8,6	8,7	9,1	7,8

Tabla N°4. Distribución total de la población según Educación.

La Tabla N°4 refleja que la mayor cuantía de habitantes de la comuna de Antofagasta termina su enseñanza básica, aún cuando para el año 2020 los índices se hayan reducido en un 21,8% respecto del 2000. No obstante, también muestra como la enseñanza superior agarra vuelco hasta el año 2015, reduciéndose en un 14,3% en relación al mismo año.

Indicador	Año				
	2000	2005	2010	2015	2020
Niño (menos de 10 años)	19	16,8	15,9	15,5	15
Adolescente (10-19 años)	17,6	18,1	17,2	15,3	14,6
Adulto (20-64 años)	57,6	59,1	60,5	62,1	62
Adulto Mayor (65 o más)	5,8	6	6,4	7,2	8,3

Tabla N°5. Distribución total de población según Salud.

En la Tabla N°5 se infiere que los adultos de entre 20 y 64 años presentan una demanda potencial de salud del 7,6% entre los años 2000 y 2020, respecto de la población de todas las edades de la comuna de Antofagasta.

Indicador	Año				
	2000	2005	2010	2015	2020
Total	59,7	61,2	62,8	64,7	65,2
Hombres	31,6	32,6	33,5	34,4	34,7
Mujeres	28,1	28,6	29,3	30,3	30,5

Tabla N°6. Distribución de la población según participación electoral (20-69 años).

En ésta Tabla N°6 se logra apreciar que del total de inscritos en los registros electorales, los hombres lideran por sobre las mujeres en un 6,1%. El total de inscritos inspira una tendencia creciente del 9,2% entre el año 2000 y el 2020. Se espera crecimiento en la participación electoral por parte de ambos sexos.

INFERENCIA DEL MODELO ECONÓMTRICO

Con la información obtenida se procederá a generar diversos modelos econométricos considerando los siguientes detalles metodológicos y las limitaciones presentes.

DETALLES METODOLOGICOS

- Considerar la tasa de inmigración.
- Considerar la tasa de defunción.
- Considerar la tasa de natalidad.
- Especificar el efecto de variables económicas, tales como PIR per cápita, Nivel de Inversión Efectiva.

MODELO FINAL

Para comenzar, el primer paso corresponde a verificar el grado correcto (o de mayor ajuste) para realizar el modelo. Es por ello que se entrega la Tabla N°2 y la Figura N°4 .

Coefficients					
	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
Case Sequence	7345.468	90.053	.999	81.568	.000
(Constant)	220927.28	870.770		253.715	.000

Coefficients					
	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
ln(Case Sequence)	42150.058	3696.556	.950	11.403	.000
(Constant)	202562.46	7628.445		26.554	.000

Coefficients					
	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
1 / Case Sequence	-110688.4	25182.654	-.761	-4.395	.001
(Constant)	306751.72	7924.404		38.710	.000

Tabla N°2. Ajustabilidad de los modelos.

Coefficients

	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients		Sig.
	B	Std. Error	Beta	t	
Case Sequence	8728.247	57.741	1.187	151.161	.000
Case Sequence ** 2	-81.340	3.302	-.193	-24.634	.000
(Constant)	216778.94	213.270		1016.452	.000

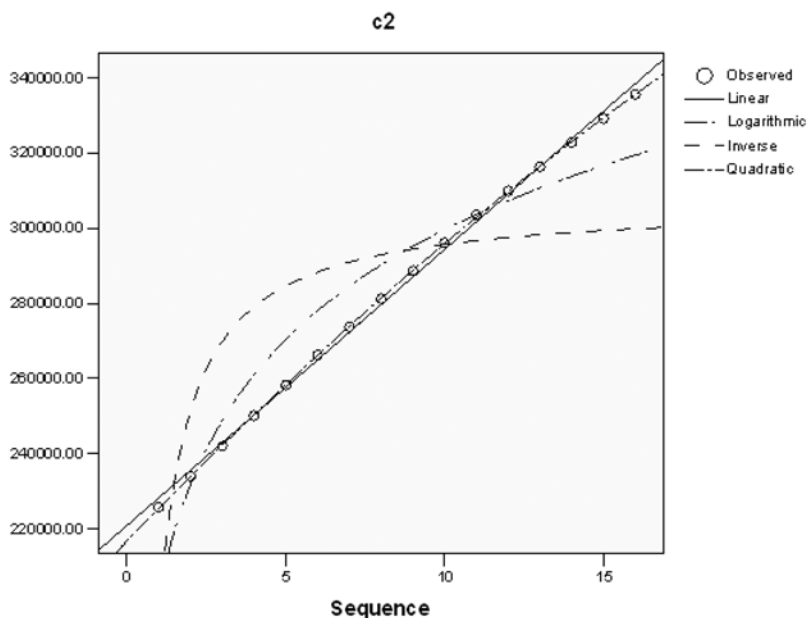


Figura N°4: Gráfico para distintas especificaciones.

FUNCIONALES

Tal como describe, la mayor ajustabilidad la logra el modelo lineal, todos las demás especificaciones carecen de significancia.

De acuerdo a lo siguiente, el primer paso para estimar la población es aplicar una regresión múltiple sin considerar ninguno de los elementos descrito anteriormente y sólo atribuyendo la dinámica del crecimiento a un fenómeno endógeno de la población. El modelo se especificará como:

$$\Delta P_t = \beta + \delta P_{t+1} + u_t$$

Los resultados de este modelo quedan descritos en la Tabla N°3.

Estimaciones del modelo $\Delta P_t = \beta + \delta P_{t+1} + u_t$

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	13244.013	630.312		21.012	.000
	total	-.021	.002	-.934	-9.444	.000

a. Dependent Variable: variaci

Tabla N°3. Estimaciones.

De acuerdo a este modelo, la variación de la población está explicada negativamente por el total de la población. En particular esto confirma el crecimiento a ritmo decreciente que fue planteado anteriormente. Así, el efecto que produce el aumento de una persona en la cantidad total de habitantes genera una variación de 0.021 en la variación de población entre un año y otro. La fiabilidad de este modelo alcanza 0.90, es decir, un 90% de la varianza de puede ser asociada con la variable rezagada.

Un segundo modelo a contrastar consiste en no asumir que existe variación alguna entre un año y otro que no sea atribuible a la evolución de la población total. Este modelo es similar al anterior, con la diferencia que no posee el intercepto B. Las estimaciones se especifican en la Tabla N°4.

Estimaciones del modelo $\Delta P_t = \delta P_{t+1} + u_t$

Coefficients ^{a,b}						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	total	.025	.001	.980	18.443	.000

a. Dependent Variable: variaci

b. Linear Regression through the Origin

Tabla N°4. Estimaciones.

Para este modelo el impacto de la población total en tasa de variación es positivo, alcanzando un efecto marginal de 0,25. Este modelo presenta mayor ajustabilidad alcanzando una fiabilidad de 0,96. En general este modelo pareciera adaptarse mejor que el anterior.

En estos dos modelos, el crecimiento ha sido asumido como un proceso endógeno, es decir, la variación de la población depende sólo de su propia dinámica. Sin embargo, si hay algo que afecte a las series son los ciclos o shocks tendenciales. Una manera de controlar estos efectos y ejecutar proyecciones consistentes consiste en introducir

el período como una variable que explique o bien controle la variación poblacional. El modelo está especificado por

$$\Delta P_t = \beta_1 + \beta_2 t + \delta P_{t+1} + u_t$$

Como se puede apreciar, en este caso se pretende controlar por diferencias tendencias que afecten la tasa de crecimiento de la población, pero no necesariamente representan una dinámica propia del crecimiento. Los resultados se describen en la Tabla N°5.

Estimaciones del modelo $\Delta P_t = \beta_0 + \beta_1 t + \delta P_{t+1} + u_t$

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-1476.141	10257.618		-.144	.888
	periodo	-484.187	336.813	-3.015	-1.438	.176
	total	.046	.046	2.078	.991	.341

a. Dependent Variable: variaci

Tabla N°5.

En esta tabla, se aprecia que todos los coeficientes son significativos al 5%. En particular, el efecto que tiene el período (tendencia) es negativo y por cada año aumenta la variación entre la cantidad de personas es negativa, en particular de 484. Por otra parte el aporte del rezago sigue siendo positivo.

Estimaciones del modelo $P_t = \beta_0 + \delta P_{t-1} + u_t$

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	-13244.013	630.312		-21.012	.000
	plag	1.021	.002	1.000	467.822	.000

a. Dependent Variable: total

Tabla N°6.

Finalmente, eliminando el componente tendencial, el modelo logra su mayor capacidad de predicción. Claramente, para que este modelo tenga consistencia en

su inferencia debe comprobarse su estado estacionario a través de un test de raíz unitaria. Esto se describe en la siguiente tabla.

Parameter Estimates

	Estimates	Std Error	t	Approx Sig
Rho (AR1)	.246	.274	.899	.386
Regression Coefficients plag	1.020	.003	372.180	.000
Constant	-13096.078	792.038	-16.535	.000

Melard's algorithm was used for estimation.

Tabla N°7. Test de estacionariedad.

Dado que el error que se comete en asumir que la serie sigue una tendencia estacionaria es de 0, se rechaza la hipótesis nula y se procede a estimar con dichos coeficientes.

RESULTADOS DEL MODELO ECONOMÉTRICO

A continuación se muestra la proyección estimada:

Año	Población
2007	349.123
2008	355.513
2009	361.905
2010	368.319
2011	374.726
2012	380.805
2013	386.880
2014	392.977
2015	399.039
2016	405.143
2017	410.678
2018	416.234
2019	421.760
2020	427.332
2021	432.860
2022	441.950
2023	451.231
2024	460.707
2025	470.382
2026	480.260
2027	490.345
2028	500.643
2029	511.156
2030	521.890
2031	532.850
2032	544.040
2033	555.465
2034	567.129
2035	579.039
2036	591.199
2037	603.614

Tabla N°7. Proyección Total Estimada.

Con el modelo descrito anteriormente se pueden estimar las variaciones para un período de tiempo, asumiendo que mientras más largo sea el período, mayor será el error que se puede cometer. La estimación promedio se aprecia en la Figura N°5.

Claramente este método está sujeto a errores, sin embargo aún se puede trabajar más para mejorar las evaluaciones del proyecto.

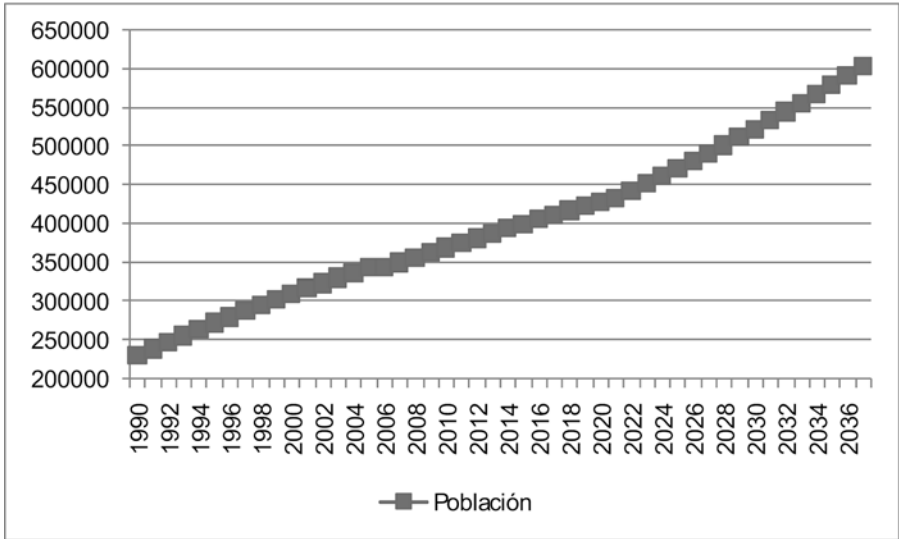


Figura N°5: Proyección promedio hasta el año 2037.

De esta manera la población estimada para el año 2037 alcanzaría las 606.614 personas. Claramente este resultado debe ser considerado con excesiva cautela, ya que en el modelamiento quedan diversas dinámicas demográficas fuera, tales como migración, natalidad, mortalidad, conmutación, etc.

ANEXO C

ESTRATIGRAFÍA Y CAPACIDAD DE SOPORTE

Tabla C – 1

Descripción de estratos

Calicata 1

Profundidad: 1,55 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,30 m.

Gravas: Subredondeadas y redondeadas T.M. 4”.

Granos de arena: 30% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Se encuentra gran cantidad de costras salinas presentándose en capa superior. Bolones de 5 a 6 “.

Calicata 2

Profundidad: 1,15 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino y capa porosa con presencia de sales, espesor de 0,10 m.

Gravas: Redondeadas y fracturadas T.M. 2”.

Granos de arena: 20% Grava fina (Cristales de sal insertos en la arena).

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Media.

Calicata 3

Profundidad: 0,95 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,10 m.

Gravas: Fracturadas T.M. 1”.

Granos de arena: subangulares con 30% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Media.

Observaciones: Materiales cementados desde la superficie con mayores concentraciones de sales solubles o poco solubles.

Calicata 4

Profundidad: 0,75 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,10 m.

Gravas: Subredondeadas y redondeadas T.M. 4".

Granos de arena: subangulares con 30% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Bolsones de aire producto del lavado de sales provocando una cementación variable.

Calicata 5

Profundidad: 1,30 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,05 cm.

Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 3".

Granos de arena: subangulares con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Rocas coluviales fracturadas y descompuestas.

Calicata 6

Profundidad: 1,20 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,05 cm.

Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 2".

Granos de arena: subangulares con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Ladera de cerro con poco arrastre coluvial.

Calicata 7

Profundidad: 1,35 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,05 m.

Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 3".

Granos de arena: subangulares con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Roca disgregada y fracturada. Dos estratos identificados, superior (menor a 0,90 m.): Gravas T.M 1" e inferior (mayor a 0,90 m.): T.M. 3".

Calicata 8

Profundidad: 1,20 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino y aluvional, espesor de 0,05 m.

Gravas: redondeadas y subredondeadas T.M. 3".

Granos de arena: subangulares y redondeados con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Rocas fracturadas y abundancia de sales.

Calicata 9

Profundidad: 2,50 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,10 m.

Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 2".

Granos de arena: subangulares con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Calicata 10

Profundidad: 2,00 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,20 m.

Gravas: Redondeadas T.M. 3".

Granos de arena: Subredondeadas con 30% Grava.

Contenido de finos: 10-15%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Media.

Observaciones: Rocas subredondeadas cementadas y abundancia de sales.

Calicata 11

Profundidad: 0,50 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,10 m.

Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 5".

Granos de arena: Subredondeadas con 60% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.
Compacidad: Densa.
Observaciones: Roca disgregada y fracturada.

Calicata 12

Profundidad: 3,00 m.
Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,05 m.
Gravas: Subredondeadas y redondeadas T.M. 4".
Granos de arena: Subredondeadas con 60% Grava.
Contenido de finos: 5-10%
Estructura: Homogénea.
Distribución: Bien graduada.
Compacidad: Densa.
Observaciones: Rocas subredondeadas con cementación débil y abundancia de sales.

Calicata 13

Profundidad: 1,50 m.
Capa superficial: Compuesta grava fragmentada y angulosa, espesor de 0,20 m.
Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 5".
Granos de arena: Subangulares con 60% Grava.
Contenido de finos: 5-10%
Estructura: Homogénea.
Distribución: Bien graduada.
Compacidad: Densa.
Observaciones: Ladera de cerro con poco arrastre coluvial.

Calicata 14

Profundidad: 1,90 m.
Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,20 m.
Gravas: Angulares y fracturadas T.M. 4".
Granos de arena: Subredondeadas con 20% Grava.
Contenido de finos: 10-15%
Estructura: Homogénea.
Distribución: Bien graduada.
Compacidad: Densa.
Observaciones: Roca fracturada mezclada con material de arrastre coluvial y cementado.

Calicata 15

Profundidad: 3,00 m.
Capa superficial: Compuesta de material fino y aluvional, espesor de 0,20 m.

Gravas: Subredondeadas y redondeadas T.M. 3".

Granos de arena: Subangulares y redondeados con 40% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Densa.

Observaciones: Presenta bolones aislados de T.M. 5" y Rocas subredondeadas con cementación débil, bolsones de aire y abundancia de sales.

Calicata 16

Profundidad: 1,70 m.

Capa superficial: Compuesta de material fino, espesor de 0,20 m.

Gravas: Subredondeadas y redondeadas T.M. 4".

Granos de arena: Subredondeadas con 30% Grava.

Contenido de finos: 5-10%

Estructura: Homogénea.

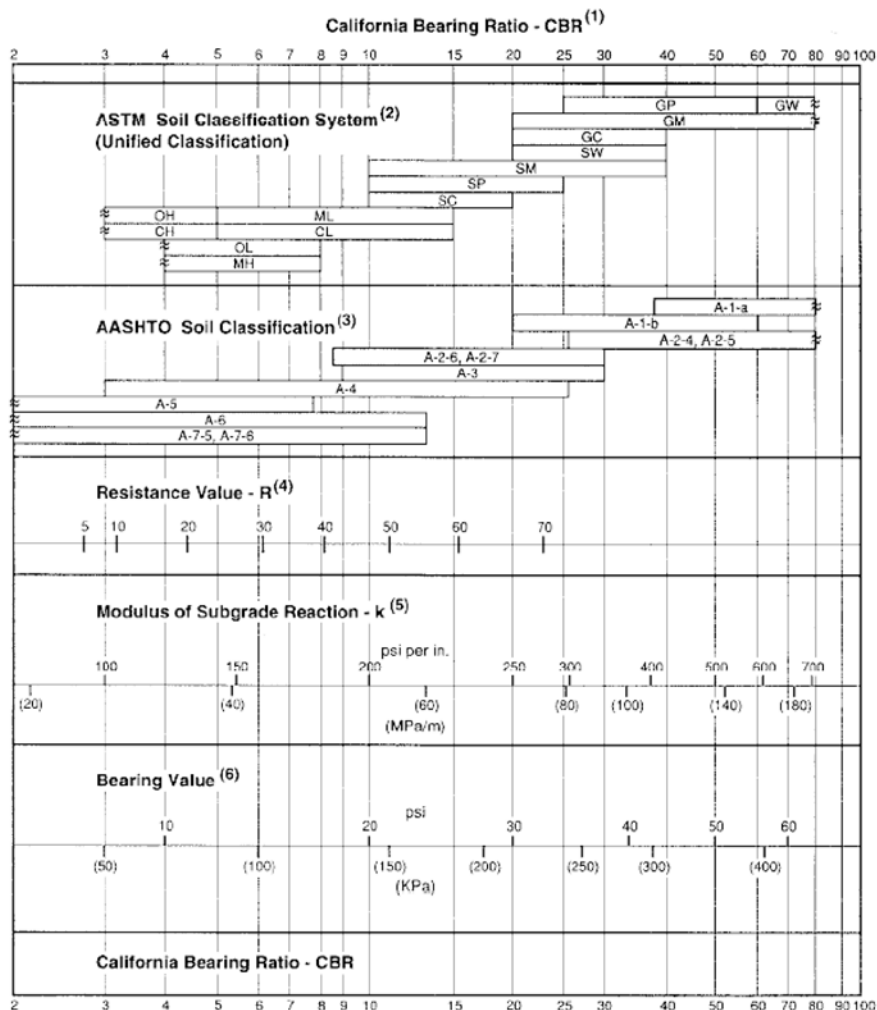
Distribución: Bien graduada.

Compacidad: Suelta.

Observaciones: Rocas subredondeadas con cementación débil, bolsones de aire y abundancia de sales.

Tabla C-2

Approximate interrelationships of soil classifications and bearing values



(1) For the basic idea, see O.J. Porter, "Foundations for Flexible Pavements," Highway Research Board *Proceedings of the Twenty-Second Annual Meeting*, 1942, Vol. 22, pages 100-136.

(2) ASTM Designation D2487.

(3) "Classification of Highway Subgrade Materials," Highway Research Board *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Meeting*, 1945, Vol. 25, pages 376-392.

(4) C.E. Warnes, "Correlation Between R Value and k Value," unpublished report, Portland Cement Association, Rocky Mountain-Northwest Region, October 1971 (best-fit correlation with correction for saturation).

(5) See T.A. Middlebrooks and G.E. Bertram, "Soil Tests for Design of Runway Pavements," Highway Research Board *Proceedings of the Twenty-Second Annual Meeting*, 1942, Vol. 22, page 152.

(6) See item (5), page 184.



un i Universidad Internacional de Andalucía A



97
Municipios
para vivir

