

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Relleno sanitario de la isla San Cristóbal, provincia de
Galápagos: Diseño e impermeabilización**

Luis Fernando Pazmiño Oquendo

Tesis de grado presentada como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, 15 de Julio, 2010

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias de la Ingeniería, Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Relleno sanitario de la isla San Cristóbal, provincia de
Galápagos: Diseño e impermeabilización**

Luis Fernando Pazmiño Oquendo

Ing. César Landázuri Soto
Director de la Tesis

Ing. Fabricio Yépez
Miembro del Comité de Tesis

Ing. Fernando Romo
Decano del Colegio de Ciencias
de la Ingeniería, Politécnico

Quito, 15 de Julio, 2010

© Derechos de autor

Luis Fernando Pazmiño Oquendo

2010

DEDICATORIA

A mi tío y padrino, Ing. Carlos Oquendo, quien siempre me recordó lo lejos que puedo llegar si me lo propongo y por brindarme su confianza y estima durante toda su vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ingeniero Francisco de la Torre, por ser uno de los precursores en el desarrollo de esta Tesis.

A mis padres, por proporcionarme el mejor legado, una educación.

A toda mi familia, por brindarme el apoyo incondicional durante toda mi vida.

A Dios, por darme el milagro de la vida.

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo presentar una base teórica sobre la realización de rellenos sanitarios para poblaciones en el Ecuador, sobre la cual se ha procedido a realizar el diseño e impermeabilización del relleno sanitario de la Isla San Cristóbal, en la provincia de Galápagos. En base a este objetivo, se presenta una investigación sobre los procesos de descomposición de los residuos y conjuntamente los métodos de diseño de estructuras necesarias para garantizar el correcto funcionamiento del mismo y la seguridad del entorno. En base a este complemento teórico, se ha desarrollado un estudio completo sobre la situación económica, política, ambiental, demográfica y climatológica presente en la Isla, para proceder a desarrollar la metodología e ingeniería necesaria para el diseño e implementación de un sistema de disposición final de residuos sólidos en la isla. Este incluye el diseño de los sistemas de impermeabilización, drenaje y manejo de líquidos lixiviados y gases producidos por la descomposición de los residuos dispuestos.

ABSTRACT

The objective of the present paper is to create a theoretical background on the design, construction and operation process of municipal solid waste (MSW) landfills in Ecuador in order to propose the design of a MSW landfill on San Cristóbal Island, province of Galápagos. Built upon these objectives, an investigation was conducted on the process of decomposition of municipal solid wastes and methods of design of essential structures and components to guarantee a correct operation of the facility and environmental wellbeing. Based on this theoretical background, a complete study on the financial, political, and environmental situation, as well as the demographics and climate present on the Island, are analyzed in order to develop a method for design and implementation of a MSW final disposal system for the Island. Design of liner systems, drainage and stabilization of leachate and gas generated are presented herein.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----------|
| 1. MARCO REFERENCIAL..... | 1 |
| 1.1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS..... | 3 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL | 4 |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA..... | 5 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 7 |
| 2.1. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS | 7 |
| 2.2. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO..... | 10 |
| 2.2.1. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS | 10 |
| 2.2.2. PRODUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS | 12 |
| 2.2.2.1. Caracterización de los desechos sólidos | 12 |
| 2.2.2.2. Reciclaje | 15 |
| 2.2.2.3. Biodegradación..... | 15 |
| 2.2.3. CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DENTRO DEL RELLENO | 16 |
| 2.2.3.1. DESCOMPOSICIÓN AERÓBICA..... | 17 |
| 2.2.3.2. DESCOMPOSICIÓN ANAERÓBICA EN FASE ÁCIDA | 18 |
| 2.2.3.3. DESCOMPOSICIÓN ANAERÓBICA METANOGÉNICA | 18 |
| 2.2.3.4. EFECTO DE ACUMULACIÓN..... | 19 |
| 2.2.4. GENERACIÓN Y PROPIEDADES DE LIXIVIADOS | 20 |
| 2.2.5. GENERACIÓN Y PROPIEDADES DE GASES | 22 |
| 2.2.6. COMPONENTES BÁSICOS DE UN RELLENO SANITARIO | 23 |
| 2.2.6.1. SISTEMA VIAL..... | 24 |
| 2.2.6.2. PLAYA DE DESCARGUE | 25 |
| 2.2.6.3. IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL | 25 |
| 2.2.6.4. CELDA DIARIA | 27 |
| 2.2.6.5. COBERTURA INTERMEDIA DIARIA..... | 28 |
| 2.2.6.6. DRENAJE Y MANEJO DE LIXIVIADOS..... | 29 |
| 2.2.6.7. TRATAMIENTO DE GASES | 32 |
| 2.2.6.8. CAPA FINAL DE COBERTURA Y CIERRE TÉCNICO | 34 |
| 2.2.7. OBRAS COMPLEMENTARIAS NECESARIAS | 35 |
| 2.2.8. ALTERNATIVAS DE RECUBRIMIENTO E IMPERMEABILIZACIÓN | 35 |
| 2.2.9. TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS | 36 |
| 2.2.9.1. TIPO ÁREA..... | 37 |
| 2.2.9.2. TIPO RAMPA..... | 37 |
| 2.2.9.3. TIPO TRINCHERA..... | 37 |
| 2.2.9.4. TIPO COMBINADO ÁREA RAMPA | 38 |
| 2.2.10. SELECCIÓN DEL SITIO | 38 |
| 2.2.10.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN | 39 |
| 2.2.10.1.1. Factores ambientales | 39 |
| 2.2.10.1.2. Factores técnicos | 41 |
| 2.2.10.1.3. Factores sociales..... | 41 |
| 2.2.10.1.4. Factores económicos | 42 |
| 2.3. GEOMEMBRANAS | 43 |
| 2.3.1. INFORMACIÓN GENERAL | 43 |
| 2.3.2. USOS | 45 |
| 2.3.3. USO CON GEOTEXTILES U OTROS GEOSÍNTÉTICOS | 46 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.3.4. | IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL EN RELLENOS SANITARIOS | 46 |
| 2.4. | MANEJO DE DESECHOS SÓLIDOS EN EL ECUADOR | 53 |
| 2.4.1. | SITUACIÓN ACTUAL | 53 |
| 2.4.2. | MARCO LEGAL | 54 |
| 3. | RELLENO SANITARIO DE SAN CRISTÓBAL | 57 |
| 3.1. | INFORMACIÓN GENERAL | 57 |
| 3.1.1. | ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS | 57 |
| 3.1.2. | ASPECTOS POBLACIONALES | 61 |
| 3.1.3. | INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS DE SALUD | 64 |
| 3.1.4. | INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS PÚBLICOS | 65 |
| 3.2. | SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS | 67 |
| 3.2.1. | ALMACENAMIENTO | 69 |
| 3.2.2. | BARRIDO | 70 |
| 3.2.3. | RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE | 71 |
| 3.2.4. | DISPOSICIÓN FINAL | 74 |
| 3.2.4.1. | BOTADERO ANTIGUO | 76 |
| 3.2.4.2. | RELLENO SECO ACTUAL | 78 |
| 3.2.5. | RECURSO HUMANO | 81 |
| 3.2.6. | SITUACIÓN FINANCIERA ACTUAL | 82 |
| 3.3. | POBLACIÓN Y PRODUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS | 83 |
| 3.4. | CÁLCULO DE GENERACIÓN DE RESIDUOS | 85 |
| 3.4.1. | METODOLOGÍA | 85 |
| 3.4.2. | OBTENCIÓN DE DATOS | 87 |
| 3.4.3. | PROCESAMIENTO DE DATOS | 89 |
| 3.5. | SELECCIÓN DEL SITIO | 94 |
| 3.6. | CONDICIONES METEOROLÓGICAS DEL SITIO | 95 |
| 3.6.1. | TEMPERATURA | 95 |
| 3.6.2. | PRECIPITACIÓN | 96 |
| 3.6.3. | HUMEDAD RELATIVA | 98 |
| 3.6.4. | HELIOFANÍA | 99 |
| 3.7. | ESTUDIO GEOTÉCNICO Y GEOLÓGICO DEL SITIO | 99 |
| 3.8. | HIDROGEOLOGÍA DEL SITIO | 104 |
| 3.9. | DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA | 105 |
| 3.9.1. | CONFORMACIÓN DE CELDAS DIARIAS | 107 |
| 3.9.2. | DRENAJE E IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL | 108 |
| 3.9.3. | TRATAMIENTO DE LIXIVIADO | 113 |
| 3.9.4. | TRATAMIENTO DE GASES | 117 |
| 3.9.5. | DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS | 118 |
| 3.9.6. | OBRAS COMPLEMENTARIAS | 120 |
| 3.9.6.1. | CERRAMIENTO | 120 |
| 3.9.6.2. | CASETA DE CONTROL Y BODEGA | 120 |
| 3.9.6.3. | VÍAS INTERNAS Y DE ACCESO | 121 |
| 3.9.6.4. | EQUIPO Y MAQUINARIA PARA LA OPERACIÓN | 121 |
| 3.10. | ESTUDIO ECONÓMICO | 122 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 124 |
| 5. | BIBLIOGRAFÍA | 127 |
| | ANEXO NO. 1: PLANOS DE DISEÑO | 129 |

Lista de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1: Comparativo de concentraciones..... | 21 |
| Tabla 2: Sistemas de impermeabilización recomendados o normados en diversos países..... | 27 |
| Tabla 3: Porcentaje de captación de gas por cada sistema de captación..... | 33 |
| Tabla 4: Criterios ponderados de selección..... | 43 |
| Tabla 5: Propiedades generales de geomembranas comunes..... | 44 |
| Tabla 6: Eliminación de basura según pobreza: Campo (1999)..... | 53 |
| Tabla 7: Eliminación de basura según pobreza: Ciudad (1999)..... | 54 |
| Tabla 8: Ramas de actividad laboral en San Cristóbal..... | 63 |
| Tabla 9: Fuentes de abastecimiento de agua..... | 66 |
| Tabla 10: Métodos de eliminación de aguas servidas..... | 67 |
| Tabla 11: Separación en la fuente..... | 69 |
| Tabla 12: Frecuencias de barrido..... | 71 |
| Tabla 13: Días de recolección diferenciada de desechos..... | 72 |
| Tabla 14: Datos del servicio de recolección de residuos sólidos..... | 73 |
| Tabla 15: Recurso humano vinculado al servicio de residuos sólidos..... | 81 |
| Tabla 16: Situación financiera del servicio de residuos sólidos..... | 82 |
| Tabla 17: Población de San Cristóbal..... | 83 |
| Tabla 18: Proyección de población de San Cristóbal..... | 85 |
| Tabla 19: Cálculo de muestras requeridas..... | 86 |
| Tabla 20: Muestreos y cálculos de PPC..... | 90 |
| Tabla 21: PPC por componente, doméstico-comercial..... | 91 |
| Tabla 22: Composición de materiales reciclables..... | 91 |
| Tabla 23: Densidad in situ de los residuos..... | 91 |
| Tabla 24: Generación especial..... | 92 |
| Tabla 25: Caracterización de desechos hospitalarios..... | 92 |
| Tabla 26: Resumen de generación de desechos sólidos..... | 92 |
| Tabla 27: Proyección de PPC doméstico-comercial..... | 93 |
| Tabla 28: Proyección de generación de residuos para reciclaje, compostaje y relleno sanitario ... | 94 |
| Tabla 29: Precipitación mensual, 1950-2005..... | 98 |
| Tabla 30: Perfil estratigráfico de Cerro Quemado..... | 100 |
| Tabla 31: Clasificación del suelo..... | 101 |
| Tabla 32: Clasificación SRC del macizo rocoso..... | 102 |
| Tabla 33: Caracterización geotécnica..... | 103 |
| Tabla 34: Resumen de condiciones meteorológicas..... | 105 |
| Tabla 35: Base de diseño para el relleno sanitario..... | 106 |
| Tabla 36: Filtración a través de un sistema de arcilla únicamente..... | 108 |
| Tabla 37: Caudal de ingreso al relleno sanitario..... | 110 |
| Tabla 38: Datos para evaluación del sistema de impermeabilización..... | 110 |
| Tabla 39: Valores calculados para el dimensionamiento de la capa de drenaje..... | 110 |
| Tabla 40: Resultados de evaluación del sistema de impermeabilización..... | 112 |
| Tabla 41: Filtración a través de un sistema de arcilla únicamente..... | 112 |
| Tabla 42: Protección de geomembrana con geotextil..... | 113 |
| Tabla 43: Diseño de etapas de tratamiento de lixiviado..... | 115 |
| Tabla 44: Diseño de piscina de evaporación de lixiviados..... | 116 |
| Tabla 45: Tarifa actual del servicio..... | 122 |
| Tabla 46: Tarifa proyectada del servicio..... | 123 |
| Tabla 47: Presupuesto de construcción del relleno sanitario..... | 124 |
| Tabla 48: Costos operativos del relleno sanitario..... | 124 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Esquema de flujo de vida de productos domésticos | 9 |
| Figura 2: Concentración química del lixiviado en el tiempo | 20 |
| Figura 3: Composición de gases en el tiempo | 23 |
| Figura 4: Archipiélago de Galápagos | 58 |
| Figura 5: Isla san Cristóbal | 59 |
| Figura 6. Ordenamiento Territorial de Galápagos | 60 |
| Figura 7: Mapa de Puerto Baquerizo Moreno | 62 |
| Figura 8: Limpieza de la ciudad. | 73 |
| Figura 9: Temperatura mensual..... | 95 |
| Figura 10: Promedio mensual de precipitación | 96 |
| Figura 11: Humedad relativa..... | 98 |
| Figura 12: Promedio mensual de horas de sol..... | 99 |

Lista de Fotos

| | |
|---|-----|
| Foto 1: Hospital Oskar Jandl, San Cristóbal | 64 |
| Foto 2: Mercado Municipal de San Cristóbal | 65 |
| Foto 3: Tachos de sistema diferenciado de recolección de residuos sólidos | 70 |
| Foto 4: Recipientes municipales para instituciones educativas en El Progreso | 70 |
| Foto 5: Barrido en una calle de San Cristóbal y equipos de barrido | 71 |
| Foto 6: Vehículo Recolector San Cristóbal | 72 |
| Foto 7: Camión para la recolección de cartones en San Cristóbal..... | 73 |
| Foto 8: Pilas de Compost..... | 74 |
| Foto 9: Centro de Reciclaje de residuos y disposición del material reciclable para ser empacado | 75 |
| Foto 10: Clasificación del material reciclable en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos | 75 |
| Foto 11: Pacas de cartón y latas embaladas para transporte. | 75 |
| Foto 12: Centro del botadero | 77 |
| Foto 13: Lluvias acumulan agua por falta de cunetas y drenaje, la falta de cobertura ocasiona mayor generación de lixiviados. | 77 |
| Foto 14: Ingreso al botadero..... | 78 |
| Foto 15: Borde del botadero hacia la quebrada..... | 78 |
| Foto 16: Elaboración de pacas de material de rechazo | 79 |
| Foto 17: Sitio de disposición de material de rechazo sobre una geomembrana dispuesta en el suelo | 79 |
| Foto 18: Paca de material de rechazo deteriorada | 80 |
| Foto 19: Encuestas realizadas en San Cristóbal | 88 |
| Foto 20: Procedimiento de determinación de peso volumétrico..... | 88 |
| Foto 21: Vista panorámica de la mina..... | 101 |
| Foto 22: Afloramiento de agua salobre | 104 |
| Foto 23: Movimiento de agua a través de fisuras | 104 |
| Foto 24: Imagen satelital y topografía de la mina de Cerro Quemado | 106 |

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ANTECEDENTES

El desarrollar sitios de disposición final de desechos sólidos que minimicen la propagación de contaminantes y limiten el impacto ambiental en el Ecuador es una práctica poco propagada. La falta de recursos destinados hacia el tratamiento correcto de los residuos sólidos ha hecho de los botaderos a cielo abierto una práctica general, sin preocupación alguna del daño ambiental y futuros problemas de salud. Con un alto contenido orgánico, biodegradable y desechos poco inertes, la basura que se genera en nuestro país tiene un alto potencial de dañar a fuentes de suelo, agua y al aire circundante.

Desde el punto de vista financiero, la basura se la define como un material que representa una carga económica menor al desecharla que al reutilizarla. Por tanto, a pesar que existan planes de reciclaje y reducción de producción de basura en los sitios generadores de la misma, siempre será necesario tratar con este problema. Finalmente, la implementación de una capa de impermeabilización inicial, así como la conformación de celdas diarias con coberturas intermedias y un cierre técnico del relleno con material impermeable dictaron las bases mínimas que requeriría lo que hoy se conoce como un relleno sanitario, con el fin de minimizar el impacto creado ambiental y estabilizar de manera controlada el relleno.

En el Ecuador, la falta de financiamiento para este tipo de proyectos ha causado una carencia de infraestructura y de servicios eficientes para el manejo de los residuos sólidos, los mismos que han causado que los índices de cobertura de este servicio básico sean deficientes en cuanto a la recolección y a la disposición final de estos residuos. Según los cálculos realizados en el año 2000 por el MIDUVI, el Ecuador genera 7.423 toneladas diarias de residuos sólidos, de los cuales se recolectan formalmente el 49% y se confinan apropiadamente tan solo el 30%, por lo tanto el 70% restante se lo dispone en quebradas, cuerpos de agua y terrenos baldíos. Adicionalmente, muchos de estos sitios de disposición final no cumplen con las especificaciones necesarias para ser considerados como

rellenos sanitarios. En cuanto a cobertura de un servicio de recolección, en poblaciones urbanas menos del 50% de la población tiene acceso a este servicio, y en zonas rurales es prácticamente inexistente.

El cantón San Cristóbal en la provincia de Galápagos cuenta con alrededor de siete mil habitantes, distribuidos principalmente en la cabecera provincial Puerto Baquerizo Moreno y la pequeña población de El Progreso. En el año 2002 el Gobierno Municipal del Cantón San Cristóbal con la asistencia de la Agencia Española de Cooperación Internacional iniciaron el Proyecto de Gestión Integral de Residuos.

Parte fundamental de este programa es el Centro de Gestión de Residuos Sólidos, CGRS, destinado al procesamiento de la basura recolectada en forma clasificada (basuras orgánica, reciclable y rechazo) de la población. Este centro también cuenta con un relleno sanitario construido a nivel, ya que las características rocosas del suelo hacían muy costosa la excavación de celdas.

Por esta razón, después de más de un año de operación del CGRS, se requiere de la ampliación del espacio destinado al relleno sanitario, surgiendo la necesidad de encontrar nuevos terrenos para satisfacer la producción de basura.

La realización de un relleno sanitario con los más estrictos controles dentro de un área de protección ambiental representa una gran oportunidad para diseñar y analizar la importancia de los sistemas de gestión de residuos sólidos en el país.

La falta de desarrollo y considerable costo de los geosintéticos en el Ecuador, a pesar de contener una amplia gama de productos derivados del petróleo, ha limitado la utilización de estos productos. La importación de estos materiales y su aplicación en estabilización de taludes, control de erosión y control de migración de fluidos es limitada en nuestro país, por lo que se requiere una mayor divulgación de las prestaciones de estos materiales, estudiar su implementación y permitir una inclusión para mejoramiento de las instalaciones actuales en áreas de contención de líquidos.

Los geosintéticos abarcan una gran variedad de materiales, entre los que se destacan los geotextiles, geomallas, geomembranas, y geocompuestos. Las

geomembranas son tejidos poliméricos impermeables, que por lo general se fabrican en hojas flexibles y continuas. Se usan básicamente como barreras para líquidos o vapores. Pueden servir como recubrimientos para rellenos sanitarios y cubiertas para almacenes, entre una variedad de aplicaciones. Algunas geomembranas se fabrican al impregnar geotextiles con asfalto o elastoméricos. Los geotextiles son tejidos flexibles, porosos, hechos de fibras sintéticas tanto tejidas como no tejidas. Ofrecen las ventajas para fines geotécnicos de resistencia a la biodegradación y porosidad, permitiendo flujo por el tejido. Permiten separar materiales, reforzar, filtrar, drenar, controlar erosión y estabilizar tierras, entre otros.

De igual manera, se debe considerar todas las propiedades de los materiales para evaluar su eficacia, y permitir una aplicación correcta. La instalación de geomembranas en rellenos sanitarios responde a la necesidad de crear una barrera impermeable que permita la correcta recolección de lixiviados y prevenir la contaminación del suelo circundante, y futura migración hacia fuentes de agua superficial y subterránea circundante. Sin duda alguna, los sistemas de contención y tratamiento de lixiviados y gases son cruciales en el diseño y operación de un relleno sanitario. Los rollos de geomembrana pueden ser juntados, empacados, y enviados al sitio de aplicación. Sin embargo, por motivos de logística (peso, tamaño, equipo disponible) el sellado en campo de los paneles es requerido. Se cuenta con gran variedad de fuentes bibliográficas sobre las propiedades de estos materiales y su correcta instalación, que permitirían su aplicación de manera controlada para garantizar su impermeabilidad y seguridad.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA E HIPÓTESIS

Con los antecedentes anteriormente presentados, es claro que la problemática presentada por la necesidad de disponer adecuadamente los residuos sólidos afecta a toda la humanidad. Este tipo de gestión es parte integral de los servicios básicos que una población debería recibir. Sin embargo, la situación socio-económica del Ecuador requiere de un cambio drástico en cuanto al procesamiento de residuos sólidos, en especial de su disposición final. Esto

incluye garantizar un correcto funcionamiento del mismo, libre de amenaza para la comunidad y al medio ambiente.

El cantón de San Cristóbal en la provincia de Galápagos presenta una necesidad de expandir su plan de gestión de residuos sólidos para que incluya un relleno sanitario con una vida útil de al menos 15 años. Por esta razón se requiere la realización de los estudios y diseño de un relleno sanitario en esta localidad.

Por tanto, se presenta la siguiente hipótesis para el proyecto:

El diseño de un relleno sanitario óptimo y la aplicación correcta de sistemas de impermeabilización son indispensables para el tratamiento adecuado de los desechos sólidos urbanos y así minimizar la difusión de contaminantes hacia el medio ambiente.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y realizar el diseño de un relleno sanitario a través del cual evaluar la importancia de la utilización apropiada de sistemas de impermeabilización como parte integral del mismo, tomando como base para análisis y evaluación el diseño y estudios necesarios para un relleno sanitario en la Isla de San Cristóbal en la provincia de Galápagos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Crear una base teórica sobre el diseño de un relleno sanitario y su funcionamiento aplicable a poblaciones pequeñas en el Ecuador.
- Presentar un método de evaluación y aplicación de geomembranas como sistema de impermeabilización inicial de rellenos sanitarios.
- Indagar la situación actual de los rellenos sanitarios en el Ecuador y la gestión de residuos sólidos.

- Realizar un estudio situacional de la generación y procesamiento de los residuos sólidos en San Cristóbal
- Seleccionar el área requerida para el relleno sanitario.
- Diseñar el sistema de manejo de lixiviados.
- Diseñar el sistema de manejo de gases.
- Diseñar los sistemas de impermeabilización y drenaje.
- Elaborar un análisis económico de la construcción del relleno con las especificaciones técnicas correspondientes.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La principal importancia de este trabajo radica en la implementación de nuevas tecnologías en el Ecuador que provean de soluciones tanto económicamente plausibles como eficientes. Contando con un ecosistema tan rico y vulnerable, es necesario tomar todas las precauciones del caso en cualquier relleno sanitario que se diseñe y se ejecute. El uso de geomembranas junto con una correcta instalación debe ser implementado con mucha cautela en nuestro país, y en el caso de rellenos sanitarios se presenta un gran obstáculo debido a la situación financiera y de aplicabilidad en sitios fuera de las ciudades grandes del país. Sin embargo, las ventajas de utilizar una barrera de este tipo permiten garantizar la impermeabilización y mantener un control y una fácil instalación especialmente en sitios con suelos muy permeables o de elevado impacto ambiental.

Las geomembranas han existido en el Ecuador desde hace ya varios años, con diversas aplicaciones. Sin embargo, este material, al igual que el resto de geosintéticos, no ha encontrado un área de aplicación extensa en el Ecuador, debido a falta de especificaciones y de conocimiento en el medio sobre el uso de este material. Por esta razón, en Quito existen tan solo un par de empresas que importen este tipo de materiales (y existen algunas otras empresas extranjeras que los traen bajo pedido).

La escasez de rellenos sanitarios técnicos en el país representa un verdadero obstáculo para el desarrollo de la nación. Solo las principales ciudades del país

cuentan con facilidades apropiadas para el manejo de desechos sólidos, y lo que es aún más preocupante, estas instalaciones no han mostrado un correcto funcionamiento que garantice la integridad medioambiental. Se requieren soluciones que aseguren el correcto funcionamiento de estas plantas, aún dentro de nuestra cultura en donde la inversión en mantenimiento nunca ha sido una prioridad. La importancia de el manejo correcto de gases y líquidos lixiviados en un relleno sanitario presenta un verdadero reto en la práctica, sin embargo se pueden tomar medidas preventivas que controlen y limiten la filtración hacia el exterior de los contaminantes y perjudiquen al medioambiente, y fuentes naturales vitales para el uso humano. Es por esta razón que para un correcto diseño y evaluación de alternativas apropiadas para impermeabilizar un relleno sanitario y las piscinas de lixiviados se deben considerar todos los factores que inciden en su selección.

La isla de San Cristóbal cuenta con un proyecto de Gestión Integral de Residuos Sólidos que comprende la recolección de residuos sólidos ya clasificados en rechazo, reciclables y orgánicos, el mismo que también cuenta con el Centro de Gestión de Residuos Sólidos en donde se procesa los residuos sólidos para reciclaje, compostaje y ubicación en el relleno sanitario. Sin embargo, el relleno sanitario de dicho centro está culminando su vida útil, por lo que es necesario crear un nuevo sitio de disposición final.

A continuación se presentan algunos factores que exhiben la importancia de la realización del proyecto:

- Toda población, sea grande o pequeña, requiere de un sistema de gestión de residuos sólidos como parte de los servicios básicos proveídos, para su propio beneficio y el del medio ambiente.
- El archipiélago de Galápagos presenta un ecosistema excepcionalmente frágil y fácilmente alterable, por lo que particular atención se debe prestar para no alterar flora, fauna y recursos naturales en la isla.
- El archipiélago de Galápagos es una formación geológica joven de origen volcánico y por tanto su composición geotécnica es rocosa y

presenta situaciones tanto muy permeables como poco permeables, por lo que especial atención se debe colocar en los sistemas de impermeabilización y drenaje.

- Siendo las Islas Galápagos el principal destino turístico del Ecuador, así como Patrimonio Natural de la Humanidad, y San Cristóbal como su capital y segundo puerto marítimo de importancia en el archipiélago, la aplicación de una correcta disposición final de los residuos sólidos es inaplazable.

Estos factores conllevaron a la elección del cantón San Cristóbal para la realización del proyecto aquí presentado, ya que se muestra como un ejemplo pertinente para el análisis que se propone.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Históricamente, los primeros indicios de gestión de residuos sólidos se remontan al siglo quinto A.C., en donde cada individuo debía llevarlos hacia el botadero de la ciudad. El primer servicio de recolección se lo realizó en el imperio Romano, en donde una carreta dirigida por caballos hacía el trabajo de recolección y disposición de la basura en un botadero céntrico en la ciudad. Sin embargo, estos sistemas murieron junto con el decaimiento del Imperio Romano.

Alrededor de 1910 fue cuando finalmente se desarrollaron métodos para la utilización de un relleno sanitario, ya que hasta esa fecha todos los sitios de disposición final eran botaderos a cielo abierto, en donde los residuos eran desechados directamente sobre el suelo. Los primeros métodos se basaban en enterrar la basura, considerando que esto era suficiente para prevenir el brote de plagas y los malos olores. En otros casos no se los enterraba y se recurría a la quema de los residuos, muchas veces produciendo explosiones. La incineración controlada se fue desarrollando para el control de volúmenes. Sin embargo, los problemas de olores, ruido, animales (en especial aves, roedores e insectos) y el

humo generado son algunos de los factores visibles que impulsaron a buscar mejores alternativas.

La aparición del relleno sanitario como tal se dio alrededor de los años 1930, en donde la necesidad de una capa de cobertura en un terreno confinado se introducía. Sin embargo, estos eran construidos y operados con muy poca participación de ingenieros, por tanto no se realizaba un diseño que minimizara problemas a futuro. Esto se mantuvo aún hacia los años 1950. El principal problema era que no se tomaba en cuenta la necesidad de que la capa de cobertura actúe como barrera para minimizar el ingreso de precipitaciones que dispersan los contaminantes y facilitan las reacciones de descomposición en los residuos, y consiguientemente salen hacia el ambiente.

Entre diferentes métodos de disposición final y manejo de desechos sólidos apropiados que se pueden aplicar simultáneamente se encuentran los siguientes: Reciclaje, compostaje de residuos de jardín y algunos orgánicos, incineración (utilizando los residuos como combustible, en algunos casos para la generación de energía calórica), y disposición en un relleno sanitario.

A pesar de los importantes esfuerzos para reducir la cantidad de residuos generados y desechados, a través del reciclaje tanto en la fuente como en los sitios de disposición final, reducción de consumo y de generación de basura, y la reutilización de productos manufacturados, siempre se necesitará de sitios en donde disponer de la materia que ya no es útil para la sociedad, y que requiere de un tratamiento hasta que esta ya no se convierta una amenaza para la salud y el medio ambiente. El siguiente gráfico perfila las actividades de gestión de residuos sólidos que se pueden realizar, así como el flujo esquemático de la vida de productos generales de uso doméstico:

Proceso de consumo, generación y disposición de desechos domésticos

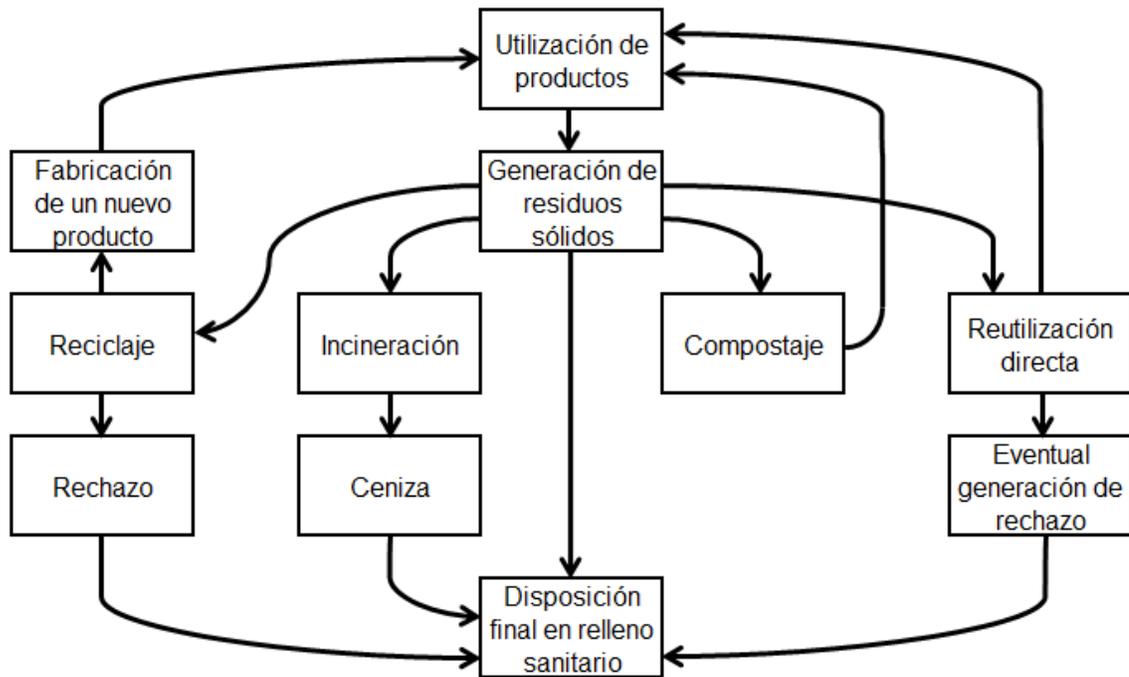


Figura 1: Esquema de flujo de vida de productos domésticos

Como se perfila en el anterior gráfico, la gestión de residuos sólidos embarca todos los ámbitos relacionados con el manejo de esta materia, desde la generación de los desechos, almacenamiento en la fuente, recolección, transferencia, transporte, procesamiento y recuperación, y disposición final.

En comunidades que cuentan con sitios viables para ser adecuados como lugares de disposición final de desechos sólidos, los rellenos sanitarios usualmente proveen la mejor alternativa económicamente para este propósito. A pesar de la existencia de otros métodos de disposición final, la mayor cantidad de residuos sólidos son depositados en rellenos sanitarios. Muchas veces, el sitio una vez haya cumplido su vida útil es recuperado para ser utilizado como áreas verdes recreacionales, en cuyo caso se optimiza el uso previo del terreno.

Los residuos sólidos de cada población varían de manera significativa dependiendo de varios factores socio-económicos. Así es como una población joven tendrá una alta producción de pañales en comparación con una de mayor

edad. Factores como el precio de verduras, vegetales y carnes no procesadas afectan en la producción de residuos con alto contenido orgánico, que a su vez biodegradan a mayor rapidez y requieren de una atención especial. El poder adquisitivo de bienes materiales también influye en la cantidad de producción de residuos, así como las costumbres y educación de una población en cuanto a sustentabilidad y reciclaje.

En el Ecuador, un factor importante que se debe considerar es la alta cantidad de contenido orgánico que se encuentra en los desechos sólidos, que representan el mayor porcentaje de los mismos. También el reciclaje o reutilización de materiales no va más allá de la necesidad de cada familia, y una conciencia proactiva frente a la defensa del medio ambiente es escasa o nula.

2.2. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

2.2.1. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Biogas: Se refiere a los compuestos en estado gaseoso producidos por el proceso de descomposición de los residuos en el relleno sanitario. Casi en su totalidad se compone de gas metano y dióxido de carbono.

Biomasa: Es material derivado de los procesos de metabolización de organismos vivos. Permite cuantificar la cantidad de organismos que se encuentran participando en la reacción.

Botadero: Sistema informal de disposición final de desechos sólidos que no cuenta con ningún sistema de tratamiento de lixiviados y gases, compactación, impermeabilización superior e inferior, ni control de plagas. Es simplemente un sistema de vertido en un sitio designado.

Capacidad de campo: La capacidad de recepción y acumulación de humedad de un sólido permeable antes de que el líquido escape el cuerpo debido a la acción de la gravedad.

Celda diaria: Conformación básica unitaria de los residuos sólidos diarios dentro del relleno sanitario. Son conformados en base a capas compactadas de residuos

hasta formar la geometría deseada, y recubiertos con material tal que se cree una barrera contra el ingreso de lluvias y vectores.

Geomembrana: Geosintético fabricado a base de tejidos poliméricos, fabricados generalmente en hojas flexibles y continuas. Su función principal radica en la impermeabilización, a pesar de que aporta con cierto grado de resistencia a la tensión.

Geosintético: Amplia categorización de materiales utilizados en aplicaciones geotécnicas para mejorar las prestaciones del suelo, ya sea como impermeabilizante, filtrante, protección contra erosión, mejorador de propiedades del suelo, tales como esfuerzos de tensión, y varios más. Generalmente se presentan como láminas del producto, permitiendo adoptar geometrías muy variadas.

Geotextil: Son tejidos flexibles, porosos hecho de fibras sintéticas tejidas o no tejidas. Son resistentes a la biodegradación y su porosidad permite una variedad de aplicaciones. Permiten separar materiales, reforzar, filtrar, drenar, controlar erosión, y su resistencia a la tensión permite una opción flexible para estabilización de taludes.

DBO: (mg/L) Demanda bioquímica de oxígeno, es la cantidad de oxígeno requerido por microorganismos, principalmente bacterias, en la estabilización de materia orgánica bajo condiciones aeróbicas. La estandarización de su medición es a 20°C durante 5 días, y se la conoce como DBO_5 (mg O_2 /L de muestra). Permite correlacionarla con la cantidad de materia orgánica fácilmente degradable.

DQO: Demanda química de oxígeno, es la medida del oxígeno requerido para oxidar toda la materia orgánica químicamente. Permite correlacionarla con la cantidad de materia orgánica en una muestra, y se la determina utilizando una cantidad variable de un fuerte agente oxidante.

Lixiviado: Líquido generado por el proceso de estabilización de la materia dentro de un relleno sanitario. Principalmente se compone de la percolación del agua

lluvia a través de las celdas del relleno. Se caracterizan por ser muy reactivos química y biológicamente.

Reactor biológico: Se refiere a un volumen confinado en donde se tiene una proliferación controlada de organismos para conducir las reacciones deseadas.

Rechazo: Se refiere al material que formará parte del relleno sanitario. Específicamente, es todo residuo sólido que no ha sido separado para su reutilización o reciclaje.

Relleno Sanitario: Sistema controlado de disposición final de desechos sólidos, que se caracteriza por la acumulación y compactación diaria de residuos, con una cobertura inerte diaria para crear un sellado efectivo, en un sitio designado para dicho propósito que minimice el impacto ambiental y controlando los productos de la biodegradación natural de los residuos debido a la fermentación natural de los mismos causada por microorganismos presentes.

Residuos Sólidos: Comprenden todos los materiales sólidos, incluyendo semisólidos o líquidos confinados que son desechados permanentemente bajo la categoría de inutilizables o superfluos.

2.2.2. PRODUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS

Es muy importante conocer la población a la cual se va a proveer el servicio debido a factores de cantidad como de calidad de generación de basura, así como de actitud hacia la implementación de un nuevo proyecto. Por lo tanto, datos poblacionales, junto con una encuesta y datos estadísticos pertinentes a los hábitos de la comunidad, y caracterización de la basura son necesarios.

2.2.2.1. Caracterización de los desechos sólidos

Antes de proceder al diseño del relleno sanitario es necesario realizar un levantamiento de información completo sobre todas las características en cuanto a cantidad, calidad, origen, composición química, composición física, entre varios

otros factores que son la base para el diseño de la estabilidad y estructura de la celda base y de todo el relleno.

Es necesario realizar por métodos directos y estadísticos un muestreo de la cantidad de desechos sólidos que se generan dependiendo su origen, ya sea este doméstico, comercial o industrial, o conforme a un área específica que requiera consideraciones especiales, o un generador de grandes cantidades de desechos. Por ejemplo, desechos hospitalarios deben ser tratados por separado por su peligro químico y biológico, a pesar de que se está tratando desechos sólidos urbanos. El uso de parte del relleno como escombrera puede ser útil si su localización permite la disposición de dichos materiales. Generadores como camales, mercados, y centros artesanales deben tener una consideración especial también.

El estudio de cantidad de residuos sólidos determina la cantidad de desechos sólidos generados per cápita (PPC) diarios y se lo mide en Kg/hab-día. Este parámetro es básico para el dimensionamiento de servicios de aseo y disposición final, pues permite realizar proyecciones para establecer la demanda del servicio.

La diferenciación entre viviendas rurales y urbanas dentro de las poblaciones a servir y de los diferentes estratos socio-económicos de la población es factor importante para caracterizar la composición, cantidad de basura generada, y para proyecciones de crecimiento poblacional.

Para realizar un muestreo confiable, Sakurai (1983) presenta un mecanismo para el cálculo del tamaño de la muestra que se debe obtener en una población para determinar la generación por vivienda:

$$n = \frac{v^2}{\left[\frac{E}{1.96} \right]^2 + \frac{v^2}{N}}$$

Donde:

n = número de viviendas a probar aleatoriamente.

v = desviación estándar de PPC, para poblaciones pequeñas en donde no se cuenta con datos previos se recomienda una desviación igual a 200 gr/hab-día.

E = error permisible (gr/hab/día). 25 – 60 gr/hab/día recomendado.

N = número total de viviendas del estrato en cuestión.

Para el procesamiento de datos, es necesario incluir un método estadístico que elimine los datos no confiables. Por lo tanto, se puede implementar un método estadístico sencillo para eliminación de colas en base a una distribución normal. Se ordena los datos de menor a mayor, en este caso corresponden a los valores diarios (o promedios, si el muestreo se lo realizó durante más de una jornada) de la generación de basura per cápita, obtenidos durante el período de muestreo. Luego se procede a calcular los valores de desviación estándar de la muestra, con respecto a la media. Se obtiene de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

Donde:

σ = desviación estándar

x = valor individual muestreado

\bar{x} = promedio aritmético de las muestras

n = tamaño de la muestra

Con la desviación estándar de la muestra se puede obtener el intervalo de confianza, el cual representa un rango en donde la probabilidad de obtener un muestra dentro de este rango es equivalente al porcentaje de confianza indicado, basado en una distribución normal. Se obtiene según la fórmula siguiente:

$$\bar{x} \pm A \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde:

\bar{x} = promedio aritmético de las muestras

A = Área bajo la curva de la curva de distribución normal, correspondiente al porcentaje de confiabilidad deseado.

σ = desviación estándar

n = tamaño de la muestra

De esta manera se pueden establecer límites superiores e inferiores a los datos obtenidos, de manera que se puede rechazar las colas del muestreo.

Una vez realizado el muestreo, se deben obtener datos de composición de la basura, volúmenes totales a procesar, y densidad *in situ*.

2.2.2.2. Reciclaje

Es importante evaluar la posibilidad de reducción de la generación de desperdicios sólidos. Como ya se presentó en la Figura 1: Esquema de flujo de vida de productos domésticos, existe una variedad de formas de disponer de la basura antes de destinarla a un relleno sanitario. Por esta razón es importante evaluar métodos de reducción en la fuente, o como parte del proceso de gestión de residuos sólidos a implementarse. Es importante recalcar que la necesidad del reciclaje no viene de un punto de vista enteramente ecológico; es necesario para poder disponer de manera correcta los residuos, para evitar futuras complicaciones y reducir al máximo la necesidad de crear rellenos sanitarios, los cuales si no tienen un estricto control, causan graves molestias al entorno.

2.2.2.3. Biodegradación

Cabe recalcar que el nivel de biodegradación de los desechos está íntimamente relacionado con la estabilidad físico-química del rechazo, así como con la generación de lixiviados y de gases. Por lo tanto, la caracterización antes descrita permite evaluar el componente de la basura que se degradará fácilmente, y por tanto que requerirá de un tratamiento más agresivo y con mayores concentraciones de contenido orgánico.

2.2.3. CAMBIOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS DENTRO DEL RELLENO

Los procesos de descomposición de la basura hacen que esta cambie drásticamente durante el tiempo que permanece en el relleno sanitario. La interrelación entre los procesos físicos, químicos, y biológicos liberan una serie de compuestos que se encuentran en estados sólidos, líquidos y gaseosos, los cuales tienen que ser tratados adecuadamente para impedir su migración hacia fuera del relleno.

Los procesos físicos que los residuos sólidos atraviesan incluyen degradación física y el enjuague de material particulado y de tamaños pequeños por acción de la migración del lixiviado. El aumento de presión por flujos elevados y el subsecuente incremento de concentración de los líquidos causa una degradación mayor y subsecuentemente partículas son arrastradas.

Los procesos químicos que ocurren por descomposición son varios, incluyendo hidrólisis, disolución y precipitación, adsorción e intercambio iónico de los diferentes componentes.

La descomposición biológica sin duda es el proceso más importante, ya que esta es la única responsable de la producción de gas metano. Este proceso ocurre por la presencia de bacteria a través de varios mecanismos biológicos hasta terminar su degradación.

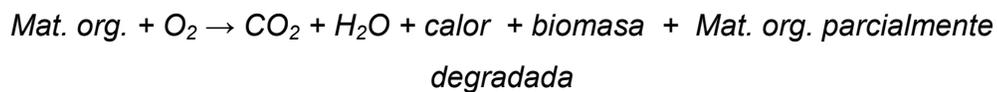
Por dichos procesos, el relleno sanitario actúa como un reactor biológico. Dentro del procedimiento de descomposición, existen varios factores que alteran significativamente la manera y la tasa a la cual reaccionan los residuos sólidos, incluyendo contenido de humedad, edad y composición a diferentes ubicaciones dentro del relleno. Estos factores permitirán caracterizar al lixiviado generado y la generación de gas que permitirán determinar el estado de descomposición de la basura.

Se puede dividir a la descomposición biológica de los residuos sólidos en las siguientes etapas, las cuales son indispensables para caracterizar la generación de lixiviados y gases (McBean, et. al., 1995):

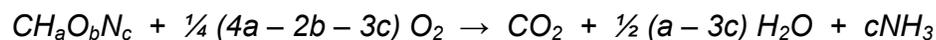
2.2.3.1. DESCOMPOSICIÓN AERÓBICA

Como su nombre lo indica, requiere la presencia de oxígeno para ocurrir. Por tanto, ocurrirá cuando existan fuentes de oxígeno presentes. Es el primer proceso que ocurre al momento de ubicar los residuos en su celda diaria. Debido a la cantidad limitada de oxígeno una vez conformado el relleno, este proceso solo ocurrirá en la superficie del mismo, y es responsable por una pequeña cantidad de descomposición. Por tanto, la duración de esta fase se reduce a unos cuantos días, o mayor si el contenido de humedad es bajo.

Microorganismos aeróbicos degradan la materia orgánica de los residuos sólidos y generan dióxido de carbono, agua, material orgánico degradado parcialmente y calor. La siguiente ecuación representa esta relación:



Si se realiza un análisis de los elementos presentes, se puede llegar a la siguiente reacción bioquímica:



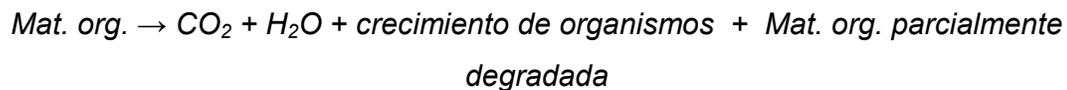
La temperatura puede elevarse 10 o 20°C sobre la temperatura ambiental, o aún más si el contenido de humedad es mayor. Los niveles de dióxido de carbono son del 90%. Estos altos niveles de CO₂ causan la formación de ácido carbónico, y consecuente pH ácido en el lixiviado:



Debido a que en esta etapa la cantidad de humedad no ha llegado a la capacidad de campo, la generación de lixiviado es muy baja, y se debe a la porosidad o vías rápidas de drenaje dentro de la configuración del relleno. Los componentes en el lixiviado en esta etapa es comúnmente material particulado arrastrado por la percolación del agua, sales solubles y materia orgánica soluble en pequeñas cantidades, en especial ácidos orgánicos que a su vez contribuyen a la actividad química dentro del relleno.

2.2.3.2. DESCOMPOSICIÓN ANAERÓBICA EN FASE ÁCIDA

Una vez que el oxígeno ha sido consumido completamente, microorganismos facultativos corresponden a la gran mayoría de microorganismos presentes. En esta etapa acetogénica, la fermentación ácida domina, en donde altas concentraciones de ácidos orgánicos, amoníaco, hidrógeno, y dióxido de carbono son producidos. La ecuación característica se describe a continuación:

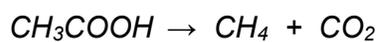
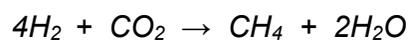


Los productos parcialmente degradados son principalmente ácidos orgánicos, que junto con una alta concentración de dióxido de carbono reducen el pH del lixiviado a un rango de 5.5 a 6.5, lo que a su vez causa la disolución de otros orgánicos e inorgánicos. Como resultado, se tiene un lixiviado muy agresivo químicamente y con una alta conductancia específica.

Basándose en la tasa de generación acelerada de dióxido de carbono que se tiene en esta fase, se ha determinado que esta última fase dura alrededor de 11 días bajo condiciones saturadas.

2.2.3.3. DESCOMPOSICIÓN ANAERÓBICA METANOGÉNICA

En esta etapa, bacterias anaeróbicas metanogénicas son dominantes, debido a la inexistencia de oxígeno y a que el potencial redox es reducido. Estos organismos trabajan lentamente pero muy eficientemente en la producción de dióxido de carbono, metano y agua, junto con pequeñas cantidades de calor. Utilizan los productos de la etapa anterior, como son el hidrógeno y el ácido acético para la producción de metano, como en los siguientes balances químicos:



Estas bacterias obtienen su energía de estas reacciones, sin embargo, muy poco material celular es creado. El consumo de ácidos orgánicos aumenta el pH del lixiviado hasta niveles de 7 a 8.

El tiempo para que esta etapa ocurra desde la ubicación de los desechos sólidos puede variar desde seis meses hasta varios años, siendo proporcional a la cantidad de agua y el flujo que se tenga dentro del relleno.

Para la óptima proliferación de bacterias metanogénicas se requiere un pH entre 6.7 a 7.5, y una temperatura de entre 30 a 35°C para bacteria mesófilas, y para bacterias termófilas de 45°C. Por esta razón es más conveniente trabajar en el rango mesófilo. En cuanto a la composición de los residuos sólidos, conviene una relación carbono-nitrógeno de 16 a 1.

Las reacciones antes mencionadas de producción de metano y dióxido de carbono, junto con la degradación de compuestos iniciales como carbohidratos y ácido esteárico son reacciones que cambian de estado a los compuestos, por lo que se tienen un incremento en volúmenes y por lo tanto de presión. El gas liberado se compone principalmente de 40% a 70% de gas metano, 30% a 50% de dióxido de carbono, y porcentajes inferiores al 5% acumulado de trazas de otros gases. Esta composición del gas generado por la etapa anaeróbica se mantiene prácticamente constante durante toda la vida del relleno sanitario, a pesar de que la cantidad de materia orgánica degradable (y por ende el volumen total de gases producidos) disminuya.

2.2.3.4. EFECTO DE ACUMULACIÓN

Las etapas antes mencionadas ocurren simultáneamente en diferentes ubicaciones dentro del relleno sanitario, conforme este continúa aceptando más desechos. Sin embargo, después de unos pocos años después del cierre técnico de un relleno sanitario el oxígeno se agota y las etapas anaeróbicas dominan. La producción de metano se prolongará hasta que toda la materia orgánica se haya descompuesto. De esta manera, se reducirá la cantidad de metano producido mientras transcurre el tiempo. Por esta razón, además de la necesidad de

controlar la emisión de gases y el tratamiento a lixiviados es muy importante conocer las propiedades y volúmenes de producción de los mismos para determinar el estado de estabilidad bioquímica del relleno sanitario.

2.2.4. GENERACIÓN Y PROPIEDADES DE LIXIVIADOS

Como previamente expuesto, la composición de los líquidos lixiviados varía durante el tiempo dependiendo de las actividades físicas, químicas y biológicas que ocurren en el relleno sanitario. El siguiente gráfico es una representación teórica de lo que idealmente sucedería en cuanto a la concentración química dentro del lixiviado:

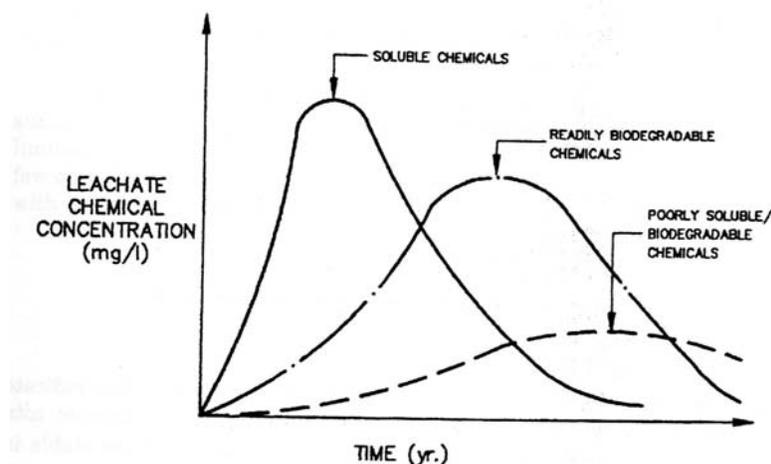


Fig. 4.5 Idealized chemical production curves.

Figura 2: Concentración química del lixiviado en el tiempo
Fuente: McBean (1995)

Dependiendo de la cantidad de lluvia presente en el sitio, se presentan variaciones en las cantidades de producción de líquidos lixiviados.

La percolación a través del material de cobertura genera lixiviado de dos maneras. Primero, se tiene el arrastre y dilución de materia debido a la infiltración a través del material de cobertura. El agua que ingresa estimula y permite que ocurran las reacciones antes mencionadas. Segundo, el rechazo a disponerse se encuentra compuesto de un importante contenido de materia en estado líquido, especialmente en el caso de los desechos orgánicos.

En los primeros 4 o 5 años de un relleno sanitario, el lixiviado usualmente proviene de la descomposición de compuestos fácilmente biodegradables de la materia orgánica, como la celulosa, y de orgánicos disueltos simples, como los ácidos orgánicos. Debido a la presencia de ácidos grasos volátiles, el lixiviado joven se caracteriza por un pH ácido de 6 a 7, y aún más bajo en rellenos con poco ingreso de líquidos. A continuación se presenta una comparación de los valores típicos de diferentes concentraciones en un lixiviado a temprana edad con valores típicos de concentraciones en aguas residuales domésticas y en aguas subterráneas:

| Parameter | Leachate Concentration (mg/L) | Typical Sewage Concentration (mg/L) | Typical Groundwater Concentration (mg/L) |
|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| COD | 20,000–40,000 | 350 | 20 |
| BOD ₅ | 10,000–20,000 | 250 | 0 |
| TOC | 9,000–15,000 | 100 | 5 |
| Volatile fatty acids (as acetic) | 9,000–25,000 | 50 | 0 |
| NH ₃ -N | 1,000–2,000 | 15 | 0 |
| Org-N | 500–1,000 | 10 | 0 |
| NO ₃ -N | 0 | 0 | 5 |

Tabla 1: Comparativo de concentraciones
Fuente: McBean (1995)

Debe recalarse que estos valores dependerán mucho de la composición de los residuos. En Ecuador, debido a la alta cantidad de contenido orgánico, estos valores serán diferentes, ya que este factor aumentaría dichos valores. Si se tiene una separación de residuos orgánicos antes de la colocación en sitio, esos valores también se verán afectados.

Después de este tiempo, las propiedades del lixiviado cambian. Debido a que los orgánicos fácilmente biodegradables se consumieron casi en su totalidad y se comienza con generación de gases, el pH aumenta a entre 7 y 8. Se tiene todavía una concentración de materia orgánica poco degradable.

Los niveles de nitrógeno sirven como un muy buen indicador para determinar la edad del lixiviado y la etapa en la que se encuentra. Como se perfila en la tabla anterior, el nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_3\text{—N}$) y nitrógeno orgánico (Org—N) se generan debido a la descomposición de orgánicos y sus concentraciones se mantienen constantes en la etapa aeróbica, mientras que el nitrógeno en nitratos ($\text{NO}_3\text{—N}$) es consumido por la etapa anaeróbica.

2.2.5. GENERACIÓN Y PROPIEDADES DE GASES

Como se indicó anteriormente, la generación de gases dependerá de varios factores, incluyendo la humedad y densidad del relleno, oxigenación, contenido nutricional, población bacteriana, nivel de pH, flujo de lixiviado, composición y edad del rechazo. Por lo tanto, conviene caracterizar la cantidad y tasa de generación de lixiviado en base a las etapas de procesos físico, químico y biológicos antes perfilados.

Durante la fase aeróbica, la disponibilidad de oxígeno es alta, pero es consumido rápidamente y debido al proceso constructivo y de colocación sucesiva de nuevas celdas y material de cobertura su disponibilidad se reduce en unos cuantos días.

Debido a la fermentación ácida de la etapa aeróbica, se tiene una generación acelerada de dióxido de carbono durante la fase anóxica no metanogénica. Una pequeña cantidad de hidrógeno gaseoso también es producido. La tasa de generación de CO_2 hasta niveles de 70% del volumen permite determinar la duración de 11 días bajo condiciones saturadas.

Durante la fase aeróbica metanogénica, se tiene un incremento de la tasa de producción de metano hasta llegar alrededor de 50% del volumen del gas generado. La duración de esta etapa dependerá directamente del nivel de humedad del rechazo, variando desde 3 meses en condiciones húmedas hasta nunca completarse si la humedad es lo suficientemente baja. Después la generación de metano se mantiene estable entre el 40% a 70% del volumen. Dicha estabilización se da debido al consumo de todos los orgánicos, pero

orgánicos poco biodegradables continuarán produciendo metano, a pesar de que el volumen total de gases generados sea considerablemente menor.

El siguiente gráfico muestra la composición por volumen del gas generado durante el tiempo y las etapas antes descritas:

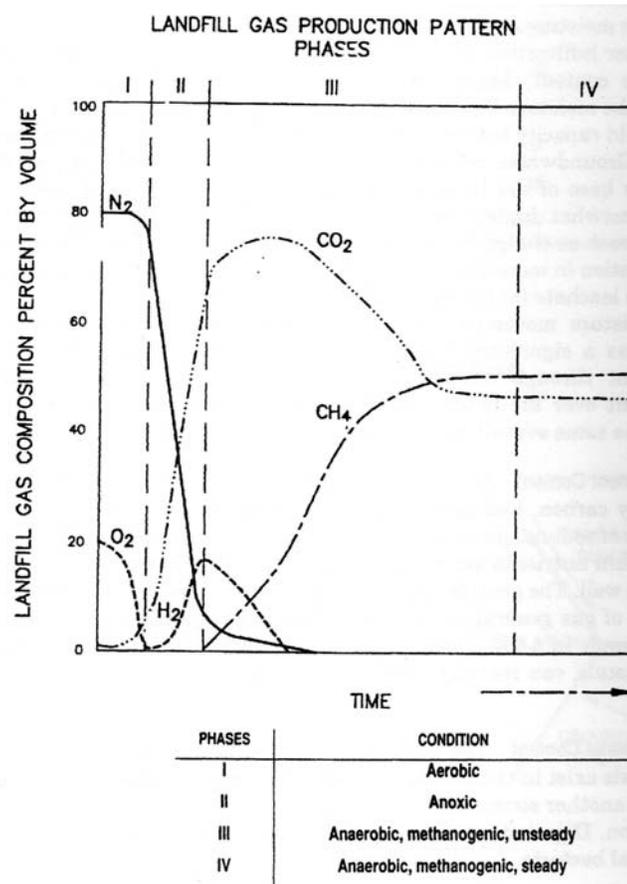


Figura 3: Composición de gases en el tiempo
Fuente: McBean (1995)

2.2.6. COMPONENTES BÁSICOS DE UN RELLENO SANITARIO

Un relleno sanitario debe contener las siguientes obras civiles para su correcto funcionamiento.

2.2.6.1. SISTEMA VIAL

Se debe diferenciar varios tipos de vías que requiere un relleno sanitario, fundamentalmente diferenciados por el tiempo de funcionamiento que estos tendrán. Collazos (2003) hace varias recomendaciones prácticas para la construcción y configuración geométrica de estas vías, las cuales se toman en cuenta a continuación:

Vías principales: Conectan al relleno sanitario con la red vial local. Funcionan permanentemente durante toda la vida del proyecto, e incluso después del cierre técnico del relleno sanitario. Se ubican en su totalidad sobre el terreno local, es decir, no se encuentran sobre ninguna celda de desechos. Esta vía debe ser construida bajo los mismos estándares que las vías locales, y no debe tener una pendiente longitudinal mayor al 8% o hasta 10% en tramos inferiores a los 150 m. Las curvas no deben tener radios inferiores de 50 metros y en condiciones topográficas complicadas hasta 30 metros. El ancho de calzada puede ser de 6 metros.

Vías secundarias: Son vías que se circundan perimetralmente al relleno, al igual que acceden a los diferentes niveles del relleno. Generalmente se encuentran parcialmente sobre el terreno natural, y parte sobre celdas de basura. Se debe contar con pendientes longitudinales inferiores al 6% y una subbase granular de 25 centímetros de alto como mínimo para evitar la acumulación de material arcilloso o de basura en las ruedas del equipo y por consiguiente el deslizamiento de la maquinaria. El diseño de curvas es similar al de una vía principal. Se recomienda un ancho de calzada de 10,50 metros.

Vías temporales: Se refieren a las vías construidas temporalmente para el acceso desde las vías secundarias hacia el frente de la celda diaria. Las pendientes longitudinales deben ser inferiores al 3% debido a que la mayor parte de este tipo de vías se construirá sobre celdas anteriores. Una subbase granular de 25 centímetros de espesor es necesaria, y un ancho igual que una vía secundaria es práctico.

Sin embargo, estas tan solo son guías las cuales deberán ser adaptadas a la topografía del terreno y las necesidades de la maquinaria operante.

2.2.6.2. PLAYA DE DESCARGUE

Se refiere al sitio en donde el camión de basura realiza las maniobras para realizar la descarga de los desechos. Ingresa y gira 180 grados frente a la celda diaria y descarga el material, a esta zona de maniobra se la conoce como playa de descargue. Es un espacio amplio para maniobrar que se encuentra entre la vía de acceso y el frente de trabajo. Para rellenos sanitarios que manejan poco volumen de desechos y por ende pocos viajes diarios de camiones, es un área igual al círculo de diámetro igual a dos camiones.

Es importante mantener una pendiente mínima (2%) desde el frente de trabajo hacia afuera para evitar que el agua de lluvia se estanque.

2.2.6.3. IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL

Existen varios aspectos de la preparación de la superficie previa la ubicación del material desechado. Además de cumplir los criterios de selección de sitio en donde entre otros factores también se intenta garantizar la integridad del relleno sanitario, es importante preparar al sitio para la aceptación de desechos sólidos.

Existe una variedad de criterios y opiniones respecto a la impermeabilización que debe recibir un sitio, debiéndose regir a las diferentes leyes y regulaciones que cada país establece. El objetivo final es limitar la percolación de los lixiviados generados por la acción de descomposición y biodegradación del material desechado combinado con la precipitación de la zona. Es importante limitar la cantidad de lixiviados que encuentran el camino hacia el terreno natural y aún más significativo que estos no encuentren su camino hacia fuentes de agua superficiales y subterráneas. Más tarde se hablará sobre la importancia de contener a los lixiviados y drenarlos hacia una planta de tratamiento.

Se puede implementar para esta capa arcillas con permeabilidades inferiores a los 10^{-7} cm/s, geomembranas o incluso asfalto, o una combinación de las anteriores. Se debe realizar un estudio sobre la cantidad de lixiviados generados

para calcular la presión de poros que deberá ser evacuada por un sistema de drenaje que desemboca en una capa adicional de drenaje sobre la capa de impermeabilización que últimamente dirigirá los líquidos percolados hacia una planta de tratamiento o posible recirculación.

No existen especificaciones mínimas en el país que regulen dichos sistemas. Adicionalmente, el criterio sobre estos sistemas es muy diverso. La siguiente tabla presentada por Bouazza y Van Impe (1998), presenta algunos sistemas utilizados en algunos países, tanto como recomendaciones como especificaciones mínimas:

| País | Sistema de impermeabilización utilizado | Tipo de relleno sanitario |
|-----------|---|---|
| Australia | 0.9 m arcilla compactada | -- |
| | 0.9 m arcilla compactada + geomembrana | -- |
| Austria | 0.6 m arcilla compactada + geomembrana + geotextil de protección | Residuos municipales y peligrosos pre-tratados |
| | 0.8 m a 1.0 m capa mineral doble + geomembrana con geotextil (dren geosintético entre capas minerales) | Residuos peligrosos con alto potencial tóxico |
| | Multicapa: 3 capas minerales de 1.8 m, 1.2 m y 0.8 m, separadas por dren geosintético + geomembrana con geotextil | Residuos peligrosos con alto potencial tóxico sobre acuíferos |
| Bélgica | 1.0 m arcilla compactada + geomembrana con geotextil | Residuos domésticos y peligrosos |
| Europa | 0.75 m arcilla compactada + geomembrana con capa de protección | Residuos domésticos inertes |
| | 3.0 m arcilla compactada + geomembrana con capa de protección | Residuos peligrosos |
| Francia | 5.0 m arcilla local + geomembrana | Residuos industriales |
| | 5.0 m capa mineral, no especificada | Residuos municipales y comerciales |
| Alemania | 0.5 m arcilla compactada | Residuos domésticos no peligrosos |
| | 0.75 m arcilla compactada + geomembrana con capa de protección mas barrera natural o 3.0 m de arcilla/limo compactada | Residuos domésticos peligrosos |
| | 1.5 m arcilla compactada + geomembrana con capa de protección mas barrera natural o 3.0 m de arcilla/limo compactada | Residuos peligrosos |
| Italia | 1.0 m arcilla compactada + geomembrana o 2.0 m arcilla compactada + capa de protección + drenaje | Residuos municipales, comerciales e industriales |

| | | |
|----------------------|---|---|
| Portugal | 1.0 m arcilla compactada + geomembrana + capa de protección | Residuos domésticos y peligrosos |
| Swiza | 0.8 m arcilla compactada o 0.5 m arcilla compactada + geomembrana, o geotextil o asfalto | Residuos generales |
| Turquía | 0.6 m arcilla compactada | Residuos domésticos y residuos no-peligrosos industriales |
| Reino Unido | 1.0 m arcilla compactada | Residuos generales |
| Estados Unidos (EPA) | 0.6 m arcilla compactada + geomembrana | Residuos domésticos |
| | Sistema compuesto: 0.9 m arcilla compactada + geomembrana separadas por dren geosintético | Residuos peligrosos |

Tabla 2: Sistemas de impermeabilización recomendados o normados en diversos países
Fuente: Bouazza y Van Impe (1998).

Mayores detalles sobre el diseño y configuraciones, combinaciones y características de las geomembranas y sistemas combinados de impermeabilización se presentarán posteriormente, en el Capítulo 2.3.4.

2.2.6.4. CELDA DIARIA

Es la unidad de basura que se procesa diariamente. Este volumen generalmente tiene una pendiente de 3H a 1V, pero esta deberá ser modificada de acuerdo a la compactación que se tenga de la basura y la composición de la misma para garantizar la estabilidad de la celda. El proceso de compactación lo realiza un buldozer o un equipo equivalente, regando los desechos en capas de hasta 25 centímetros sobre la anterior celda diaria, moviéndose de abajo hacia arriba para no desestabilizar el talud. El operador repite esta operación (como mínimo 5 pasadas) hasta que las basuras o desechos hayan sido acomodados, y la superficie no se deforme después del paso del tractor, y hasta alcanzar el nivel de compactación para el cual se diseñó el relleno sanitario. La determinación de las dimensiones de la celda diaria típica deberá ser función de varios parámetros, incluyendo: Volumen y composición de la basura recibida, nivel de compactación al que se desea llegar (densidad final), el equipo que se utilizará, la secuencia de

operación del relleno sanitario, la configuración del sitio designado para el relleno, y la disponibilidad de material de cobertura.

Es recomendable que el frente de trabajo, por métodos prácticos, sea del ancho igual al de la cuchilla de la maquinaria utilizada, o múltiplos de la misma (generalmente 5 metros).

2.2.6.5. COBERTURA INTERMEDIA DIARIA

Se refiere a la cobertura que recibe la celda diaria al finalizar la jornada de trabajo de descarga y compactación de los desechos. Es muy importante por varias razones. Primero, no se debe dejar a la intemperie los desechos recién ubicados para proteger de la lluvia y que esta desestabilice el talud, y además genere mayores cantidades de lixiviados. El material de cobertura debe generar una pendiente uniforme que sea suficiente para descargar el agua de lluvia pero cuidando que no se genere erosión por pendientes pronunciadas. De la Torre (2010) recomienda una pendiente en la terraza creada por la celda diaria igual al 2%. Ayuda a limitar la salida no controlada de flujos gaseosos y malos olores. También protege de acciones del viento sobre los desechos, impidiendo que estos vuelen. Este material de cobertura impide el ingreso de roedores, insectos y aves que destrozarían el trabajo realizado y crearían condiciones insalubres. Actúa como barrera protectora ante posibles incendios, además de mejorar la apariencia del relleno. Sin esta cobertura, el relleno sanitario no podría ser catalogado como tal, y se estaría hablando de un vertedero controlado a cielo abierto, el cual sin duda genera grandes impactos ambientales, de salud y seguridad pública.

Se debe prever este material para las actividades diarias del relleno, por lo que dependiendo de la geometría y forma de operación del mismo deberá ser satisfecho ya sea por material extraído debido al movimiento de tierra para preparar el sitio, o importándolo desde fuentes cercanas al proyecto. Sea cual fuere la fuente, es primordial tener el material apilado listo para su utilización.

2.2.6.6. DRENAJE Y MANEJO DE LIXIVIADOS

Debido al proceso de descomposición de los desechos, combinado con el ingreso de agua lluvia, genera un flujo de líquido que por gravedad irá hacia el fondo del relleno, en donde debido a la impermeabilización inicial instalada, deberá contar con un sistema de recolección para evitar el aumento de presión de poros dentro de la masa de basura, lo que causaría inestabilidad, y para permitir el tratamiento adecuado del líquido de lixiviados. Se ubica una capa que actúa como filtro para impedir el paso de materia sólida de tamaños grandes, y permitir la percolación del lixiviado. Se instalan sistemas de captación con tuberías perforadas para recoger el lixiviado y conducirlos a los distintos procesos de depuración y estabilización, y para posible recirculación.

El sistema de drenaje consiste en una capa permeable sobre la impermeabilización inicial, que actúe como filtro y facilite el flujo de lixiviados pero que impida el paso de residuos sólidos. Por tanto, esta capa será conformada por cantos rodados o gravas con una permeabilidad (K) mayor a 10^{-1} cm/s. Se recomienda material granular sin finos de diámetro entre 3 y 7 cm. Dentro de este se ubica el conducto que transporta a los lixiviados, generalmente una tubería de PVC.

Cuando el relleno sanitario exceda los 15 metros de altura, es importante instalar drenes adicionales para evitar la acumulación de presión de poros, o un modelado hidráulico es recomendable para determinar la migración de los lixiviados y gases.

El dimensionamiento de los drenes se calcula en función de la cantidad de lixiviado producido, por lo que para su cálculo se utiliza el método Suizo basado en la siguiente fórmula (Jaramillo 2002):

$$Q = P \cdot A \cdot K$$

Donde:

P = Precipitación media anual, transformada a unidades de m/s

A = Área requerida para el relleno en m^2

K = Coeficiente del grado de compactación, que varía entre 0,50 a 0,25 para rellenos compactados con peso específico menor a $0,7 T/m^3$.

Para dimensionar el sistema de drenaje, se puede basar en diseño en la ecuación presentada por Akgün (1997):

$$Q = T \cdot i \cdot B$$

Donde:

Q = Tasa de flujo a través del drenaje (m^3/s)

i = gradiente del sistema

B = ancho del carril frente del flujo (m)

T = Transmisividad de la capa de drenaje (m^2/s)

Este último factor se lo determina de la siguiente manera:

$$T = k \cdot t$$

Donde:

k = conductividad hidráulica de la capa de drenaje (m/s)

t = alto de la capa de drenaje (m)

Otro sistema de drenaje necesario es el de canales de escorrentía. Es importante construir cunetas de coronación que impidan el ingreso adicional de un volumen de agua dentro del relleno, ya que incrementaría el volumen de lixiviados a tratar, y que impida la destrucción del talud (si lo hubiere).

En el caso de la utilización de lechos de contacto, se procede a diseñarlos y a estimar su remoción de carga orgánica de la siguiente manera, en base a las ecuaciones del National Research Council (Valencia, 1976; Armada y Fuerza Aérea USA, 1988):

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.443 \cdot \sqrt{\frac{W}{V \cdot F}}}$$

De existir una segunda etapa (filtros de dos etapas):

$$E_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.443}{1 - E_1} \cdot \sqrt{\frac{W'}{V \cdot F}}}$$

Donde:

E_1 = % de eficiencia de remoción de DBO en el filtro

E_2 = % de eficiencia de remoción de DBO en el segundo filtro de existir

W = Carga orgánica aplicada a la primera etapa sin recirculación ($\text{kg}_{\text{DBO}}/\text{día}$)

W' = Carga orgánica aplicada a la segunda etapa sin recirculación ($\text{kg}_{\text{DBO}}/\text{día}$)

V = Volumen del filtro en cada etapa (m^3)

F = Factor de recirculación: $F = \frac{1 + R}{(1 + 0.1R)^2}$

R = Caudal recirculado/caudal del efluente

Para el cálculo de la eficiencia del medio de contacto en el filtro de flujo ascendente, se aplica las siguientes ecuaciones de remoción de DBO, de la misma bibliografía antes citada:

$$\frac{Se}{Si} = e^{-K_T \cdot V \cdot As / Q}$$

$$K_T = K_{25} \times \theta^{(T-25)}$$

Donde:

Se = DBO del efluente

Si = DBO del afluente

K_T = Velocidad de eliminación observada a T ($\text{m}/\text{día}$)

A_s = Área específica del medio (m^2/m^3)

Q = caudal a tratar (m^3/d)

V = Volumen del lecho (m^3)

K_{25} = Velocidad de eliminación observada a $25^\circ C$ (0.05 m/día)

θ = Constante de temperatura (1.08)

T = Temperatura mínima de la zona ($^\circ C$)

Y el tiempo de detención en el filtro se lo calcula de la siguiente manera:

$$T_D = \frac{V \cdot n}{Q}$$

Donde:

T_D = Tiempo de detención en el filtro (días)

V = Volumen del lecho (m^3)

n = porosidad del medio de contacto

Q = caudal a tratar (m^3/d)

2.2.6.7. TRATAMIENTO DE GASES

Los mismos drenes antes instalados servirán para aliviar la presión debido a la acumulación de gases. Desde este sistema de dren, es necesario prolongarlo verticalmente hasta llegar hacia la superficie del relleno, en donde se realizará un sistema de captación para utilización como combustible y transformarlo en energía, o simplemente la instalación de mecheros para incinerarlos y evitar la liberación de metano al medioambiente. Dichos mecheros deberán permanecer encendidos indefinidamente hasta que el proceso de estabilización del relleno se haya completado, es decir, por más de 30 años. Debido a que niveles inferiores de metano se producirán después de varios años, se podrá diseñar para satisfacer esta necesidad decreciente de mecheros.

Cabe recalcar que existen varias alternativas para el tratamiento y recolección de gases generados, dependiendo del presupuesto de operación y construcción, geometría del sitio, y metodología de operación del sitio. En especial, se diferencian dos tipos de acciones que se pueden tomar en un relleno sanitario respecto a gases: drenaje pasivo o drenaje activo. El primero se refiere a sistemas en donde se permite al gas evacuar por sus propios medios, sea este con la interferencia de sistemas de chimeneas u orificios o no. El segundo se refiere a la utilización de sopladores con el fin de acelerar la extracción de gas. Factores que afectan a la cantidad de gas que se puede extraer se presentan en la siguiente tabla:

| Porcentaje de gas que se puede captar | Tipo de relleno |
|--|---|
| 0% | Relleno sin ningún sistema de drenaje de gas |
| 10% - 20% | Relleno con drenaje puntual pasivo (chimeneas u orificios), mal compactado y sin cobertura suficiente |
| 25% - 50% | Relleno con drenaje activo (soplador), mal compactado y sin cobertura suficiente |
| 30% - 60% | Relleno con drenaje pasivo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente |
| 40% - 70% | Relleno con drenaje activo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente |
| 70% - 100% | Relleno cerrado con taludes y capa final impermeable y bien compactada, drenaje pasivo o activo |

Tabla 3: Porcentaje de captación de gas por cada sistema de captación.

Fuente: Röben, 2002

Se debe tomar en cuenta que los efectos de no evacuar los gases pueden producir problemas serios debido a acumulación de presión de gases que, en el caso del metano y otros, son muy inflamables y en caso de combustión pueden producir serios problemas.

2.2.6.8. CAPA FINAL DE COBERTURA Y CIERRE TÉCNICO

Al final de las operaciones del relleno sanitario, es decir cuando su vida útil haya finalizado, es necesario realizar un cierre técnico del relleno para minimizar los impactos que este genera. Principalmente, se debe realizar un cierre del sitio para evitar la erosión del sitio y el ingreso de agua al relleno que genera mayores volúmenes de lixiviados.

El plan de cierre técnico del sitio se lo realizará considerando las condiciones de operación del relleno y climatológicas del sitio, así como eventos acontecidos durante la operación del relleno, tales como: volúmenes de lixiviado, cantidad de precipitación, vientos, derrames pasados, drenaje de aguas lluvias y de lixiviado, entre otros.

De esta manera, se requiere de lo siguiente para la capa final de cobertura:

- Sistema de drenaje, compuesto de cunetas de canalización de aguas lluvias.
- Se ubica una capa de cobertura de baja permeabilidad, ya sea con arcilla (de 10 cm de espesor mínimo), o con geomembrana, dependiendo del grado de impermeabilización que se requiera y el presupuesto con el que se cuente, para evitar el ingreso de agua de escorrentía.
- Para el mismo fin anterior, se debe ubicar cunetas perimetrales para aguas lluvias tal que eviten el ingreso adicional de agua al relleno sanitario.
- Ubicar una capa de 20 cm mínimo como sostén de la vegetación a plantar, la cual deberá ser de tierra negra fértil que permita la replantación de las plantas nativas de la zona.
- Realizar los trabajos de reforestación pertinentes para minimizar el impacto ambiental en el sitio, así como la erosión del material de cobertura del relleno.
- Las chimeneas de manejo de gases deben estar correctamente instaladas, con los mecheros respectivos funcionando.

En cuanto al cierre concierne, es necesario disponer de las instalaciones ya sea reutilizándolas, como en poblaciones rurales para centros de reuniones comunales, o desechándolas y restableciendo la capa vegetal nativa.

2.2.7. OBRAS COMPLEMENTARIAS NECESARIAS

Se requiere de obras adicionales a las antes presentadas que son elementos necesarios para operación y funcionamiento del relleno sanitario:

- Caseta de ingreso y de control
- Báscula de pesaje
- Área de separación (en caso de que el plan de gestión así lo indique)
- Oficinas de administración (en caso de un relleno sanitario de mayor tamaño)
- Cerramiento
- Sistemas de control de plagas

2.2.8. ALTERNATIVAS DE RECUBRIMIENTO E IMPERMEABILIZACIÓN

El material y permeabilidad del diseño de la capa de cobertura final dependerá del diseño que se quiera dar al relleno. Como explicado anteriormente, un relleno sanitario estará sometido a procesos de estabilización por un tiempo prolongado, el cual depende de manera sustancial en el contenido de humedad de dicho relleno. Por lo tanto, se debe decidir cual principio se utilizará para el diseño, siendo los dos extremos los siguientes:

- Una estabilización rápida, con un ingreso y por tanto contenido de humedad mayor, y por tanto un recubrimiento permeable, y bastante cantidad de lixiviado por tratar.
- Una estabilización lenta, enfocada en la clausura inmediata del relleno sanitario una vez este haya cumplido su vida útil, en casos en que se desee tratar la menor cantidad de lixiviados después del cierre del relleno, para lo cual se intentará crear una capa de cobertura muy poco permeable.

Generalmente no resulta práctico invertir en una capa de cobertura muy permeable, debido a la cantidad de lixiviados a tratar y a los costos elevados en los que esto significaría. La necesidad de estabilizar rápido un relleno sanitario no presenta una ventaja clara y representativa. Por esta razón, generalmente se diseña para minimizar el efluente de lixiviados, por lo que se intentará crear una

capa lo suficientemente impermeable, pero no tan estricta como una impermeabilización inicial.

En cuanto a lo que impermeabilización inicial requiere, es necesario prevenir completamente cualquier tipo de infiltración que se pueda dar, en especial cuando se tiene un sitio sensible o en la cercanía a aguas superficiales o subterráneas.

Entre los principales materiales utilizados para este fin, considerando los requisitos de permeabilidad, facilidad de instalación y costos, se tienen los siguientes materiales, o una combinación de los mismos:

- Arcilla compactada: Depende de la disponibilidad del material en la cercanía para estimar su costo y competitividad frente al resto de materiales. Puede alcanzar tasa de permeabilidad a la migración de agua hasta de $K = 1 \times 10^{-7}$ cm/seg. Sin embargo, debido a estar expuesta a cambios de humedad puede fallar y presentar fracturas, y por dificultades constructivas no siempre se puede garantizar una permeabilidad constante o inferior a dicho valor. Por esta razón, su implementación se ve acompañada del uso de geomembranas.
- Capa de geotextil-arcilla (geosynthetic clay liner, GCL): Son capas prefabricadas de geotextil como material resistente a la tensión, con arcillas, usualmente bentonita (tipo de arcilla expansiva) que proveen la permeabilidad baja. Esta tipo de recubrimiento o barrera prefabricado es de unos cuantos milímetros de espesor, y generalmente se fabrican de dos capas de geotextil zurcidas una con la otra, entre las cuales se coloca la arcilla. Diferentes variaciones incluyen el uso de geomallas o de geomembranas, para aumentar las prestaciones del material.
- Membranas sintéticas: Geomembranas, hechas de asfaltos o polímeros, son materiales generalmente plásticos que tienen permeabilidades de orden de $K = 1 \times 10^{-12}$ cm/seg. Presentan una manera liviana, económica y de fácil instalación para derrames secundarios o cualquier actividad de impermeabilización. Tienen buena resistencia a tensión y punzonamiento, y en caso de requerir aumentar estas propiedades se puede combinar con geotextil.

2.2.9. TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS

Existen diferentes tipos de rellenos sanitarios, definidos principalmente por la geometría del mismo y el procedimiento de ubicación de las unidades diarias de

desechos que llegan al sitio. Muchas veces los factores que dictan la geometría a utilizar vienen dados gracias a una necesidad previa, como rellenar ciertos sitios para su uso posterior, o simplemente dictados por la selección del mejor sitio con los criterios presentados anteriormente. Collazos (2003) presenta la siguiente clasificación.

2.2.9.1. TIPO ÁREA

Se refiere a la disposición de las celdas en terrenos con depresiones naturales o artificiales, en donde se rellena dicha depresión con las celdas diarias. En este caso, la basura se encuentra confinada por el terreno natural en sus cuatro lados. Debido a que se depende de la configuración del terreno y la cantidad de residuos a desechar, se puede superar la profundidad de la depresión y distribuir las celdas creando un montículo sobre la superficie del terreno. Se debe remover material desde sitios cercanos o ampliando las dimensiones de la depresión para obtener material de cobertura.

2.2.9.2. TIPO RAMPA

Se lo utiliza en terrenos que presentan inclinaciones aptas y estables para la construcción de un sistema de aterrazamiento que permita la ubicación de celdas diarias. El material de cobertura se lo puede extraer directamente de la generación de un talud estable y el sistema de aterrazamiento. Los desechos se encuentran confinados en uno, dos o tres lados, dependiendo de la configuración del terreno, pero el frente y la superficie requieren cobertura intermedia diaria.

2.2.9.3. TIPO TRINCHERA

Se refiere a la creación de una zanja en la cual se ubicarán los desechos sólidos. Se requiere de la extracción del suelo local para la conformación de la geometría del relleno; dicho suelo extraído servirá como material de cobertura diaria. En este caso, los desechos sólidos quedan confinados por el terreno natural.

2.2.9.4. TIPO COMBINADO ÁREA RAMPA

En terrenos en donde por su extensión se tengan formas variables, la geometría del relleno contará con secciones en rampa, así como del tipo área. El material de cobertura puede ser extraído de la conformación del talúd y los diferentes niveles, así como de la conformación y nivelación de área deprimida del terreno.

2.2.10. SELECCIÓN DEL SITIO

La selección del sitio representa un proceso muy complejo que debe considerar un rango de criterios que permitirán reducir los sitios aptos para el proyecto a una pequeña selección. Adicionalmente a todos los criterios técnicos y de seguridad ambiental y de salud que un sitio debe cumplir, la oposición de las poblaciones aledañas a la creación de un relleno sanitario presenta un serio problema para ejecutar el proyecto. La actitud de la población de que la basura se ubique 'No en mi patio trasero' (NIMBY, por sus siglas en ingles) describe un fenómeno muy común que se da en todas las sociedades. Nadie desea tener un relleno sanitario cerca, y por tanto la fuerza de oposición que la población directamente afectada por el proyecto genera es muy importante.

Para evaluar los posibles sitios para ubicar un relleno sanitario, se deben contar con los siguientes estudios preliminares que permitirán filtrar las opciones:

- Elaboración de mapas temáticos en base a información satelital: Deben contener aspectos importantes como usos del suelo, características del suelo, accidentes geográficos, posibles riesgos, entre otros.
- Identificar criterios de exclusión: Existen una variedad de factores que dependerán de la localidad en donde se planea ubicar el relleno sanitario debido a legislaciones municipales o gubernamentales, y las características generales de la zona y la población a servir, considerando entre los principales factores los siguientes: zonas pobladas y densidad, zonas de riesgos, pendientes excesivas, cuerpos de agua, distancias de transporte, zonas protegidas y reservas naturales, zonas agrícolas, entre otros.

- Mapas de aptitud, con la ayuda de sistemas de información geográfica (GIS), para identificar las posibles zonas considerando los criterios de exclusión antes perfilados.
- Visitas de campo a las áreas identificadas, con el fin de localizar sitios y verificar su factibilidad con representantes de la comunidad a servir.

2.2.10.1. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Factores significativos a considerar pueden clasificarse dentro de los distintos ámbitos de influencia del relleno sanitario, a pesar que se relacionan entre sí, por lo tanto deben ser evaluados conjuntamente, asignando pesos que reflejen su importancia:

- Factores ambientales
- Factores técnicos
- Factores sociales
- Factores económicos

Debido a la variabilidad de condiciones en las que la construcción de un relleno sanitario surge, tanto sociales, políticas, ambientales y económicas, cada factor tendrá diferente peso dentro de distintos proyectos que concentren a diferentes poblaciones y distintas localizaciones geográficas. De esta manera no es posible asignar el mismo peso para factores en la construcción de un relleno sanitario para la ciudad de Quito como lo es para las pequeñas poblaciones de la isla San Cristóbal en el frágil entorno ambiental de Galápagos.

2.2.10.1.1. Factores ambientales

Este grupo de factores representa sin duda una preocupación adicional el momento de considerar el sitio de disposición de cualquier tipo de desecho. En un país con tal biodiversidad y fragilidad ecológica, es muy importante garantizar la integridad del ambiente desde el inicio de la planificación de los procesos de disposición final de residuos. Este criterio se lo debe mantener durante todo el

proceso; garantizando la integridad de los recursos naturales durante las diferentes etapas de funcionamiento del relleno sanitario: construcción, operación y cierre técnico. Se debe tomar en cuenta y minimizar cualquier afectación que cause considerando factores de polución del aire (polvo, emisiones de la quema de hidrocarburos, materia volante), polución de la tierra (migración de lixiviados, disminución de la fertilidad de la tierra circundante), polución del agua (contaminación directa de las fuentes), y polución auditiva (generación de ruido por máquinas o procesos dentro del relleno sanitario)

Los principales factores ambientales a considerar se detallan a continuación:

- Cercanía a recursos hídricos y ubicación del nivel freático: Si no se ha diseñado para que el relleno sanitario funcione bajo un gradiente hidráulico negativo, se debe mantener una distancia mínima tanto a fuentes superficiales como subterráneas para garantizar que los lixiviados no migren a estas fuentes de agua.
- Influencia a flora y fauna: Considerar las diferentes especies animales y vegetales cuyo hábitat se verá afectado por influencia directa de la operación del relleno, como su proceso constructivo.
- Distancia a áreas urbanas: este punto genera cierta contradicción, ya que la cercanía y la lejanía de un sitio no representa una clara ventaja. Si bien por aceptación de la comunidad sobre la construcción de un relleno sanitario está directamente relacionada a la cercanía con la que se tiene al mismo, distancias excesivas causarían costos de transporte extremadamente elevados. Por lo tanto, se debe limitar el área de consideración a una locación lo suficientemente cercana al sitio generador de desechos (factor que se considera en el aspecto económico) y considerar que se tenga una distancia considerable (cumpliendo con las legislaciones locales) desde los centros urbanos y viviendas cercanas.
- Visibilidad del sitio: Se debe considerar que un relleno sanitario no es estéticamente atractivo, por lo que se considera como criterio de selección un sitio que sea menos visible desde la vía principal de acceso.
- Valor cultural y arqueológico: Se debe proteger zonas que posean vestigios o ruinas arqueológicas o de valor cultural.
- Meteorología del sitio: Se debe considerar que las condiciones meteorológicas no interfieran ni causen gastos y dificultades técnicas adicionales.

2.2.10.1.2. Factores técnicos

Es importante considerar la viabilidad del proyecto, ya que situaciones que compliquen su funcionamiento aumentarán costos y tiempo tanto para la operación como para la construcción:

- Disponibilidad de material de cobertura: Es necesario tener material de cobertura para las celdas diarias, y si no se dispone de material es necesario traerlo al sitio.
- Pendientes en el sitio: Es recomendable un sitio que no requiera movimientos de tierra innecesarios. En general para el funcionamiento óptimo de un relleno sanitario, pendientes inferiores al 20% o 25% es considerada apta.
- Facilidad de captar lixiviados: Es importante contar con un sitio en donde la captación y drenaje de lixiviados sea facilitada por la topografía y condiciones del suelo.
- Capacidad del sitio: Convienen sitios que por su topografía tenga una mayor capacidad para aceptar residuos sólidos, y de esta manera prolongar su vida útil.
- Geología e impermeabilidad: Es muy importante considerar que el sitio no presente la posibilidad de fallas geológicas o deslizamientos futuros, y en donde el suelo de soporte sea lo suficientemente firme para aceptar obras de tierra del calibre de la obra. Sobre todo, un suelo con bajas permeabilidades (arcillas, limos arcillosos) contribuyen de manera significativa al la simplificación del diseño y por tanto a la reducción de costos.

2.2.10.1.3. Factores sociales

Todas las obras públicas tienen como fin proveer de un servicio o solucionar un problema que la sociedad esté enfrentando. Por lo tanto, la influencia dentro de la creación de un relleno sanitario debe sin duda considerar los aspectos que se encuentren directamente relacionados con las poblaciones cercanas, así como los efectos indirectos que se puedan generar por la ubicación de un relleno sanitario en el sector. Como explicado anteriormente, se debe seleccionar un sitio que no cause mucha oposición a su creación por poblaciones cercanas. Entre los principales factores a considerar se encuentran:

- Cambios en el uso de suelo: Conviene ubicar zonas en las que se tenga menores áreas que requieran un cambio en el uso del suelo, como por ejemplo áreas de cultivos, pastoreo, o zonas forestales que generen ingresos económicos para la población.
- Viviendas dentro del sitio: Es necesario ubicar zonas en donde se requiera la menor cantidad de expropiaciones.
- Propietarios de terrenos dentro del sitio: Se desea que el número de propietarios de los terrenos sean pocos, para evitar trámites burocráticos y alargar el proceso de adquisición de tierras.
- Consolidación del sector: Se prefiere sitios en donde la consolidación de población sea la mayor.

2.2.10.1.4. Factores económicos

En cuanto a la importancia de la disposición final de los desechos que una sociedad genera no se puede discutir que es una inversión que es más que necesaria. Por lo tanto, el factor económico, en especial en un país en el que este recurso es limitado, presenta una gran importancia, siempre y cuando se cumplan con los estándares requeridos para satisfacer el resto de criterios.

- Costos de utilización del terreno:
- Costos de construcción: Es importante tener un sitio en donde las condiciones para realizar una obra civil de esta naturaleza no requiera un desembolso mayor de dinero, considerando tanto las condiciones físicas del sitio, como meteorológicas, logísticas y de ubicación geográfica.
- Costos de transporte: Se seleccionarán sitios en donde los costos de transporte hacia los sitios urbanos sean menores (sin excluir el criterio ambiental de cercanía a sitios poblados). Como antes mencionado, debe haber un balance de distancia hacia los centros poblados, para que sea factible tanto económicamente como ambientalmente.

Un método similar es el presentado por Collazos (2003), en donde se presenta un ejemplo con los siguientes criterios de evaluación y pesos asignados:

| Criterios de selección | Porcentaje |
|--|-------------------|
| Distancia al centro de producción | 18 |
| Accesibilidad al sitio | 12 |
| Área del sitio | 6 |
| Uso actual del sitio | 1 |
| Pendiente del sitio | 4 |
| Profundidad hasta la roca dura | 6 |
| Posibilidad de material de cobertura | 8 |
| Profundidad de la tabla de agua | 6 |
| Efecto ambiental | 12 |
| Densidad poblacional en el sitio | 5 |
| Permeabilidad | 9 |
| Efecto de la congestión del tráfico vehicular | 1 |
| Impacto del tráfico automotor sobre la comunidad | 2 |
| Rechazo de la comunidad | 10 |
| TOTAL | 100 |

Tabla 4: Criterios ponderados de selección (Collazos, 2003)

Cabe recalcar que cualquier factores de selección son aplicados una vez se haya reducido los sitios preseleccionados utilizando criterios de exclusión, rigiéndose lo establecido por las disposiciones de la Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS) y regulaciones adicionales locales.

2.3. GEOMEMBRANAS

2.3.1. INFORMACIÓN GENERAL

La necesidad de impermeabilizar superficies y la contención de líquidos ha existido desde los inicios de la civilización como una forma de transportar y contener agua principalmente. El uso de materiales poco permeables como la arcilla compactada y más recientemente el concreto han sido las soluciones más viables a esta problemática. Sin embargo, estos materiales presentan desventajas en su implementación, ya que los suelos finos compactados son un producto cuyo precio es muy variable de acuerdo a su disponibilidad pero generalmente es más

económico que el concreto y presenta una permeabilidad moderada a baja, y el concreto a pesar de brindar una permeabilidad baja (si es dosificado para una porosidad baja) presenta costos muy elevados y su fragilidad lo hace propenso a agrietarse. Estos problemas han impulsado el desarrollo de materiales de menor permeabilidad a un precio competitivo.

El desarrollo de materiales en base de polímeros plásticos y asfaltos ha llevado a la creación de materiales de materiales flexibles, impermeables¹, y resistentes a ataques físicos y químicos. Existe una variedad de materiales de este tipo que presentan diferentes características. Muchas resinas poliméricas llevan el nombre polietileno, sin embargo existen varios métodos para juntar las moléculas de etileno, de las cuales se derivan diferentes características en el material final. Polietilenos de baja densidad (PEBD) se refieren a polietilenos con densidades entre 0.915 a 0.9935 g/cm³, mientras que polietilenos de alta densidad (PEAD) se refieren a polietilenos en el rango de 0.935 a 0.970 g/cm³. Existen una variedad de tipos de geomembranas, siendo las más comunes las siguientes:

| Propiedad | PEAD | PECS | PVC |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| Resistencia al calor | Excelente | Excelente | Regular |
| Resistencia microbiana | Muy buena | Buena | ? |
| Resistencia química | Excelente | Muy buena | Muy buena |
| Resistencia ultravioleta | Excelente | Excelente | Regular |
| Resistencia a punzonamiento | Regular a buena | Regular a buena | Buena |
| Facilidad de instalación | Regular a buena | Buena | Muy buena |
| Costo | Moderado | Alto | Bajo |
| Resistencia a esfuerzos de tensión | Excelente | --- | Muy buena |

Tabla 5: Propiedades generales de geomembranas comunes

PEAD: Polietileno de alta densidad

PECS: Polietileno clorisulfanato

PVC: Cloruro de polivinilo

Fuente: McBean (1995)

Membranas hechas de polietileno de alta densidad (PEAD, o HDPE por sus siglas en inglés) es un material que por su resistencia a la acción química, se puede calificar como el más indicado en aplicaciones de impermeabilización, alcanzando

¹ Este término se refiere a materiales con permeabilidad muy baja, ya que se considera que todos los materiales tienen cierto grado de permeabilidad

mayor durabilidad que otros polímeros cuando se encuentran expuestos a condiciones ambientales y al ataque químico. La principal característica es su baja permeabilidad con valores de 10^{11} a 10^{12} cm/s y su resistencia a acción química. Las resinas de polímeros se combinan plastificantes, negro de humo y aditivos antioxidantes que garantizan una larga duración; incluso en condiciones de exposición a la intemperie.

Igualmente existen membranas con características técnicas especiales; por ejemplo geomembranas de polietileno de alta flexibilidad para el recubrimiento de túneles; de geomembranas texturizadas para desarrollar más fricción con el suelo cuando los taludes a impermeabilizar tienen pendientes importantes; de geomembranas con aditivos especiales para retardar la combustión en aplicaciones donde se requieran materiales de construcción con flamabilidad controlada.

2.3.2. USOS

El principal uso de una geomembrana es como barrera o recubrimiento, por lo que su utilización en rellenos sanitarios y piscinas de tratamiento de lixiviados ha sido tan exitosa. Presentan una muy baja impermeabilidad, al mismo tiempo que presentan facilidad de instalación y de adaptación a cualquier forma presentando un gran beneficio ambiental, con el mínimo de tiempo en su instalación. Los principales campos de aplicación, están relacionados con obras para la protección del medio ambiente, rellenos sanitarios, piscinas para tratamiento de lodos, lagunas de oxidación, recubrimiento de canales, minería, acuicultura y recubrimiento de tanques.

En el estado actual de la tecnología de impermeabilización, se utiliza una amplia gama de productos geosintéticos para maximizar la eficacia del diseño, integridad y comportamiento de la solución, minimizando el tiempo y el costo. A efectos de la protección del medio ambiente, el componente esencial del relleno sanitario es la geomembrana primaria. La lámina primaria es la encargada de confinar los residuos nocivos protegiendo las aguas del subsuelo. Sin embargo, para asegurar el perfecto funcionamiento de un sistema de impermeabilización en un relleno

sanitario, es necesario incorporar algo más que una lámina lisa. Con frecuencia se dan taludes bastante inclinados para incrementar la capacidad del relleno. En algunos casos estos taludes hacen que sea necesario el uso de geomembranas que aumente el ángulo de fricción con el geotextil no tejido. La geomembrana ofrece la contención del Relleno. Para la captación del lixiviado, los geocompuestos ofrecen una alta resistencia química y capacidad de flujo en su plano. El geodren, constituido por una geored con un geotextil no tejido punzonado por agujas unido por ambas caras de la geored, se coloca directamente encima de la lámina primaria. El geotextil inferior permite al conjunto encajarse con la geomembrana para que no se deslice, especialmente en taludes. Las impermeabilizaciones en celdas de rellenos sanitarios son proyectos complejos y costosos. El sistema de geomembrana representa tan solo una pequeña fracción del costo total.

El lixiviado recolectado del relleno se almacena en depósitos impermeabilizados para su posterior tratamiento. La lámina de estos depósitos esta generalmente expuesta a la intemperie. Los sistemas de impermeabilización en polietileno de alta densidad presentan el más alto grado de durabilidad bajo las condiciones atmosféricas más extremas, tales como radiación solar, o congelamiento.

2.3.3. USO CON GEOTEXILES U OTROS GEOSÍNTÉTICOS

La combinación de geomembranas con diferentes tipos de geotextiles nace de la necesidad de mejorar las propiedades de dicho material, principalmente para situaciones con altos esfuerzos de tensión, protección a la punción, y mejorar la interface de corte entre los materiales.

2.3.4. IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL EN RELLENOS SANITARIOS

El diseño de impermeabilización se basa en el transporte de lixiviados a través del relleno, y hacia las fuentes de recolección. La elección del tipo y espesor de geomembrana dependerá de:

- Tamaño y geometría de la aplicación
- La situación geográfica de la instalación y la naturaleza de la obra.

- Tipo de subbase.
- Sistema de anclaje adoptado.
- Rugosidad de la subbase.
- Altura de la columna del líquido a ser contenido.
- Geometría de las cuestas.
- La combinación con otros geosintéticos.
- Sistema de drenaje.

Es recomendable aplicar un diseño en base a desempeño de la impermeabilización. En el caso de geomembranas, es común (y hasta inevitable) contar con filtraciones por agujeros en la membrana, debido a defectos en las juntas entre paneles, perforaciones por materiales cortopunzantes utilizados en la instalación o por materiales debajo de la geomembrana, fuerzas de tensión por el peso aplicado, entre otras. También existe difusión molecular a través de la geomembrana, pero generalmente este factor se considera despreciable. Giroud y Bonaparte (1989) concluyen que hasta 17 huecos/ha pueden estar presentes en instalaciones de geomembranas si no existe control de calidad, valor que puede reducirse dependiendo del grado de control de instalación del sistema y operación del relleno.

Para el diseño de capas de impermeabilización con geomembrana o sistemas compuestos (geomembrana y arcilla), Katsumi et. al. (2001) presentan un procedimiento basado en el desempeño de dichas capas y la tasa de infiltración de líquidos lixivados, las cuales se puede evaluar con valores permisibles. Dichas ecuaciones se han basado en procedimientos empíricos y en las ecuaciones básicas de Darcy y Bernoulli que describen el flujo de un líquido a través de un medio poroso. Es importante recalcar que la aparición de defectos en las geomembranas es inevitable. Entre las causas de defectos encontrados se resumen lo siguientes (Giroud y Bonaparte, 1989a):

- Unión defectiva o discontinua debido a errores en fabricación o instalación causados por humedad excesiva, presencia de polvo, temperatura del termosellado no adecuada, o mano de obra no calificada.
- Fallas en uniones causadas por excesos de tensión durante la colocación de capas de drenaje y basura, así como de movimiento de material.

- Daños a la geomembrana debidos a la construcción y operación del sitio y el uso de maquinaria pesada sobre la misma.
- Punzonamiento de la geomembrana por piedras filosas en las capas de drenaje o soporte cuando existen esfuerzos compresivos sobre estas capas debidos a la operación del relleno.
- Crecimiento de fallas debido a la carga continua sobre las capas de impermeabilización.
- Conexiones no apropiadas entre geomembranas y tuberías, o sistemas de anclaje.

Existe una amplia gama de bibliografía que describe diferentes fórmulas y procedimientos para evaluar fugas en sistemas de impermeabilización con geomembranas y arcilla (Katsumi et al., 2001; Giroud y Bonaparte, 1989a; Giroud y Bonaparte, 1989b; Foose et. al., 2001; Walton et. al., 1997; Akgün, 1997, Giroud et. al. 1992). Sin embargo, se concluye que la caracterización del flujo a través de un defecto en la geomembrana y a través de capas compactadas de arcilla es bastante complicada de estimar ya depende de una variedad de factores, incluyendo pero no limitando a los siguientes:

- Tamaño del agujero en la geomembrana
- Ancho de la capa de arcilla
- Condiciones climatológicas del sitio
- Presión hidráulica aplicada sobre el sistema de impermeabilización
- Tensión ocasionadas en la geomembrana por la carga aplicada
- Contacto entre geomembrana y suelo natural o capa de arcilla
- Calidad de instalación y fabricación
- Control de fallas
- Control en operación del relleno
- Geometría del sitio

Después de evaluar cada método propuesto por los autores citados anteriormente, se concluye que los métodos más aceptables y congruentes (así como aceptados por otros autores) entre ellos son los siguientes.

La tasa de infiltración, Q , depende directamente del tamaño y cantidad de agujeros presentes en la geomembrana. Katsumi (2001) concluye que se pueden presentar hasta 17 agujeros por hectárea bajo condiciones limitadas de control de instalación de la geomembrana y operación del relleno sanitario. Giroud y Bonaparte (1989a) presentan la siguiente ecuación correspondiente a la tasa de infiltración (en m^3/s) a través de un defecto circular en la geomembrana, cuando esta se utiliza como única capa impermeables (es decir, se encuentra entre dos medios infinitamente permeables):

$$Q = C_B a \sqrt{2gh_w}$$

Donde:

Q = Tasa de infiltración a través del defecto (m^3/s)

C_B = coeficiente adimensional, 0.6 para la mayoría de agujeros

a = área del defecto en la geomembrana (m^2)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

h_w = cabeza de presión del líquido sobre la geomembrana (m)

En el caso de sistemas compuestos de geomembrana sobre arcilla, se combinan las ventajas de ambos materiales, en donde la geomembrana reduce el área sobre la cual se producen fugas, mientras que la capa de arcilla subyacente minimiza el flujo a través de los defectos existentes en la geomembrana, reduciendo así efectivamente los volúmenes de lixiviados que fugan a través de estos sistemas. Sin embargo, dicho sistema compuesto depende del contacto entre las dos capas.

Cuando se tiene contacto perfecto, la ecuaciones descritas por Giroud et. al. (1992), describen el funcionamiento en los siguientes casos:

Para buen contacto entre la geomembrana y el suelo de baja permeabilidad:

$$Q = 0.21 \cdot i_{avg} \cdot a^{0.1} \cdot h_w^{0.9} \cdot k_s^{0.74}$$

Para contacto deficiente:

$$Q = 1.15 \cdot i_{avg} \cdot a^{0.1} \cdot h_w^{0.9} \cdot k_s^{0.74}$$

Donde:

Q = Tasa de infiltración a través del defecto (m^3/s)

i_{avg} = gradiente hidráulico promedio en el suelo de baja permeabilidad

a = área del defecto en la geomembrana (m^2)

h_w = cabeza de presión del líquido sobre la geomembrana (m)

k_s = conductividad hidráulica del suelo de baja permeabilidad (m/s)

Para obtener i_{avg} , tenemos:

$$i_{avg} = 1 + h_w / [2H_s \ln(R / R_0)]$$

Donde:

i_{avg} = gradiente hidráulico promedio en el suelo de baja permeabilidad

h_w = cabeza de presión del líquido sobre la geomembrana (m)

H_s = profundidad de la capa del suelo de baja permeabilidad (m)

R_0 = Radio del defecto en la geomembrana (m)

R = Radio del área sobre el suelo de baja permeabilidad que se humedece por efecto de la fuga en la geomembrana (m)

Para determinar R , que existe debido a que el flujo del líquido a través del suelo bajo la geomembrana no es completamente perpendicular, se lo calcula de la siguiente manera:

Para buen contacto:

$$R = 0.26 \cdot a^{0.05} \cdot h_w^{0.45} \cdot k_s^{-0.13}$$

Para contacto deficiente:

$$R = 0.61 \cdot a^{0.05} \cdot h_w^{0.45} \cdot k_s^{-0.13}$$

Donde:

R = Radio del área sobre el suelo de baja permeabilidad que se humedece por efecto de la fuga en la geomembrana (m)

a = área del defecto en la geomembrana (m^2)

h_w = cabeza de presión del líquido sobre la geomembrana (m)

k_s = conductividad hidráulica del suelo de baja permeabilidad (m/s)

Las ecuaciones previas son aplicables para defectos circulares. En caso de defectos rectangulares o alargados, referirse a Giroud et al. (1992).

Akgün (1997) presenta un método para el diseño y evaluación del desempeño basados en la tasa de recolección del lixiviado por la capa de drenaje comparada con la tasa de filtración hacia el suelo por fugas. Este método se basa en la aplicación de una razón de filtración (LR), la cual representa la razón entre el caudal de lixiviados drenados sobre el caudal de lixiviados que filtran el sistema de impermeabilización. De esta manera, se puede evaluar el sistema de impermeabilización y mantener esta razón constante. En caso de que este valor se reduzca durante la vida del relleno sanitario, este indicaría la presencia de fallas en el sistema de impermeabilización.

Adicionalmente, se debe preparar la superficie para la instalación de la geomembrana. A continuación, se presenta una serie de recomendaciones (Berena et. al, 2009):

- El suelo debe estar correctamente compactado a un mínimo de 95% de la Prueba Estándar de Proctor, o 90% de la Prueba Modificada de Proctor. Dicha compactación debe ser realizada al contenido de agua óptimo que garantice la permeabilidad y peso específico seco requeridos.
- Las pendientes a cubrir deben ser las apropiadas para estabilidad del talud.
- El suelo debe estar libre de orgánicos, vegetación, escombros y cualquier material ajeno al designado
- Objetos punzantes, vacíos, áreas mal compactadas o cualquier objeto que presenten un riesgo a la geomembrana deben ser removidos.
- Piedras de diámetro mayor a 1 cm deben ser removidos, o se debe aplicar un geotextil de protección.
- La superficie debe ser firme y libre de cambios abruptos de pendiente.
- El nivel freático debe ser establecido y se debe proveer de un adecuado sistema de drenaje en el caso que este supere el nivel de la instalación.
- Para la instalación, el sitio debe estar libre de agua o lodo.
- La superficie debe estar protegida de disecación e inundación.

- La geomembrana debe estar en contacto continuo con el suelo, es decir que no deben existir vacíos.

En muchas ocasiones se requiere de la implementación de un geotextil de protección para evitar punzonamiento en la geomembrana. De ser así, se puede aplicar el estudio de Koerner et. al. (1996) para escoger un geotextil apropiado:

Para geomembranas de HDPE, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$FS = \frac{P_{adm}}{P_{req}}$$

Donde:

FS = Factor de seguridad contra el punzonamiento de la geomembrana

P_{adm} = Presión admisible (KPa)

P_{req} = Presión real debida al contenido del relleno (KPa)

$$P_{adm} = \left(450 \frac{M}{H^2} \right) \left(\frac{1}{FM_S \cdot FM_{DR} \cdot FM_A} \right) \left(\frac{1}{FR_{FL} \cdot FR_{DQB}} \right)$$

Donde:

P_{adm} = Presión admisible (KPa)

M = Masa por unidad de área (g/m^2)

H = Altura Efectiva de la Protuberancia (mm)

FM_S = Factor de Reducción por la forma de la protuberancia

FM_{DR} = Factor de Modificación por Densidad del Relleno

FM_A = Factor de Modificación por efecto de Arco en Sólidos

FR_{FL} = Factor de Reducción por fluencia del material a largo plazo

FR_{DQB} = Factor de Reducción por degradación química y biológica a largo plazo

Adicionalmente se debe cumplir con la siguiente condición:

$$P_{adm} = \left(450 \frac{M}{H^2} \right) \geq 50kPA$$

Para descripción de valores recomendados de los factores de reducción y modificación, referirse al estudio citado.

2.4. MANEJO DE DESECHOS SÓLIDOS EN EL ECUADOR

2.4.1. SITUACIÓN ACTUAL

En el Ecuador, la falta de financiamiento para este tipo de proyectos ha causado una carencia de infraestructura y de servicios eficientes para el manejo de los residuos sólidos, los mismos que han causado que los índices de cobertura de este servicio básico sean deficientes en cuanto a la recolección y a la disposición final de estos residuos. Según los cálculos realizados en el año 2000 por el MIDUVI, el Ecuador genera 7.423 toneladas diarias de residuos sólidos, de los cuales se recolectan formalmente el 49% y se confinan apropiadamente tan solo el 30%, por lo tanto el 70% restante se lo dispone en quebradas, cuerpos de agua y terrenos baldíos. Adicionalmente, muchos de estos sitios de disposición final no llegan a las especificaciones necesarias para ser considerados como rellenos sanitarios. En cuanto a cobertura de un servicio de recolección, en poblaciones urbanas menos del 50% de la población tiene acceso a este servicio, y en poblaciones rurales es prácticamente inexistente. Los siguientes cuadros relatan con mayor profundidad la situación actual de la basura en el Ecuador:

Eliminación de basura según pobreza: Campo (1999)

| Estrato económico: Sistema de eliminación de basura | Pobres | | No pobres | | Pobres como % del grupo |
|---|-----------|-------|-----------|-------|-------------------------------|
| | Viviendas | % | Viviendas | % | |
| Contratan servicio | 589 | 0,1 | 1.179 | 0,4 | 33,3 |
| Servicio municipal | 47.12 | 8,2 | 92.807 | 28,1 | 33,7 |
| Botan | 273.355 | 47,8 | 98.188 | 29,7 | 73,6 |
| Queman | 247.374 | 43,2 | 137.373 | 41,6 | 64,3 |
| Otro | 3.929 | 0,7 | 704 | 0,2 | 84,8 |
| Total Campo | 572.368 | 100,0 | 330.251 | 100,0 | 63,4 |

Tabla 6: Eliminación de basura según pobreza: Campo (1999)
Fuente: Encuestas de condiciones de vida (ECV)-INEC, 1999.

Eliminación de basura según pobreza: Ciudad (1999)

| Estrato económico: Sistema de eliminación de basura | Pobres | | No pobres | | Pobres como % del grupo |
|---|-----------|-------|-----------|-------|-------------------------------|
| | Viviendas | % | Viviendas | % | |
| Contratan servicio | 2.359 | 0,6 | 14.454 | 1,4 | 14,0 |
| Servicio municipal | 302.984 | 71,1 | 885.766 | 86,2 | 25,5 |
| Botan | 65.233 | 15,3 | 74.326 | 7,2 | 46,7 |
| Queman | 55.318 | 13,0 | 46.261 | 4,5 | 54,5 |
| Otro | 401 | 0,1 | 6.269 | 0,6 | 6,0 |
| Total Ciudad | 426.294 | 100,0 | 1.027.076 | 100,0 | 29,3 |

Tabla 7: Eliminación de basura según pobreza: Ciudad (1999)

Nota: Ciudad se considera a asentamientos de más de 5,000 habitantes.

Fuente: Encuestas de condiciones de vida (ECV)-INEC, 1999.

2.4.2. MARCO LEGAL

Se considera para la selección del sitio y su posterior diseño e implementación del relleno sanitario, las disposiciones de la Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), la misma que en el Anexo IV del Libro IV, dispone:

4.12.4. Todo sitio para la disposición sanitaria de desechos sólidos provenientes del servicio de recolección de desechos sólidos deberá cumplir como mínimo, con los siguientes requisitos para rellenos sanitarios mecanizados:

- El relleno sanitario debe ubicarse a una distancia no menor de 13 Km. de los límites de un aeropuerto o pista de aterrizaje. En el caso de San Cristóbal estas condiciones no se cumplen, y se debe considerar como una excepción, considerando que al relleno sanitario llegarán principalmente residuos de rechazo.
- No debe ubicarse en zonas donde se ocasione daños a los recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas, fuentes termales o medicinales), a la flora, fauna, zonas agrícolas ni a otros elementos del paisaje natural. Tampoco se deben escoger áreas donde se afecten bienes culturales (monumentos históricos, ruinas arqueológicas, etc).
- El relleno sanitario deberá estar ubicado a una distancia mínima de 200 m de la fuente superficial más próxima.

- Para la ubicación del relleno no deben escogerse zonas que presenten fallas geológicas, lugares inestables, cauces de quebradas, zonas propensas a deslaves, a agrietamientos, desprendimientos, inundaciones, etc, que pongan en riesgo la seguridad del personal o la operación del relleno.
- El relleno sanitario no debe ubicarse en áreas incompatibles con el plan de desarrollo urbano de la ciudad. La distancia del relleno a las viviendas más cercanas no podrá ser menor de 500 m. Tampoco se deben utilizar áreas previstas para proyectos de desarrollo regional o nacional (hidroeléctricas, aeropuertos, represas, etc).
- El relleno sanitario debe estar cerca de vías de fácil acceso para las unidades de recolección y transporte de los desechos sólidos.
- El lugar seleccionado para el relleno sanitario debe contar con suficiente material de cobertura, de fácil extracción.
- La permeabilidad de los suelos deberá ser igual o menor que 1×10^{-7} cm/seg; si es mayor se deberá usar otras alternativas impermeabilizantes.
- Se deberá estimar un tiempo de vida útil del relleno sanitario de por lo menos 10 años.
- El relleno sanitario deberá poseer: cerramiento adecuado, rótulos y avisos que lo identifiquen en cuanto a las actividades que en él se desarrollan, como entrada y salida de vehículos, horarios de operación o funcionamiento, medidas de prevención para casos de accidentes y emergencias, además se deben indicar la prohibición de acceso a personas distintas a las comprometidas en las actividades que allí se realicen.
- El relleno sanitario debe contar con los servicios mínimos de: suministro de agua, energía eléctrica, línea telefónica, sistema de drenaje para evacuación de sus desechos líquidos, de acuerdo con la complejidad de las actividades realizadas.
- El relleno sanitario debe contar con programas y sistemas para prevención y control de accidentes e incendios, como también para atención de primeros auxilios y cumplir con las disposiciones reglamentarias que en

materia de salud ocupacional, higiene y seguridad industrial establezca el Ministerio de Salud Pública y demás organismos competentes.

- El relleno sanitario debe contar con servicios higiénicos apropiados para uso del personal.
- Se debe mantener un registro diario, disponible para la Entidad Ambiental de Control, en lo relacionado con cantidad, volúmenes y peso de desechos sólidos. El análisis de la composición física y química de los desechos sólidos se realizará anualmente.
- Debe mantenerse en el relleno sanitario las condiciones necesarias para evitar la proliferación de vectores y otros animales que afecten la salud humana o la estética del entorno.
- Se debe ejercer el control sobre el esparcimiento de los desechos sólidos, partículas, polvo y otros materiales que por acción del viento puedan ser transportados a los alrededores del sitio de disposición final.
- Se debe controlar mediante la caracterización y tratamiento adecuado los líquidos percolados que se originen por descomposición de los desechos sólidos y que pueden llegar a cuerpos de agua superficiales o subterráneos.
- Los desechos sólidos no peligrosos deben ser colocados y cubiertos adecuadamente.
- Para la captación y evacuación de los gases generados al interior del relleno sanitario se deben diseñar chimeneas de material granular, las mismas que se conformarán verticalmente elevándose a medida que avanza el relleno.
- Todo relleno sanitario debe disponer de una cuneta o canal perimetral que intercepte y desvíe fuera del mismo las aguas lluvias.
- Durante la operación del relleno sanitario, los desechos sólidos deben ser esparcidos y compactados simultáneamente en capas que no excedan de una profundidad de 0,60m.
- Todas las operaciones y trabajos que demande un relleno sanitario deben ser dirigidos por una persona especialmente adiestrada para este efecto, debiendo estar su planteamiento y vigilancia a cargo de un ingeniero sanitario.

- El relleno sanitario en operación debe ser inspeccionado regularmente por la entidad ambiental de control correspondiente, dictándose las medidas que se crea adecuadas para corregir cualquier defecto que se compruebe en las técnicas con las que se opera en el relleno sanitario.

Referente al trato de lixiviados efluentes de un relleno sanitario, la Normatividad vigente para el manejo de lixiviados, publicado en el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria, promulgado en el Decreto Ejecutivo No. 3399 del 28 de noviembre del 2002 y publicado en el Registro Oficial No. 725 del 16 de diciembre del 2002, en su Libro VI, Anexo 6 correspondiente a Norma de Calidad Ambiental para el Manejo y Disposición Final de desechos sólidos no peligrosos, se indica el articulado siguiente:

4.10.3 Se deberá realizar como mínimo los siguientes análisis físico-químicos a los lixiviados captados como efluentes del Botadero de desechos sólidos:

- Temperatura, pH, DBO5, DQO, sólidos totales, nitrógeno total, fósforo total, dureza, alcalinidad, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, hierro, sodio, potasio, sólidos disueltos, plomo, mercurio, cadmio, cromo total, cianuros, fenoles y tensoactivos.

3. RELLENO SANITARIO DE SAN CRISTÓBAL

3.1. INFORMACIÓN GENERAL

3.1.1. ARCHIPIÉLAGO DE GALÁPAGOS

Las Islas Galápagos fueron descubiertas por el Fray Tomás de Berlanga en 1535, y durante los siguientes siglos piratas, bucaneros y balleneros usaron las islas para aprovisionamiento y reparación de sus botes. Desde 1832 forma parte del Ecuador.

La Provincia de Galápagos está conformada por 19 islas, 47 islotes y al menos 26 rocas o promontorios de origen volcánico situados en el Océano Pacífico a 960 Km del Ecuador continental. Las Islas Galápagos están ubicada cerca de la línea Ecuatorial, aproximadamente a 1000 km (600 millas) de la costa oeste de

Ecuador. Del total de la superficie terrestre (788.200 has), el 96,7% (761.844 has) es Parque Nacional, el restante 3,3% (26.356 has) es zona colonizada formada por áreas urbanas y rurales en las islas San Cristóbal, Santa Cruz, Isabela y Floreana. Baltra también cuenta con áreas pobladas debido a que en ella se encuentra una base militar. El resto de islas no están habitadas por seres humanos.

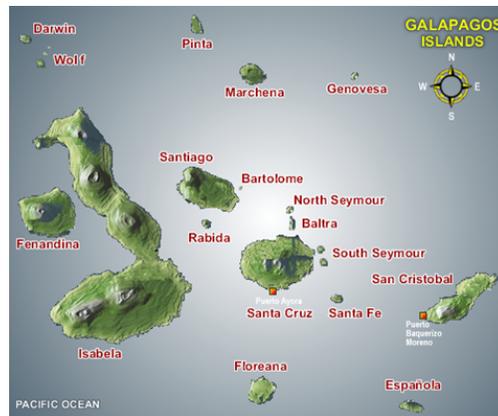


Figura 4: Archipiélago de Galápagos (Ingala, 2008)

Las islas Galápagos son de origen volcánico. Son el resultado de lava desde el fondo marítimo que las elevaron más de 790 metros sobre el nivel del mar. De la misma manera, las erupciones de los más de 200 volcanes que las conforman han continuado alterando el relieve de la región. La última erupción relevante se dio en 1825 en la Isla Isabela y a partir de ahí, ésta isla ha mostrado un cierto grado de actividad volcánica. Todas las variables tales como clima, altitud y textura del terreno de las islas, han sido causantes de la aparición de su flora y fauna única en el planeta.

El Parque Nacional Galápagos se estableció en 1936, se ratificó y extendió en 1959. Galápagos es declarado como nueva provincia el 18 de Febrero de 1973 y en 1979 la UNESCO declara a las Islas Galápagos como Patrimonio Natural de la Humanidad y Reserva de la Biosfera y Santuario de Ballenas en 1985.

La isla San Cristóbal se ubica en la parte occidental del archipiélago de Galápagos, siendo la más próxima al continente. Tiene una extensión total de

55.800Ha o 558Km², de los cuales el 85% es área del Parque Nacional Galápagos y el resto pertenece al área urbana y rural. Su punto más alto alcanza los 730m.

San Cristóbal tiene un solo volcán extinto hace mucho tiempo, con centenares de cráteres de extensos flujos de lava que no cuentan con vegetación. La laguna “El Junco” es el único cráter con una laguna de agua dulce del archipiélago, y se ubica en San Cristóbal. Esta laguna se encuentra a 700 m.s.n.m. y tiene una extensión de 270 metros de diámetro y 6 metros de profundidad. En la carretera hasta el lugar atraviesa la zona agrícola en donde se producen legumbres, cereales, frutas tropicales y algunas especies de árboles maderables.

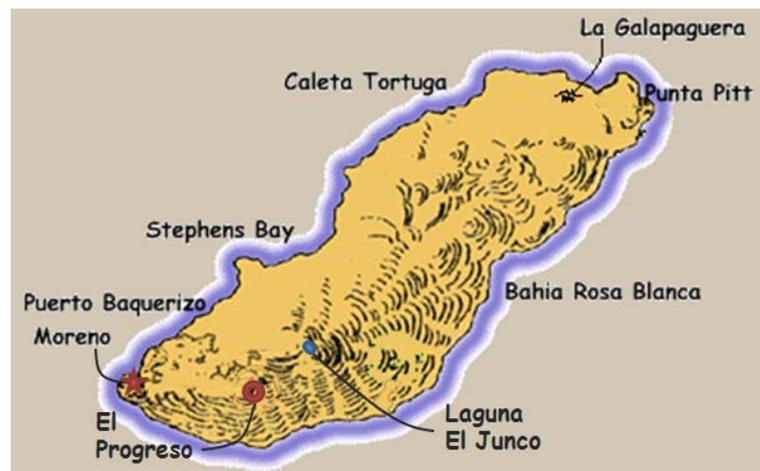


Figura 5: Isla san Cristóbal (Galápagos Cruises)

Puerto Baquerizo Moreno es la cabecera cantonal de San Cristóbal y capital política de Galápagos. A pesar de esto, tiene la segunda población más grande de las islas: 8.087 habitantes. (proyectada al 2010, INEC 2001), La población del Cantón San Cristóbal, según el Censo del 2001, representa el 30,2% del total de la Provincia de Galápagos; ha crecido en el último período intercensal 1990-2001, a un ritmo del 4,1% promedio anual. El 12,9% de su población reside en el Área Rural y se caracteriza por ser una población joven, ya que el 40,2% de la población son menores de 20 años. Las industrias primarias son la pesca artesanal, turismo, y cultivo de granjas. El Cantón San Cristóbal, cuenta con una Parroquia urbana y rural o periférica El Progreso y la Isla Floreana.

San Cristóbal es una de las cinco islas pobladas del archipiélago y presenta el asentamiento humano más antiguo de las Galápagos, llamado “El Progreso”, establecido en 1869. El 90% de la población de San Cristóbal vive en la zona urbana.

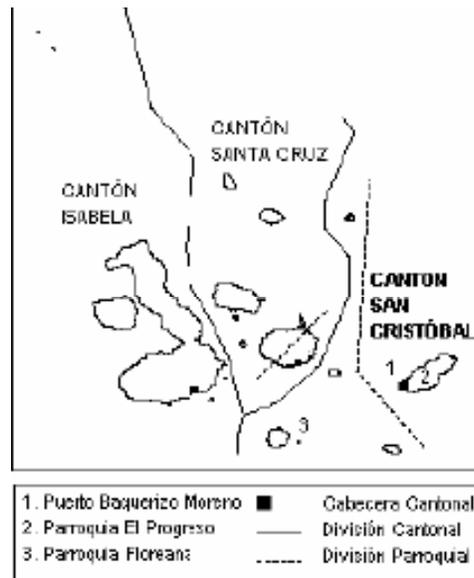


Figura 6. Ordenamiento Territorial de Galápagos (Fundación Natura-Ingala, 2001)

El clima en las Islas Galápagos está en gran parte determinado por las corrientes marítimas frías y calientes, siendo la más importante la corriente de Humboldt. Esta corriente influye directamente en el clima y trae agua fresca a las islas. Existe una fuerte corriente proveniente del sur, la cual crea una neblina espesa acompañada de lluvias leves, creando un clima ligeramente húmedo y frío. En diciembre el viento pierde fuerza, el océano es calmado y la corriente cálida de Panamá proveniente del norte bordea la isla. Estas corrientes crean un patrón de clima definido de mañanas soleadas acompañadas de tardes con nubes y ocasionales chubascos. Existen dos estaciones, de mayo a diciembre durante la cual el clima es fresco y seco, con temperaturas promedio de 18°C, y de diciembre a mayo se tiene la temporada caliente y lluviosa, donde la temperatura promedio asciende a los 25°C.

San Cristóbal es bastante árido en comparación con la mayoría de las islas tropicales. Tiene dos estaciones distintas: una estación calurosa y una estación fresca. La temperatura tiene un comportamiento particular, ya que por cada 100 m de elevación disminuye 1° C de temperatura. Así también, la pluviosidad varía desde los 350 a 1.800 mm, en altitudes que van de 0 a 700 metros sobre el nivel del mar.

3.1.2. ASPECTOS POBLACIONALES

Puerto Baquerizo Moreno es el centro de las actividades productivas del cantón y, al ser la capital provincial, allí se desenvuelven las principales actividades político-administrativas de la región, ello explica en alta medida que la ciudad albergue al 87,1% de la población de la isla. El resto de la población se distribuye en las parroquias rurales de El Progreso (11,3%) y Floreana (1,6%). El Progreso es muy importante por su rol en abastecimiento de productos agropecuarios, y la Isla Floreana cuenta con una reducida población de alrededor de 109 habitantes.

Como se puede observar en el gráfico siguiente, el Puerto tiene un eje fundamental que es la Avenida Charles Darwin, vía principal de ingreso y salida de la isla.



Figura 7: Mapa de Puerto Baquerizo Moreno (Infogalápagos)

San Cristóbal ha crecido en el período intercensal 1990 – 2001, a un ritmo del 4,1% promedio anual. El total de viviendas de Puerto Baquerizo Moreno y El progreso, según el catastro realizado por el Municipio de San Cristóbal para el 2010 es de 2,692.

En San Cristóbal, la población económicamente activa (PEA) suma 2,804 personas, según el censo del 2006. Por grupos de ocupación, los trabajadores de servicios son los más numerosos (20,79%), les sigue los Oficiales, Operarios y Artesanos (15,62%), empleados de oficina (11,01%), Trabajadores no calificados y (9,88%). Los otros perfiles de ocupación representan porcentajes menores al 9%: ejecutivos e intelectuales, agricultores, operadores de maquinaria y otros.

De la población económicamente activa, por ramas de actividad, el sector de administración pública y defensa representa el mayor porcentaje, como muestra el cuadro a continuación:

PEA San Cristóbal, según ramas de actividad

| Rama de Actividad | Hombres | Mujeres | Total | Porcentaje |
|--|----------------|----------------|--------------|-------------------|
| TOTAL | 1875 | 929 | 2804 | 100.0% |
| Administración Pública y Defensa | 536 | 177 | 713 | 25.4% |
| Transporte, Almacenamiento y Comunicaciones | 281 | 59 | 340 | 12.1% |
| Comercio | 143 | 140 | 283 | 10.1% |
| Enseñanza | 74 | 150 | 224 | 8.0% |
| Construcción | 201 | 2 | 203 | 7.2% |
| Agricultura, Ganadería, Caza y Silvicultura | 154 | 25 | 179 | 6.4% |
| Hoteles y Restaurantes | 45 | 96 | 141 | 5.0% |
| Pesca | 138 | 0 | 138 | 4.9% |
| Otras Actividades Comunitarias, Sociales y Personales | 79 | 39 | 118 | 4.2% |
| Manufactura | 76 | 34 | 110 | 3.9% |
| No Declarado | 57 | 32 | 89 | 3.2% |
| Hogares Privados con Servicio Doméstico | - | 82 | 82 | 2.9% |
| Actividades de servicios sociales y de salud | 16 | 49 | 65 | 2.3% |
| Actividades Inmobiliarias, Empresariales y de Alquiler | 34 | 26 | 60 | 2.1% |
| Electricidad, Gas y Agua | 24 | 7 | 31 | 1.1% |
| Intermediación Financiera | 6 | 7 | 13 | 0.5% |
| Trabajo Nuevo | 5 | 3 | 8 | 0.3% |
| Explotación de Minas y Canteras | 6 | 1 | 7 | 0.2% |
| Organizaciones y Órganos Extraterritorial | - | - | - | - |

Tabla 8: Ramas de actividad laboral en San Cristóbal

Fuente: INEC, Censo de Población y Vivienda 2006

3.1.3. INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS DE SALUD

En el año 2000 se creó el Consejo Insular de Salud (COINSA), con la participación de 11 instituciones del Cantón. El documento preparado por el COINSA esboza como necesidades principales de salud en el Cantón, el agua potable y la evacuación de aguas servidas y basura, ya que representan factores fundamentales para la prevalencia de enfermedades como la parasitosis, la infección de vías aéreas superiores, diarreas, faringoamigdalitis, infección de vías urinarias, piodermatitis, otitis, dermatitis, trauma leve e hipertensión arterial.

Con respecto a los servicios de salud, la oferta está cubierta en su mayoría por servicios públicos del Ministerio de Salud, IESS y Zona Naval, aunque otros proveedores privados son importantes: 3 consultorios y 6 farmacias privadas.

El Hospital Provincial Oskar Jandl ofrece servicios de consulta externa, medicina general, emergencia, hospitalización, odontología y servicios complementarios, ecografía, rayos X, laboratorio y farmacia. Cuenta con 15 camas disponibles.



Foto 1: Hospital Oskar Jandl, San Cristóbal

El Subcentro de salud de El Progreso tiene una infraestructura propia y cuenta con un médico rural, un médico odontólogo itinerante, un auxiliar de enfermería y un auxiliar de odontología. Posee un botiquín con medicamentos básicos.

Recibe el apoyo de una ambulancia terrestre del Hospital, para atender a tres comunidades más alejadas de la Parroquia. El Puesto de Salud de Floreana es atendido por un médico y una auxiliar de enfermería.

3.1.4. INFRAESTRUCTURA DE SERVICIOS PÚBLICOS

San Cristóbal cuenta con 1 mercado municipal, destinado principalmente a la comercialización de productos agrícolas de primera necesidad, carnes y mariscos.



Foto 2: Mercado Municipal de San Cristóbal

El cantón San Cristóbal cuenta con un camal para el faenamiento de ganado con un promedio de 20 reses a la semana.

El desarrollo económico y el aumento de la población en las islas Galápagos han generado un aumento significativo en la demanda de bienes y servicios. El consumo de estos bienes genera desechos que en muchas ocasiones son vertidos directamente al subsuelo o al mar. Esto ocasiona que el agua superficial marina y del manto freático se contamine perjudicando ecosistema insular.

En la actualidad se desconoce exactamente cómo están afectando todas las actividades humanas al ecosistema del Parque Nacional Galápagos y al agua de la cual se abastece la población para cubrir sus necesidades, debido a que en Puerto Baquerizo Moreno no se ha realizado un monitoreo permanente para determinar la calidad de agua que posee la isla y poder definir el grado de

contaminación de las aguas y cómo esta contaminación podría afectar a la salud humana y a los sectores productivos.

De acuerdo al censo del 2006 las coberturas de abastecimiento de agua en el cantón, se presentan en el siguiente cuadro:

Abastecimiento de agua en San Cristóbal

| Categorías | Casos | % |
|------------------|-------------|--------------|
| Red Publica | 1564 | 92,0 |
| Pozo | 24 | 1,4 |
| Río o Vertiente | 41 | 2,4 |
| Carro repartidor | 53 | 3,1 |
| Otro | 4 | 0,2 |
| Total | 1686 | 100,0 |

Tabla 9: Fuentes de abastecimiento de agua

Fuente: INEC, Censo de Población y Vivienda 2006

San Cristóbal, al igual que las otras islas, tiene una cobertura deficitaria de los servicios de alcantarillado, con una calidad muy mala debido a la contaminación en la red. Las aguas residuales no reciben tratamiento alguno antes de la descarga y van directamente hasta un punto de descarga submarina, cerca de la bahía. La falta de tratamiento antes de la descarga, ocasiona problemas de contaminación en el agua de la bahía, que puede afectar a los usuarios de la playa.

Cerca del malecón se han instalado dos bombas centrífugas que desalojan el agua servida, el bombeo no es constante por fallas mecánicas, y en época de lluvias llegan a rebosar contaminando la playa. El alcantarillado pluvial es conjunto con el doméstico y en la temporada invernal sobrepasa la capacidad de desalojo de las tuberías, rebosando alcantarillas y contaminando la ciudad.

De acuerdo al Censo de población y de Vivienda la situación de la cobertura del servicio de eliminación de aguas servidas para todo el cantón en el año 2006 era la siguiente:

Cobertura de eliminación de aguas servidas

| Categorías | Casos | % |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| Red pública de alcantarillado | 1315 | 78,0 |
| Pozo ciego | 73 | 4,3 |
| Pozo séptico | 278 | 16,5 |
| Grieta | 11 | 0,7 |
| Otro | 9 | 0,5 |
| Total | 1686 | 100,0 |

Tabla 10: Métodos de eliminación de aguas servidas

Fuente: INEC, Censo de Población y Vivienda 2006

3.2. SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS

En el año 2002 el Gobierno Municipal del Cantón San Cristóbal con el apoyo de la Agencia Española de Cooperación Internacional inició el Proyecto de Gestión Integral de Residuos Sólidos el cual incluía la adquisición de vehículos y maquinarias, construcción de infraestructura y difusión y promoción del nuevo servicio.

Parte fundamental de dicho proyecto se refirió principalmente a la construcción del Centro de Gestión de Residuos Sólidos (CGRS) destinado al procesamiento de la basura recolectada en forma clasificada (basuras orgánica, reciclable y rechazo). El CGRS incluyó un relleno sanitario construido a nivel, ya que las características rocosas del suelo hacían muy costosa la excavación de celdas.

Los residuos dispuestos son los recolectados como rechazo y embalados con plástico para disponerlas como relleno seco, pero han empezado a deteriorarse, considerando la necesidad de realizar una cobertura definitiva y cierre técnico.

Por esta particularidad y después de más de un año de operación del CGRS, el actual relleno sanitario requiere que se amplíe en superficie. Esto implica la necesidad a futuro de disponer indefinidamente de nuevos terrenos.

El área de Cerro Quemado situado al sur oriente de la población existe una cantera que en más de veinte años de explotación se ha creado una gran oquedad, propicia para aprovecharla como relleno sanitario del tipo trinchera o zanja, tanto por la gran capacidad de almacenamiento por unidad de área que presenta, como por la probable recuperación del área que se daría por la nivelación del terreno y un eventual cierre técnico del relleno sanitario.

La recolección de desechos sólidos la realiza el Municipio de San Cristóbal mediante un sistema diferenciado, tras un almacenamiento separado en la fuente entres tachos, orgánicos, reciclables y rechazo; para el servicio se dispone de un vehículo recolector; además de un camión de apoyo para la recolección de cartón. La frecuencia de la recolección de los desechos sólidos se realiza una vez al día, los siete días de la semana pero cada día está determinado para un tipo de desecho (rechazo, orgánico o reciclable). Los desechos sólidos son separados por la población, en recipientes de colores en donde en el recipiente negro se coloca el rechazo, en el verde se coloca el material orgánico y en el azul, el material reciclable.

La Disposición Final se la realiza en el Centro de Gestión de Desechos Sólidos de San Cristóbal, ubicado en el Km 4 ½ de la vía a El Progreso, a diez minutos de la ciudad y se levanta en un área de cinco hectáreas.

El Centro se encuentra dividido en una zona de clasificación de desechos, compostaje, incinerador, gestión de lixiviados y el sitio de disposición de los desechos considerados como rechazo.

3.2.1. ALMACENAMIENTO

El sistema de gestión integral de residuos sólidos en Puerto Baquerizo Moreno, incluye un almacenamiento separado en las fuentes de generación, en tres componentes:

Designación de tachos para separación de residuos en la fuente

| Color de Tacho | Tipo de residuo | Detalle de residuos |
|----------------|--------------------|---|
| Verde | Orgánico | Restos de comida (lavaza), restos de fruta y hortalizas, huesos, restos de carne, pescado y aves, ramas y monte podado |
| Azul | Reciclables | Envases de vidrio, botellas de plástico, latas de conservas, periódicos y papel, cajas de cartón, envases de leche, jugos y yogurt, latas |
| Negro | Basuras de rechazo | Zapatos y ropa vieja, papel higiénico, pañales usados, fundas plásticas, vidrios rotos, y todo residuo que no sea orgánico o reciclable. |

Tabla 11: Separación en la fuente

Fuente: Unidad de Gestión Ambiental, Municipio de San Cristóbal

Los materiales que se reciclan en San Cristóbal en su mayoría son papel y cartón (53,8%) y los que menos se reciclan son los metales y aluminio con un (1,1%)

La cantidad de tachos de color azul recogidos los días jueves por el recolector varían entre 560 y 658, esto representa un promedio de 614 tachos por cada día.

Los tachos azules que fueron repartidos a la comunidad en la implementación del sistema suman 1600, es decir que solo se utilizan el 38,4% de los envases que han sido distribuidos. En la siguiente foto se pueden observar los tachos entregados:



Foto 3: Tachos de sistema diferenciado de recolección de residuos sólidos



Foto 4: Recipientes municipales para instituciones educativas en El Progreso

3.2.2. BARRIDO

El barrido de calles, parques, jardines y áreas comunes se mantienen las siguientes frecuencias de barrido con dos jornaleros:

Cuadro No. 1. **FRECUENCIAS DE BARRIDO**

| Zona | Frecuencia |
|------------------------------------|--------------------|
| Avenida principal de mayor tráfico | 1 vez al día |
| Segunda calle en la zona comercial | 2 días a la semana |
| Zona residencial consolidada | 1 vez a la semana |

| | |
|--|----------------|
| Zona residencial no consolidado y periférico | 2 veces al mes |
|--|----------------|

Tabla 12: Frecuencias de barrido

Fuente: Unidad de Gestión Ambiental, Municipio de San Cristóbal

Con esta frecuencia de barrido se puede apreciar una ciudad aceptablemente limpia, esto se debe además a la creciente conciencia ambiental de la población.



Foto 5: Barrido en una calle de San Cristóbal y equipos de barrido

El equipo de barrido es adecuado, liviano y presenta un aspecto aceptable, del barrido se obtiene un promedio de 48 kg/Km de residuos, un valor relativamente bajo, debido a que en sí la ciudad se mantiene limpia.

3.2.3. RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE

El sistema de recolección de desechos sólidos en la ciudad de Puerto Baquerizo Moreno y la parroquia El Progreso es puerta a puerta; se realiza con un recolector. La recolección de desechos sólidos la realiza el Municipio de San Cristóbal mediante un sistema diferenciado, tras un almacenamiento separado en la fuente entres tachos, orgánicos, reciclables y rechazo; para el servicio se dispone de un vehículo recolector Marca HINO-GH del año 2006 y de capacidad 12m³ con un chofer y 3 ayudantes; además de un camión de apoyo Marca HINO-

DUTO del año 2006 y de 8m³ de capacidad para la recolección de cartón. La frecuencia de la recolección de los desechos sólidos se realiza una vez al día, los siete días de la semana siendo cada día determinado para un tipo de desecho (rechazo, orgánico o reciclable).

A continuación en el cuadro se indica las rutas, frecuencias y horarios establecidos para la recolección de los desechos y residuos tomando en cuenta la capacidad técnica con la que cuenta el municipio y el compromiso por parte de la comunidad:

Frecuencias de recolección de los desechos sólidos en San Cristóbal

| DÍAS | Orgánico (6h00 a 11h00) | Reciclable (6h00 a 14h00) | Rechazo (6h00 a 15h00) |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Lunes | X | | |
| Martes | | | X |
| Miércoles | X | | |
| Jueves | | X | |
| Viernes | X | | |
| Sábado | | | X |
| Domingo | X | | |

Tabla 13: Días de recolección diferenciada de desechos

Fuente: Unidad de Gestión Ambiental, Municipio de San Cristóbal



Foto 6: Vehículo Recolector San Cristóbal



Foto 7: Camión para la recolección de cartones en San Cristóbal

Datos generales del servicio de recolección

| Indicador | Cantidad |
|---|----------|
| Cantidad de equipos de recolección | 2 |
| Número de viajes por recolector | 2 |
| Tiempo de recolección (hrs) | 7 |
| Capacidad del vehículo recolector (m ³) | 12 |
| Capacidad del camión recolector de cartones (m ³) | 8 |

Tabla 14: Datos del servicio de recolección de residuos sólidos

Fuente: Unidad de Gestión Ambiental, Municipio de San Cristóbal

El servicio de recolección es adecuado para las condiciones de la ciudad, existe una percepción al servicio que lo califica de regular, según los resultados de encuesta de calidad y cantidad realizada el 12 de abril, 2010.

Respuestas a consulta

Limpieza de la ciudad

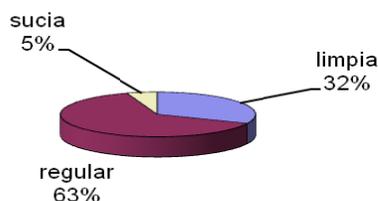


Figura 8: Limpieza de la ciudad

Fuente: Encuesta de calidad y cantidad, 12 de abril 2010.

3.2.4. DISPOSICIÓN FINAL

La Disposición Final se la realiza en el Centro de Gestión de Desechos Sólidos de San Cristóbal, ubicado en el Km 4 ½ de la vía a El Progreso, a diez minutos de la ciudad y se levanta en un área de cinco hectáreas.

El Centro se encuentra dividido en una zona de clasificación de desechos, compostaje, incinerador, gestión de lixiviados y el sitio de disposición de los desechos considerados como rechazo.

A los desechos orgánicos se los procesa por una trituradora de rodillos. Luego pasa a al área de estabilización donde previamente se echó viruta de madera y posteriormente pasa al patio de compostaje donde se los dispone en pilas de compost.



Foto 8: Pilas de Compost

El material reciclable recolectado se lo clasifica (plástico, vidrio, PET, latas, etc) en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos y posteriormente es compactado para formar pacas embaladas con plástico, algunas de las cuales son almacenadas en una zona destinada para ello y otro porcentaje en enviado al continente. En el último año según datos proporcionados por el Municipio de San Cristóbal, se envió alrededor de 60 toneladas de material reciclable al continente. Sin embargo, no se cuenta con ningún convenio, tratado o programación para hacerlo periódicamente.



Foto 9: Centro de Reciclaje de residuos y disposición del material reciclable para ser empacado



Foto 10: Clasificación del material reciclable en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos



Foto 11: Pacas de cartón y latas embaladas para transporte.

En la actualidad los desechos de rechazo se disponen en un relleno sanitario seco, el cual consiste en impedir el contacto entre el rechazo y fuentes de agua, y así evitar generación de lixiviados y gases. Se localiza al pie de la vía que conduce a El Progreso; el área que cubre es de aproximadamente de 1 Hectárea y se halla dentro del Centro de Gestión Integral de residuos sólidos. La operación del relleno sanitario seco, es disponer los residuos de rechazo embaladas con plástico para formar pacas las cuales son dispuestas en un área recubierta con geomembrana a cielo abierto. Antes de que se implemente este sistema 2 años atrás, se utilizaba el botadero a 2 Km en el lado derecho de la vía a El Progreso. Sin embargo, ninguno de los dos sitios presenta una correcta disposición del rechazo.

3.2.4.1. BOTADERO ANTIGUO

Se localiza al pie de la vía que conduce a El Progreso; el área que cubre es de aproximadamente de 2 Hectáreas dicho sitio no cuenta con tratamiento de gases y lixiviados, y tampoco se realizó un cierre técnico. Los principales problemas que presenta este botadero son los siguientes:

- Existencia de zonas inundadas en el botadero por falta de cunetas perimetrales y pendientes apropiadas.
- Generación de lixiviados sin tratamiento.
- Generación de gases no evacuados y sin tratamiento.
- Mal olor.
- Falta de cerramiento que impida el ingreso de personas y animales.
- Falta de cobertura final del botadero, por lo que la mínima cobertura con la que cuenta ya se encuentra erosionada y presenta basura descubierta.
- Al acceso los pobladores aún botan basura.
- Impacto visual negativo.

El estado actual del botadero se muestra en las siguientes fotos:



Foto 12: Centro del botadero



Foto 13: Lluvias acumulan agua por falta de cunetas y drenaje, la falta de cobertura ocasiona mayor generación de lixiviados.



Foto 14: Ingreso al botadero



Foto 15: Borde del botadero hacia la quebrada.

3.2.4.2. RELLENO SECO ACTUAL

El relleno sanitario seco se encuentra en condiciones no apropiadas, ya que el material de embalaje no presenta una correcta barrera contra el ambiente, por lo que esta se deteriora y prácticamente se ha convertido en un botadero a cielo abierto. Las pacas son acumuladas en 5 niveles, y existen pacas que ya no cuentan con ninguna protección. Como se pueden ver en las imágenes siguientes, muchas de las pacas dispuestas ya no cuentan con embalaje alguno. Junto con un incorrecto uso de la geomembrana de impermeabilización, presentan una situación insalubre y de descuido que permite la proliferación de insectos y roedores, así como el esparcimiento no controlado de lixiviados y

gases. Aún más alarmante, es considerar que este método no tiene ninguna consideración de sostenibilidad o proyección a largo plazo, ya que han concurrido tan solo dos años de vida del relleno seco.



Foto 16: Elaboración de pacas de material de rechazo



Foto 17: Sitio de disposición de material de rechazo sobre una geomembrana dispuesta en el suelo



Foto 18: Paca de material de rechazo deteriorada

Por las razones antes expuestas, este método de disposición final de rechazo no presenta una alternativa viable a corto ni largo plazo. Es necesario crear un relleno sanitario que garantice el almacenamiento de la basura y un tratamiento correcto de lixiviados, gases y vectores que minimicen un impacto ambiental, económico y social. A continuación se resumen las características que el actual relleno seco presenta:

- Pacas rotas y basura descubierta, prácticamente se convierten en un botadero a cielo abierto.
- Geomembrana en la base es prácticamente inútil ya que sin pendientes apropiadas y cunetas perimetrales existen zonas inundadas, así como no cubren la totalidad de la base de las pacas.
- A pesar de ser un relleno seco, se generan lixiviados por la falta de protección contra lluvia.
- Se tiene generación de gases sin sistema de evacuación ni tratamiento.
- Debido a la ausencia de cobertura final, las pacas están completamente deterioradas.
- Generación de mal olor.
- Impacto visual negativo.

Por lo antes expuesto es necesario la designación de áreas a futuro para la disposición final de los residuos sólidos del Cantón San Cristóbal, por lo cual se establece para el siguiente diseño un periodo de diseño de 15 años.

3.2.5. RECURSO HUMANO

El equipo de trabajo encargado de la administración, operación y mantenimiento del servicio de Residuos Sólidos, está compuesto por 23 personas. A continuación se detalla el personal que trabaja por componente en el servicio de residuos sólidos.

Recurso humano vinculado a la Gestión Integral de Residuos Sólidos

| Área de gestión | Empleados | Trabajadores | Total RRHH | Porcentaje |
|-------------------|-----------|--------------|------------|-------------|
| Administración | 3 | 2 | 5 | 22% |
| Barrido | - | 2 | 2 | 9% |
| Recolección | - | 2 | 2 | 9% |
| Disposición final | - | 11 | 11 | 48% |
| Transporte | - | 3 | 3 | 13% |
| Total | 3 | 20 | 23 | 100% |

Tabla 15: Recurso humano vinculado al servicio de residuos sólidos

Fuente: Unidad de Gestión Ambiental, Municipio de San Cristóbal

Cinco personas trabajan en la Administración de la Gestión Integral de Residuos Sólidos los mismos que son: la Directora de Higiene Ambiental, Técnico Ambiental y una Asistente Administrativa, adicionalmente a esto, existen dos Inspectores Ambientales.

En el Barrido, existen dos personas que se dedican a realizar la limpieza de las vías en Puerto Baquerizo Moreno, mismos que se encuentran distribuidos en diferentes puntos de la ciudad.

En lo referente a la Recolección tenemos 2 personas quienes realizan aseo de calles, así como limpiezas de malecón y limpieza de mercados.

En transporte existen 3 personas quienes son: 1 chofer del vehículo recolector, adicionalmente un chofer de la camioneta asignada a la Dirección de Gestión Ambiental, así como un Técnico en Mantenimiento.

En la Disposición Final de los Residuos Sólidos existen 10 trabajadores encargados del manejo del Centro de Gestión de Residuos Sólidos, y un guardia

que se encarga del cuidado y seguridad del Centro de Gestión de Residuos Sólidos.

3.2.6. SITUACIÓN FINANCIERA ACTUAL

Por ser un Programa inmerso en el Presupuesto Municipal, los movimientos contables de ingresos y gastos, se contabilizan al interior de la Municipalidad en función de las Normas Técnicas de Contabilidad para el sector público.

La Dirección de Gestión Ambiental, no viene practicando un sistema de costos por componentes o centros de costos como es el barrido, recolección, disposición final, reciclaje y desechos hospitalarios.

Análisis de situación de ingresos y egresos del servicio

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| INGRESOS | 2009 |
| Servicio de Residuos Sólidos | 86,347.40 |
| Industriales (Residuos Sólidos) | 6,795.44 |
| TOTAL INGRESOS | 93,142.84 |
| GASTOS | 2009 |
| Gastos de Personal para Inversión | 172,776.18 |
| Bienes y Servicios para Inversión | 50,321.49 |
| TOTAL GASTOS | 223,097.67 |
| DÉFICIT DEL SERVICIO | 129,954.83 |
| DÉFICIT DEL SERVICIO | 42% |

Tabla 16: Situación financiera del servicio de residuos sólidos

Fuente: Cédulas presupuestarias – Dirección financiera, Municipio de San Cristóbal

En el cuadro se observa que existe un déficit financiero del servicio de residuos sólidos en el año 2009 del 42%.

La mayor parte del gasto se encuentra en remuneraciones, sin embargo, existen gastos en suministros de oficina, suministros de aseo y limpieza, vestuario, mantenimientos de vehículos, herramientas, repuestos y accesorios así como combustibles y lubricantes.

3.3. POBLACIÓN Y PRODUCCIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS

La población del Cantón San Cristóbal, según el Censo del 2001 y 2006, representa el 32,0% del total de la Provincia del Galápagos; ha crecido en el último período intercensal 1990-2001, a un ritmo del 4,1% promedio anual. El 9,8% de su población reside en el Área Rural; se caracteriza por ser una población joven, ya que el 40,2% son menores de 20 años. Se utiliza los datos de población del Censo del 2001, debido a que el INEC recomienda que los datos de población y crecimiento poblacional del Censo realizado en el 2006 no son recomendables utilizarlos.

Población del Cantón San Cristóbal –Censo 2001

| ÁREAS | TOTAL | HOMBRES | MUJERES |
|--------|-------|---------|---------|
| Total | 5.633 | 3.041 | 2.592 |
| Urbana | 4.908 | 2.604 | 2.304 |
| Rural | 725 | 437 | 288 |

Tabla 17: Población de San Cristóbal

Fuente: INEC, Censo de Población y Vivienda 2001

La población total del Cantón San Cristóbal proyectada al 2010 es de 8,087 habitantes, en el área urbana son 7,046 habitantes que representan el 87% de la población del cantón y 1,041 habitantes en el área rural que corresponde al 13% de la población del cantón. También se tiene una proyección de 2,692 viviendas para el presente año.

La proyección de la población urbana de la ciudad de San Cristóbal se muestra en la siguiente cuadro:

Proyección de población de San Cristóbal

| Año | Población Urbana | Población Rural | Total |
|-------------|------------------|-----------------|-------------|
| 2001 | 4908 | 725 | 5633 |
| 2002 | 5109 | 755 | 5864 |
| 2003 | 5319 | 786 | 6104 |
| 2004 | 5537 | 818 | 6355 |
| 2005 | 5764 | 851 | 6615 |
| 2006 | 6000 | 886 | 6886 |
| 2007 | 6246 | 923 | 7169 |
| 2008 | 6502 | 960 | 7463 |
| 2009 | 6769 | 1000 | 7769 |
| 2010 | 7046 | 1041 | 8087 |
| 2011 | 7335 | 1084 | 8419 |
| 2012 | 7636 | 1128 | 8764 |
| 2013 | 7949 | 1174 | 9123 |
| 2014 | 8275 | 1222 | 9497 |
| 2015 | 8614 | 1272 | 9887 |
| 2016 | 8967 | 1325 | 10292 |
| 2017 | 9335 | 1379 | 10714 |
| 2018 | 9718 | 1435 | 11153 |
| 2019 | 10116 | 1494 | 11611 |
| 2020 | 10531 | 1556 | 12087 |
| 2021 | 10963 | 1619 | 12582 |
| 2022 | 11412 | 1686 | 13098 |
| 2023 | 11880 | 1755 | 13635 |
| 2024 | 12367 | 1827 | 14194 |
| 2025 | 12874 | 1902 | 14776 |

| | | | |
|------|-------|------|-------|
| 2026 | 13402 | 1980 | 15382 |
| 2027 | 13952 | 2061 | 16012 |
| 2028 | 14524 | 2145 | 16669 |
| 2029 | 15119 | 2233 | 17352 |
| 2030 | 15739 | 2325 | 18064 |

Tabla 18: Proyección de población de San Cristóbal

Fuente: INEC, Censo de Población y Vivienda 2001

3.4. CÁLCULO DE GENERACIÓN DE RESIDUOS

En el mes de abril del 2010, se procedió a realizar una campaña de muestreo de residuos sólidos generados en Puerto Baquerizo Moreno y en la parroquia de El Progreso, cuyos procedimientos y resultados se detallan a continuación.

3.4.1. METODOLOGÍA

El levantamiento de la información y los muestreos se realizaron con el apoyo de un grupo de profesionales en las siguientes fechas: 12 al 16 de Abril del 2010.

Se empleó el método estadístico que se describe en el Capítulo 2.2.2.1: Caracterización de los desechos sólidos, en la página 12, para la caracterización de los residuos sólidos según el método propuesto por el Sakurai, 1983, que permite determinar la cantidad de residuos sólidos que se genera en la isla San Cristóbal con una confiabilidad del 95%.

El estudio de cantidad de residuos sólidos determina la cantidad de desechos sólidos generados por cada persona en un día (PPC) y se lo mide en Kg/hab/día. Este parámetro es básico para el dimensionamiento de servicios de aseo y disposición final, pues permite realizar proyecciones para establecer la demanda del servicio.

Para el cálculo del tamaño de la muestra se utiliza la expresión siguiente que permite mantener una confiabilidad del muestreo solicitada:

$$n = \frac{v^2}{\left[\frac{E}{1.96} \right]^2 + \frac{v^2}{N}}$$

Donde:

n = número de viviendas a probar aleatoriamente.

N = número total de viviendas del estrato en cuestión = 2,692

Para poblaciones pequeñas en donde no se cuenta con estudios anteriores, se recomiendan los siguientes valores de desviación estándar y error permisible:

v = desviación estándar de el PPC = 200 gr/hab/día.

E = error permisible = 50 gr/hab/día.

Con los datos de viviendas de cada parroquia se determinó para cada caso el número de las muestras determinadas en el siguiente cuadro:

Número de muestras adoptadas para San Cristóbal

| No. de Viviendas, N | E | v | No. de muestras calculadas | No. de muestras adoptadas |
|-----------------------|-----|-----|----------------------------|---------------------------|
| 2,692 | 50 | 200 | 59.82 | 60 |

Tabla 19: Cálculo de muestras requeridas

El método que se utilizó para determinar la cantidad de residuos sólidos que se genera per cápita (PPC) de desechos sólidos doméstica – comercial, con una aproximación lo suficientemente adecuada para manejar indicadores y diseños del servicio se detalla a continuación. El PPC obtenido consideró dos estratos socio - económicos, con una muestra de 3 días para muestreos domésticos y comerciales.

El material y equipos que se utilizó es el siguiente:

- Romanilla de 50 Kg de capacidad.
- Romanillas de 25 Kg de capacidad.
- Recipiente de plástico de 20 litros.
- Marcadores y adhesivos.
- Equipo de seguridad (mascarillas, botas, chalecos de identificación)
- Fundas de polietileno.

- Papelería y varios (formularios de campo, lápiz, borrador, etc.)

Se contó con personal y equipo de recolección adicional para el muestreo, que incluyeron un chofer, peones de recolección, y ayudantes para el levantamiento de información.

3.4.2. OBTENCIÓN DE DATOS

Se determina y ubica el universo de trabajo en un plano de la localidad (zona centro y periferia). Se cuentan y numeran en orden progresivo, los elementos del universo de trabajo, para conocer su magnitud.

Con base al tamaño de la muestra y al tamaño del universo de trabajo, se seleccionan aleatoriamente los elementos de dicho universo que formarán parte de la muestra.

Se recorre el universo de trabajo, visitando a los habitantes de las casas - locales comerciales seleccionados para la muestra con el fin de explicarles la razón del muestreo por realizar así como para captar la información general, que se indica en el formulario de encuesta de campo.

También durante el recorrido, se les entrega una funda de polietileno a los habitantes de cada una de las casas – locales comerciales de la muestra.

Durante los tres días escogidos para realizar el muestreo, se visitan las casas – locales comerciales seleccionados para la muestra, con el fin de recoger las fundas con los desechos generados por sus habitantes, las fundas de polietileno con los residuos sólidos generados el día anterior al día de la visita y a la vez se les entrega una nueva funda para que almacenen los residuos sólidos que generarán el día de la visita.



Foto 19: Encuestas realizadas en San Cristóbal



Foto 20: Procedimiento de determinación de peso volumétrico

Después de recoger diariamente los residuos sólidos generados el día anterior se procede a pesarlos con las romanillas anotando el peso de los residuos en el formulario de encuesta en el casillero correspondiente al día en que fueron generados.

3.4.3. PROCESAMIENTO DE DATOS

Se obtienen los siguientes datos, y se los analiza según el proceso detallado en el Capítulo 2.2.2.1: Caracterización de los desechos sólidos, en la página 12, de acuerdo a una distribución estándar de la muestra, utilizando una probabilidad de 1/60 en los cálculos:

Resumen de muestreos y cálculos

| Número de muestra | PPC (kg/hab/día) | | |
|-------------------|------------------|----------|------------|
| | Rechazo | Orgánico | Reciclable |
| 1 | - | - | - |
| 2 | - | - | - |
| 3 | - | - | - |
| 4 | - | - | - |
| 5 | - | - | - |
| 6 | - | - | - |
| 7 | - | - | - |
| 8 | - | - | - |
| 9 | - | - | - |
| 10 | - | - | - |
| 11 | - | - | - |
| 12 | 0.00 | - | - |
| 13 | 0.01 | - | - |
| 14 | 0.02 | - | 0.00 |
| 15 | 0.02 | - | 0.00 |
| 16 | 0.02 | - | 0.00 |
| 17 | 0.02 | 0.00 | 0.02 |
| 18 | 0.02 | 0.00 | 0.03 |
| 19 | 0.02 | 0.00 | 0.03 |
| 20 | 0.03 | 0.02 | 0.04 |
| 21 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| 22 | 0.04 | 0.04 | 0.05 |
| 23 | 0.04 | 0.06 | 0.08 |
| 24 | 0.04 | 0.06 | 0.09 |
| 25 | 0.04 | 0.07 | 0.10 |
| 26 | 0.04 | 0.10 | 0.10 |
| 27 | 0.06 | 0.10 | 0.11 |
| 28 | 0.07 | 0.13 | 0.13 |
| 29 | 0.07 | 0.13 | 0.13 |
| 30 | 0.07 | 0.13 | 0.13 |

| | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 31 | 0.07 | 0.15 | 0.13 |
| 32 | 0.07 | 0.15 | 0.13 |
| 33 | 0.08 | 0.17 | 0.13 |
| 34 | 0.08 | 0.17 | 0.13 |
| 35 | 0.10 | 0.18 | 0.13 |
| 36 | 0.11 | 0.25 | 0.14 |
| 37 | 0.11 | 0.25 | 0.15 |
| 38 | 0.11 | 0.25 | 0.15 |
| 39 | 0.13 | 0.25 | 0.15 |
| 40 | 0.13 | 0.25 | 0.15 |
| 41 | 0.17 | 0.25 | 0.17 |
| 42 | 0.17 | 0.25 | 0.20 |
| 43 | 0.17 | 0.25 | 0.25 |
| 44 | 0.17 | 0.30 | 0.25 |
| 45 | 0.17 | 0.36 | 0.25 |
| 46 | 0.17 | 0.50 | 0.25 |
| 47 | 0.17 | 0.50 | 0.25 |
| 48 | 0.19 | 0.50 | 0.25 |
| 49 | 0.19 | 0.50 | 0.31 |
| 50 | 0.25 | 0.50 | 0.33 |
| 51 | 0.25 | 0.58 | 0.38 |
| 52 | 0.33 | 0.60 | 0.38 |
| 53 | 0.33 | 0.63 | 0.42 |
| 54 | 0.33 | 0.70 | 0.50 |
| 55 | 0.37 | 0.75 | 0.50 |
| 56 | 0.42 | 0.75 | 0.50 |
| 57 | 0.50 | 0.81 | 0.50 |
| 58 | 0.50 | 0.83 | 0.63 |
| 59 | 0.67 | 1.00 | 1.00 |
| 60 | 0.69 | 2.00 | 1.25 |
| Promedio aritmético | 0.16 | 0.35 | 0.23 |
| No. de muestras | 49 | 44 | 47 |
| Desviación estándar | 0.167 | 0.367 | 0.246 |
| Intervalo de confianza | 0.07 | 0.17 | 0.11 |
| Límite inferior | 0.08 | 0.18 | 0.12 |
| Límite superior | 0.23 | 0.53 | 0.35 |
| Promedio con rechazo de colas | 0.148 | 0.333 | 0.185 |

Tabla 20: Muestreos y cálculos de PPC

Nota: Valores en blanco corresponden a muestras no entregadas por la comunidad

Como resumen, se presenta la siguiente tabla:

Generación doméstico-comercial

| PPC | Kg/hab/día | Porcentaje |
|------------------|--------------|----------------|
| PPC Rechazo | 0.148 | 22.22% |
| PPC Orgánico | 0.333 | 50.00% |
| PPC Reciclable | 0.185 | 27.78% |
| PPC TOTAL | 0.666 | 100.00% |

Tabla 21: PPC por componente, doméstico-comercial

La composición de los residuos reciclables según los muestreos realizados se muestra a continuación, así como el peso volumétrico in situ de los residuos sólidos clasificados:

Composición de los residuos reciclables según clasificación en la fuente

| MATERIAL | PESO (Kg) | PORCENTAJE |
|------------------------------|--------------|---------------|
| Papel y Cartón | 11.50 | 13.63 |
| Tetra pack | 1.75 | 2.07 |
| Latas | 4.50 | 5.33 |
| Plásticos Alta densidad | 4.00 | 4.74 |
| Botellas y envases de vidrio | 19.50 | 23.11 |
| Botellas de plástico (PET) | 7.75 | 9.18 |
| Total Reciclable | 49.00 | 100.0% |

Tabla 22: Composición de materiales reciclables

Nota: En base a los muestreos del 15 de Abril, 2010

Característica física de los residuos

| Densidad | Valor(Kg/m ³) |
|------------|----------------------------|
| Rechazo | 93,75 |
| Orgánicos | 337,5 |
| Reciclable | 118,3 |

Tabla 23: Densidad in situ de los residuos

Adicionalmente a la producción doméstico-comercial detallada anteriormente, se cuenta con generadores especiales de residuos sólidos, detallados a continuación:

Generación especial de residuos sólidos

| FUENTE DE GENERACIÓN | (Ton/día) |
|------------------------------------|-----------|
| Instituciones educativas (Rechazo) | 0.093 |
| Mercado municipal (orgánicos) | 0.675 |
| Residuos hospitalarios comunes | 0.009 |
| Embarcaciones (Rechazo) | 0.371 |
| Embarcaciones (Reciclables) | 0.251 |

Tabla 24: Generación especial

En cuanto a la producción de residuos sólidos hospitalarios, se tienen los siguientes valores:

Desechos hospitalarios

| TIPO | (Ton/día) |
|-----------------------------|--------------|
| Infectocontagiosos | 5.570 |
| Cortopunzantes | 0.690 |
| Especiales | 0.620 |
| Peligrosos de embarcaciones | 0.697 |
| TOTAL | 7.577 |

Tabla 25: Caracterización de desechos hospitalarios

Incluyendo estos datos, se obtiene los siguientes valores totales para la generación por habitante diaria del cantón:

Resumen de generación de desechos sólidos del cantón

| DESCRIPCIÓN | 2010 |
|---------------------------------------|-------|
| PPC doméstico-comercial (kg/hab/día) | 0.666 |
| PPC Total (kg/hab/día) | 0.826 |
| Total generación del cantón (Ton/día) | 6.677 |

Tabla 26: Resumen de generación de desechos sólidos

Las proyecciones de la generación de residuos sólidos en San Cristóbal proporcionan la cantidad de residuos sólidos a recolectar y a disponer en el relleno sanitario en el período de diseño (15 años) y las adecuaciones que deban hacerse al sistema, en primer lugar se realizaron las proyecciones de la generación per cápita, considerando que el 100% de la materia de rechazo irá al relleno sanitario, y por seguridad se considera el 50% de materia orgánica que pueda llegar al relleno:

Proyección de producción per-cápita de residuos sólidos de fuente doméstico-comercial

| Año | PPC (kg/hab/día) | | | | |
|------|------------------|---------|------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | Orgánico | Rechazo | Reciclable | Total PPC Doméstico-Comercial | PPC Doméstico-Comercial destino RS |
| 2010 | 0.333 | 0.148 | 0.185 | 0.666 | 0.315 |
| 2011 | 0.335 | 0.149 | 0.186 | 0.669 | 0.316 |
| 2012 | 0.336 | 0.149 | 0.187 | 0.673 | 0.318 |
| 2013 | 0.338 | 0.150 | 0.188 | 0.676 | 0.319 |
| 2014 | 0.340 | 0.151 | 0.189 | 0.679 | 0.321 |
| 2015 | 0.341 | 0.152 | 0.190 | 0.683 | 0.322 |
| 2016 | 0.343 | 0.152 | 0.191 | 0.686 | 0.324 |
| 2017 | 0.345 | 0.153 | 0.192 | 0.690 | 0.326 |
| 2018 | 0.347 | 0.154 | 0.193 | 0.693 | 0.327 |
| 2019 | 0.348 | 0.155 | 0.193 | 0.697 | 0.329 |
| 2020 | 0.350 | 0.156 | 0.194 | 0.700 | 0.331 |
| 2021 | 0.352 | 0.156 | 0.195 | 0.704 | 0.332 |
| 2022 | 0.354 | 0.157 | 0.196 | 0.707 | 0.334 |
| 2023 | 0.355 | 0.158 | 0.197 | 0.711 | 0.336 |
| 2024 | 0.357 | 0.159 | 0.198 | 0.714 | 0.337 |
| 2025 | 0.359 | 0.159 | 0.199 | 0.718 | 0.339 |
| 2026 | 0.361 | 0.160 | 0.200 | 0.721 | 0.341 |
| 2027 | 0.362 | 0.161 | 0.201 | 0.725 | 0.342 |
| 2028 | 0.364 | 0.162 | 0.202 | 0.729 | 0.344 |
| 2029 | 0.366 | 0.163 | 0.203 | 0.732 | 0.346 |

Tabla 27: Proyección de PPC doméstico-comercial

A continuación se ha discriminado las proyecciones de residuos sólidos incluyendo residuos de origen doméstico comercial y de generadores especiales para identificar los residuos sólidos que tendrán como destino final en el relleno

sanitario, y que corresponden al 100% de residuos de rechazo y 50% de materia orgánica, como nivel de seguridad:

Proyecciones de residuos con destino a reciclaje, compostaje y relleno sanitario

| Año | Total residuos a reciclaje y compost | | | Residuos Urbanos a Relleno Sanitario | | |
|------|--------------------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| | Ton/día | | | Ton/día | | |
| | Residuos Reciclaje | Residuos Compost | Total (Reciclaje y Compost) | Residuos residencial-comercial a RS | Total residuos especiales a RS | Total residuos en RS |
| 2010 | 1.717 | 1.657 | 3.375 | 2.492 | 0.810 | 3.303 |
| 2011 | 1.788 | 1.722 | 3.509 | 2.608 | 0.818 | 3.426 |
| 2012 | 1.861 | 1.789 | 3.650 | 2.728 | 0.826 | 3.554 |
| 2013 | 1.938 | 1.859 | 3.797 | 2.854 | 0.834 | 3.689 |
| 2014 | 2.018 | 1.932 | 3.950 | 2.986 | 0.843 | 3.829 |
| 2015 | 2.102 | 2.009 | 4.110 | 3.124 | 0.851 | 3.975 |
| 2016 | 2.189 | 2.089 | 4.278 | 3.268 | 0.860 | 4.128 |
| 2017 | 2.281 | 2.172 | 4.453 | 3.419 | 0.868 | 4.288 |
| 2018 | 2.376 | 2.260 | 4.636 | 3.577 | 0.877 | 4.454 |
| 2019 | 2.476 | 2.351 | 4.827 | 3.743 | 0.886 | 4.628 |
| 2020 | 2.581 | 2.446 | 5.027 | 3.916 | 0.895 | 4.810 |
| 2021 | 2.690 | 2.545 | 5.235 | 4.097 | 0.903 | 5.000 |
| 2022 | 2.804 | 2.649 | 5.454 | 4.286 | 0.913 | 5.198 |
| 2023 | 2.923 | 2.758 | 5.682 | 4.484 | 0.922 | 5.406 |
| 2024 | 3.048 | 2.872 | 5.920 | 4.691 | 0.931 | 5.622 |
| 2025 | 3.179 | 2.990 | 6.169 | 4.908 | 0.940 | 5.848 |
| 2026 | 3.315 | 3.114 | 6.429 | 5.135 | 0.950 | 6.084 |
| 2027 | 3.457 | 3.244 | 6.701 | 5.372 | 0.959 | 6.331 |
| 2028 | 3.606 | 3.379 | 6.986 | 5.620 | 0.969 | 6.589 |
| 2029 | 3.762 | 3.521 | 7.283 | 5.880 | 0.978 | 6.858 |

Tabla 28: Proyección de generación de residuos para reciclaje, compostaje y relleno sanitario

3.5. SELECCIÓN DEL SITIO

La Municipalidad de San Cristóbal seleccionó como sitio a la excavación en la mina de material pétreo de Cerro Quemado, a 3.5 km de la ciudad. Este terreno es de propiedad de la Base Naval, es un área totalmente intervenida, en donde se ha creado dos zanjas de grandes proporciones debido a la explotación del material de manera no planificada, las cuales presentan una excelente alternativa

de recuperación. Existe un gran deterioro visual y ambiental del sitio, por lo que en base a criterio ecológico y geológico, es recomendable utilizar el sitio, ya que la mina de explotación no cuenta con un plan de cierre o recuperación del terreno.

3.6. CONDICIONES METEOROLÓGICAS DEL SITIO

Las siguientes condiciones meteorológicas representan un resumen de lo compilado por el INHAMI para la isla de San Cristóbal. La estación meteorológica se encuentra localizada junto a la laguna de El Junco.

3.6.1. TEMPERATURA

Se puede observar que se tiene picos en los meses de diciembre a mayo, y bajos en los meses restantes. En este caso, el promedio aritmético con mayor temperatura corresponde al mes de abril con 26.7°C y el mínimo al mes de septiembre con 21.3°C.

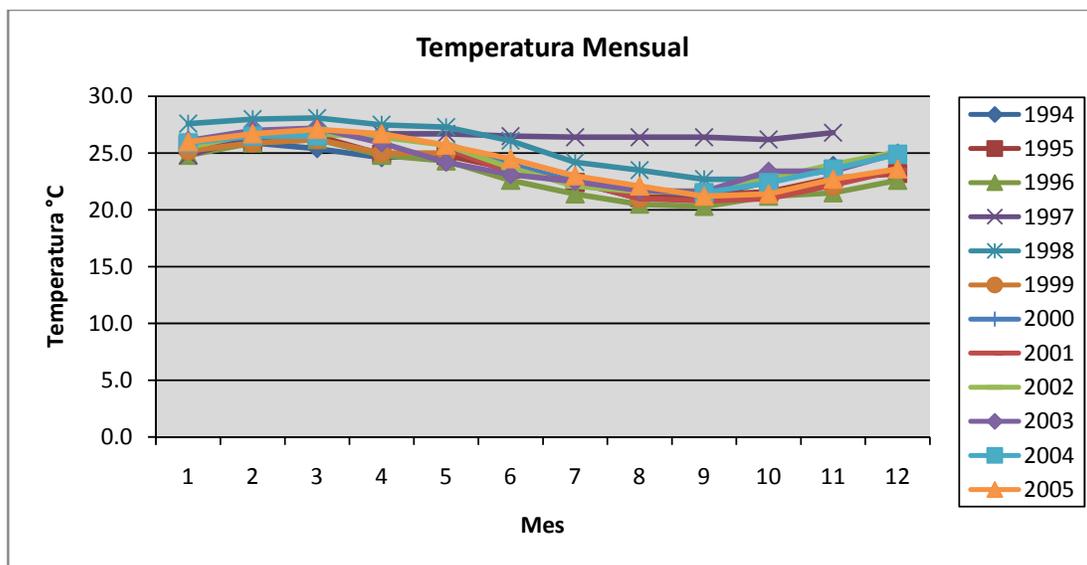


Figura 9: Temperatura mensual

3.6.2. PRECIPITACIÓN

En los siguientes gráficos se confirman las estaciones fresca/seca y caliente/lluviosa antes descritas:

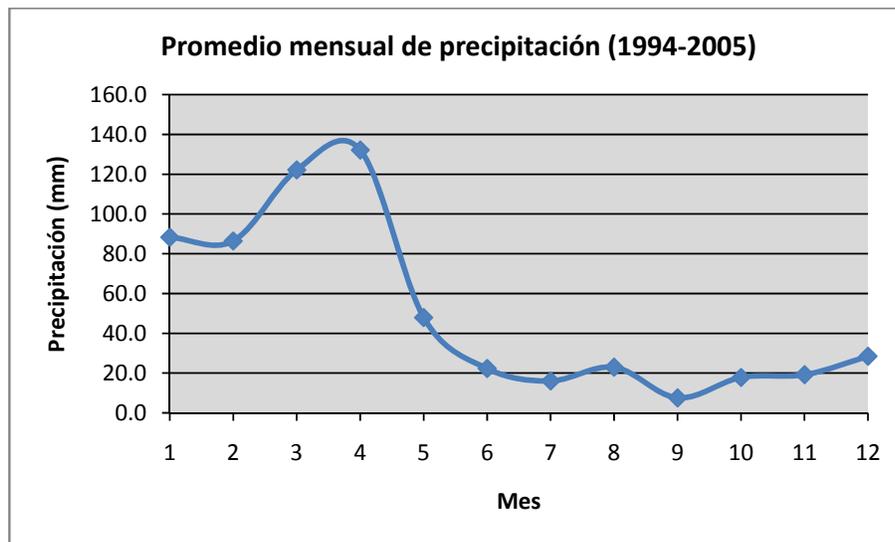


Figura 10: Promedio mensual de precipitación

Sin embargo, la altitud en la isla representa un factor muy importante: esta va aumentando gradualmente, según reportes de INGALA (Santos, 2009), en la estación de Puerto Baquerizo Moreno (período 64-70 y 74-81) se ha registrado una precipitación media anual de 288.9 mm ubicada a 30 metros de altura sobre el nivel del mar, en la estación El Progreso (período 64-81) fue de 1383.7 mm ubicada a 300 metros de altura y en la estación Pampa Mía (período 64-82) fue de 1706.6 mm ubicada a 400 metros de altura. El promedio anual de precipitaciones en la costa está entre los 0 a 300mm, por año. Mientras que en la parte alta se encuentra entre los 300 y 1700mm. (Hamann 1981).

Por esta razón, la zona agrícola de la isla se concentra hacia el centro de la misma en donde la altura provee de agua fresca y permite una producción constante durante el año; hacia las costas el terreno es árido y poco fértil.

A continuación se presenta una tabla con los datos de precipitación para los años 1950 hasta 2005, correspondientes a la estación ubicada en el aeropuerto de la

ciudad. Adicionalmente, los 10 valores máximos en dicho periodo se encuentran resaltados en la siguiente tabla:

| SERIES DE DATOS METEOROLOGICOS | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---------|-----------|------------|------------|--------|-------|------|------|------|-------|--------|-------------|
| NOMBRE | SAN CRISTOBAL-GALAPAGOS | | | | | | | | | | | CODIGO | M221 |
| PERIODO: 1950-2005 | LATITUD: | 0°54'0S | LONGITUD: | 89°36' 0 W | ELEVACION: | 6 msnm | | | | | | | |
| PRECIPITACION MENSUAL (°C) | | | | | | | | | | | | | |
| AÑOS | VALORES MENSUALES | | | | | | | | | | | | TOTAL ANUAL |
| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | |
| 1950 | 0 | 1,7 | 12,6 | 0,1 | 0,6 | 0 | 0 | 0,9 | 8,6 | 1,4 | 4,9 | 6,6 | 37,4 |
| 1951 | 100,4 | 128 | 34,4 | 82,7 | 15,2 | 17,4 | 75,4 | 7,3 | 11,3 | 7 | 2 | 7,4 | 488,5 |
| 1952 | 22,1 | 19,1 | 1,7 | 0 | 31,4 | 1,5 | 2,7 | 8,2 | 3,2 | 10,2 | 1,1 | 13,9 | 115,1 |
| 1953 | 179,3 | 487,3 | 86,5 | 458,1 | 169,7 | 2,7 | 2,9 | 12,9 | 7,1 | 5,9 | 6,1 | 5,8 | 1424,3 |
| 1954 | 9,5 | 44,5 | 91,5 | 0 | 0,5 | 0,6 | 6,3 | 5,9 | 2,2 | 4,7 | 5,1 | 6,6 | 177,4 |
| 1955 | 8,5 | 195,9 | 87 | 12 | 2,1 | 2,9 | 6,5 | 7,4 | 6,9 | 4,7 | 6,9 | 4,4 | 345,2 |
| 1956 | 4,7 | 116,1 | 291,3 | 234,5 | 1,6 | 6,4 | 8,2 | 8,3 | 6,6 | 4,6 | 8,7 | 0,6 | 691,6 |
| 1957 | 3,4 | 258,4 | 346,1 | 178,8 | 41 | 6,3 | 5,6 | 9,5 | 4,6 | 11 | 14,7 | 74,9 | 954,3 |
| 1958 | 47,6 | 109,4 | 99,6 | 16,7 | 1,3 | 1,6 | 1,9 | 1,6 | 8,8 | 4,5 | 10,5 | 6,2 | 309,7 |
| 1959 | 5,6 | 180 | 179,8 | 78,6 | 9,5 | 1,9 | 5,5 | 4,9 | 4,3 | 11,4 | 4,9 | 10,1 | 496,5 |
| 1960 | 10,4 | 10,1 | 32,9 | 0 | 2,4 | 1,1 | 5,3 | 4 | 3,2 | 5,6 | 10,4 | 7,3 | 92,7 |
| 1961 | 57,1 | 105,9 | 77,7 | 44 | 0,5 | 2,8 | 2,5 | 7,6 | 3,3 | 4 | 4,8 | 9,1 | 319,3 |
| 1962 | 135,1 | 5,4 | 0 | 0 | 9,3 | 2,1 | 5,2 | 7,9 | 6,9 | 3,5 | 4,3 | 7 | 186,7 |
| 1963 | 25,5 | 21,9 | 14,8 | 0 | 6,4 | 1,8 | 2,9 | 8,3 | 8,8 | 14,2 | 2,3 | 12,2 | 119,1 |
| 1964 | 66,3 | 56,9 | 6,8 | 0,9 | 0,2 | 1,1 | 1,2 | 0,4 | 1,3 | 0,4 | 2,6 | 2,4 | 140,5 |
| 1965 | 38,2 | 66,4 | 54,1 | 217,8 | 84 | 0,7 | 7,6 | 3,1 | 8,3 | 11,5 | 7,1 | 8,7 | 507,5 |
| 1966 | 59,8 | 41,9 | 3,7 | 2,7 | 0 | 2,7 | 3,8 | 1,9 | 13,8 | 3,7 | 3,8 | 1,5 | 139,3 |
| 1967 | 43,6 | 204,8 | 51,7 | 18,7 | 0 | 1,8 | 4,3 | 2,1 | 2,7 | 4,9 | 2,1 | 8,2 | 344,9 |
| 1968 | 21,2 | 49,8 | 115 | 1,2 | 0 | 1,2 | 12 | 12,7 | 10,5 | 12,5 | 7 | 4,6 | 247,7 |
| 1969 | 24,7 | 103,4 | 488,3 | 65,3 | 55,7 | 0 | 0 | 2,7 | 8,1 | 3,6 | 4 | 11,8 | 767,6 |
| 1970 | 36,3 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 1,9 | 1,7 | 7 | 3,1 | 4,4 | 5,1 | 4,8 | 2,7 | 68,2 |
| 1971 | 7,7 | 23,8 | 178 | 81,7 | 1,6 | 3,9 | 6 | 13 | 9,7 | 7,7 | 3,8 | 14,5 | 351,4 |
| 1972 | 23,4 | 110,7 | 235,9 | 380 | 128,7 | 5,5 | 8,3 | 6,9 | 8,6 | 9,1 | 5,4 | 79,2 | 1001,7 |
| 1973 | 185,4 | 53 | 3,2 | 10 | 1,2 | 3,5 | 3,6 | 1,5 | 2,1 | 3,5 | 1 | 6,8 | 274,8 |
| 1974 | 5,3 | 100,1 | 55,3 | 180,7 | 4 | 18,8 | 3,5 | 10 | 3,1 | 1,4 | 2,9 | 0,5 | 385,6 |
| 1975 | 5,5 | 342,3 | 464,3 | 161,3 | 0 | 4,4 | 6,6 | 4,5 | 0,8 | 3,4 | 2,1 | 0 | 995,2 |
| 1976 | 104,5 | 53,4 | 18 | 128,7 | 108,4 | 10,2 | 12 | 8,8 | 9,5 | 4,3 | 8 | 30,1 | 495,9 |
| 1977 | 156,5 | 36 | 49,9 | 0 | 0,7 | 4 | 8 | 6,2 | 1,4 | 7,6 | 3,4 | 18,7 | 292,4 |
| 1978 | 191,9 | 91,6 | 61,4 | 0,4 | 2,4 | 0,2 | 5 | 6,1 | 4,4 | 3,3 | 3,3 | 13 | 383 |
| 1979 | 36,2 | 112,2 | 13,7 | 22,6 | 0,4 | 3,3 | 10,3 | 8,4 | 1,9 | 6,6 | 0,9 | 5,9 | 222,4 |
| 1980 | 46,7 | 42,6 | 0,6 | 48,8 | 9,5 | 2,5 | 8,6 | 5,3 | 2,1 | 7 | 10,7 | 2,4 | 186,8 |
| 1981 | 13,8 | 7,3 | 110,2 | 14,6 | 1 | 2,2 | 2,5 | 2 | 2,4 | 7,3 | 2,8 | 12,4 | 178,5 |
| 1982 | 14,8 | 56,6 | 4 | 11,4 | 0,5 | 3 | 9,1 | 5,2 | 7,2 | 7,6 | 55 | 548,1 | 722,5 |
| 1983 | 554,5 | 201,8 | 320,3 | 371,2 | 490,5 | 556,2 | 253,9 | 6,3 | 4,1 | 5,5 | 4,5 | 14,5 | 2783,3 |
| 1984 | 3,5 | 13,8 | 7,8 | 0 | 0 | 11,9 | 1,2 | 2,9 | 15 | 4 | 0,8 | 2,3 | 63,2 |
| 1985 | 0,6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5,4 | 7,6 | 7,2 | 5,8 | 9,1 | | 12 | 47,7 |
| 1986 | | | 111,6 | 28,7 | 2,9 | 12,9 | 13,4 | 10,9 | 4,6 | 5,5 | 17,9 | 14,1 | 222,5 |
| 1987 | 139,4 | 535,2 | 243,8 | 223,8 | 81,3 | 5 | 4,1 | 18,3 | 8,5 | 1,5 | 0,8 | 13,1 | 1274,8 |
| 1988 | 5,1 | 34,3 | 4,6 | 0 | 0,8 | 0 | 0,5 | 2,8 | 9,6 | 5,5 | 8,7 | 2,8 | 74,7 |
| 1989 | 16,7 | 14,8 | 65,4 | 110,4 | 11,3 | 3,6 | 5,2 | 12 | 4,3 | 5,4 | 2,9 | 4,4 | 256,4 |
| 1990 | 4,1 | 191,9 | 50,4 | 29,1 | 1,8 | 10,3 | 7 | 5,6 | 4,3 | 6,5 | 10,8 | 5,4 | 327,2 |
| 1993 | | | | | | | 10,7 | 6,8 | 1,6 | 9,9 | 4,7 | 18,9 | |
| 1994 | 40,4 | 147,8 | 3,6 | 0 | 0 | 8,3 | 18,6 | 8,5 | 5,3 | 5,8 | 5,7 | 87,1 | 331,1 |
| 1995 | 180,2 | 70,7 | 26,8 | 0 | 0,5 | 6,6 | 8,8 | 7,8 | 15,3 | 16,5 | 12,2 | 8,7 | 354,1 |
| 1996 | 23 | 49,8 | 115,6 | 0 | 0 | 0 | 1,8 | 3,2 | 3,1 | 6 | 4,3 | 14,8 | 221,6 |
| 1997 | 2,4 | 124 | 269,4 | 267,1 | 145,9 | 42,1 | 47,3 | 33,9 | 0,8 | 49 | 104,9 | | 1086,8 |
| 1998 | 389,4 | 215 | 288,6 | 589,7 | 201 | 144,5 | 6,3 | 2,3 | 0,6 | 3,5 | 2,7 | | 1843,6 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1999 | 1,7 | 26,4 | 214,7 | 11,1 | 0,7 | | | 6,2 | | 11,1 | 7,1 | | |
| 2000 | | | | | 19 | 7,3 | 22,9 | 15 | 17,1 | 63,1 | 15,2 | 63,3 | |
| 2001 | 49,6 | 83,8 | | | 141,9 | 4,7 | 21,8 | 34,9 | 4,2 | 7,2 | 6,1 | 4,6 | |
| 2002 | 9,1 | 117,6 | 205,8 | 321,5 | 18,2 | 4 | 7,8 | 13,7 | 6,3 | 4,4 | 56 | 25,6 | 790 |
| 2003 | 199,8 | 2,7 | 5,4 | 0 | 0 | 0,4 | 3 | 4,4 | 3,6 | 19,8 | 7,2 | 15,5 | 261,8 |
| 2004 | 58,8 | 97,9 | 30,1 | | | | | | 20,4 | 22,5 | 4,9 | 33,2 | |
| 2005 | 16,9 | 15,1 | 61,9 | 0,2 | 0 | 5,1 | 22,5 | 22,8 | 6 | 4,7 | 3,9 | 3,3 | 162,4 |
| SUMA | 3386 | 5180 | 5296 | 4405 | 1808 | 948,1 | 714,7 | 424,1 | 328,6 | 469,7 | 498,7 | 1287 | |
| MEDIA | 66,4 | 101,6 | 103,8 | 88,1 | 34,8 | 18,6 | 13,7 | 8,0 | 6,2 | 8,7 | 9,4 | 25,2 | 480,9 |
| MINIMA | 0 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,8 | 0 | |
| MAXIMA | 554,5 | 535,2 | 488,3 | 589,7 | 490,5 | 556,2 | 253,9 | 34,9 | 20,4 | 63,1 | 104,9 | 548,1 | |

Tabla 29: Precipitación mensual, 1950-2005

Fuente: INHAMI

Por esta particularidad del sitio, y considerando que esta es una zona propensa a eventos meteorológicos como el Fenómeno de El Niño, es importante recalcar que la máxima precipitación registrada corresponde a Abril del año 1998, el cual será considerado para el dimensionamiento de los drenes y piscinas de tratamiento.

3.6.3. HUMEDAD RELATIVA

El mes de mayor humedad promedio es Marzo con 85% de humedad relativa, y los de menor son Octubre y Noviembre, con 80%:

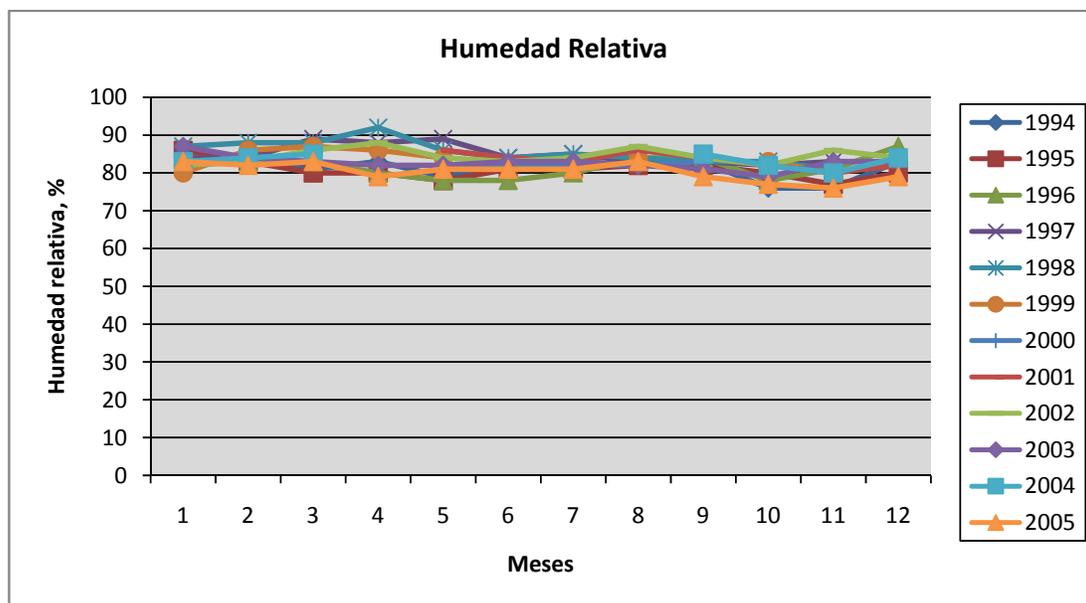


Figura 11: Humedad relativa

3.6.4. HELIOFANÍA

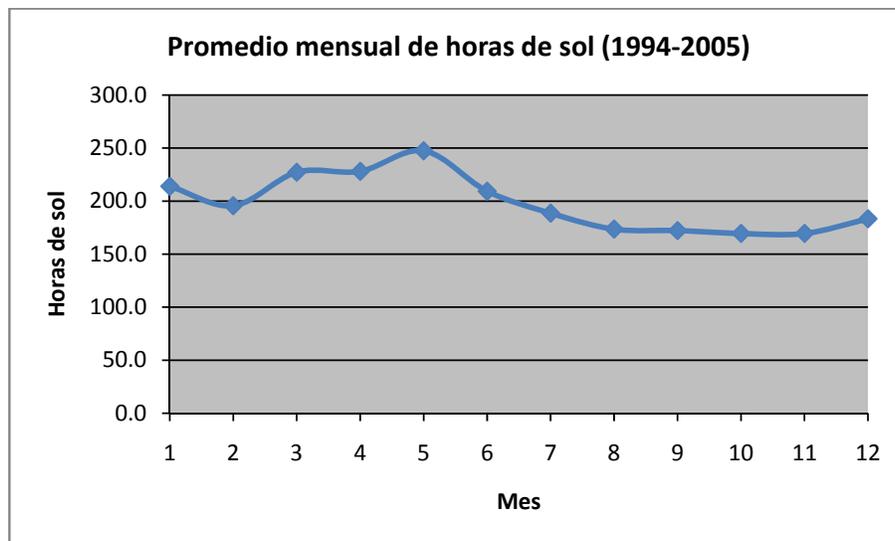


Figura 12: Promedio mensual de horas de sol

3.7. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y GEOLÓGICO DEL SITIO

La isla San Cristóbal es la más cercana al continente del archipiélago, está conformada por dos volcanes unidos, la mitad del sur es un volcán originado hace unos 2,4 millones de años, la mitad del norte es un volcán activo con flujos de lava tan recientes como unos cientos de años. Un estudio realizado por el INGALA, (Ingala, et. al., 1987) muestra que la isla está formada por coladas sucesivas de lava, las cuales se manifiestan en la estratificación vertical como niveles ligeramente inclinados, pero circundados por cambios marcados de pendientes fuertes o desniveles debido a las partes terminales de los flujos de lava.

Humedad, temperatura y precipitación, como antes descrito, son factores que se encuentran directamente relacionados con la altitud en la isla, por lo que es importante enfocarse en el área de estudio que se encuentra en la parte baja de la isla, cerca de las orillas, y descrita por la bibliografía como *seca, árida y cálida* (Ingala, et. al., 1987).

La parte oeste de la isla, donde se emplaza las dos poblaciones en consideración y la mina de Cerro Quemado, se caracteriza por estar condiciones áridas o muy secas, bastante cálida, sobre suelos de las superficies de coladas de lava en las laderas occidentales. Se encuentran suelos con un relieve suave a moderadamente ondulado. Son de color pardo-rojizo, de textura franco-arcillo-limosa, poco profundos a debido a la aparición de piedras y rocas a menos de los 50 cm de profundidad. El suelo presenta cierto grado de agrietamiento, atribuible al clima seco y al tipo de arcilla dominante, montmorillonita, hasta los primeros 50 cm. Los sitios de mayor relieve (como en Cerro Quemado) se caracterizan por presentar abruptos rocosos. Los suelos son muy poco profundos de color pardo-rojizo con abundante pedregosidad y afloramientos rocosos. La fertilidad es muy baja.

Debido a la existencia de la mina de extracción de material pétreo en Cerro Quemado, es posible analizar las condiciones geológicas fácilmente. A continuación se presenta la descripción estratigráfica de sitio de Cerro Quemado, bajo el criterio del geólogo Galo Albán:

| | | |
|---|------------|--|
|  | 0-30 cm | Suelo limo-arenoso color rojo, suelto |
| | 30-150 cm | Basalto |
| | 150-550 cm | Escoria con tonalidades rojizas |
| | >550cm | Escoria con tonalidades oscuras con vetas centimétricas de carbonato |

Tabla 30: Perfil estratigráfico de Cerro Quemado

Se puede observar que se cuenta con una parte plana con pendientes inferiores a 5°, y la estructura del cerro que presenta inclinaciones de hasta 35°.



Foto 21: Vista panorámica de la mina

El suelo se caracteriza por tener una profundidad menor a 30 cm, derivada de la meteorización de rocas ígneas durante un lento proceso debido a las condiciones secas de la zona y la dureza de la roca. La siguiente clasificación se obtuvo por los análisis realizados por el geólogo Galo Albán:

| Parámetro | Descripción |
|--------------------|---|
| Clasificación SUCS | SP, suelos arenosos finos de alta compresibilidad |
| Consistencia | Suelto |
| Drenaje | Bueno |
| CBR | 7-20 (Regular) |

Tabla 31: Clasificación del suelo

En el caso de las rocas, la escoria volcánica, se obtuvo la siguiente clasificación SRC (Clasificación en superficie) según lo reportado por el geólogo Galo Albán:

| Índice o factor | Valor máximo | Descripción | Puntuación |
|---|--------------|-------------|------------|
| Escoria (profundidad de 20 cm a 200 cm) | | | |
| Resistencia a la compresión simple* (Kg/cm ²) | 15 | 1.120-560 | 7 |

| | | | |
|-------------------------------|------------|--|-----------|
| RQD* (100%) | 20 | 0-25 | 5 |
| Condiciones de discontinuidad | 30 | Lados lisos, discontinuidades abiertas más de 5 mm sin relleno | 0 |
| Condiciones hidrogeológicas | 15 | Algunas filtraciones | 7 |
| Estructuras | 10 | Fracturas | 2 |
| Meteorización | 10 | Meteorizada | 7 |
| SRC | 100 | | 28 |

Tabla 32: Clasificación SRC del macizo rocoso

Esta calificación representa a la escoria volcánica como un tipo de roca mala. Sin embargo, este material tiene buenas características como material de construcción, como se evidencia por la explotación del mismo para este fin.

Finalmente, se presenta la siguiente clasificación geotécnica del sitio (elaborado por Galo Albán, siguiente página):

| Zonificación Geotécnica: | | PROYECTO: Relleno sanitario Puerto B. Moreno | Valor |
|--|---|---|---------|
| LITOLÓGIA (4) | CLASIFICACIÓN DE MATERIALES PETREOS Y SUELOS (2) | Volcanicos (basalto, escoria) | 1 |
| | COMPACIDAD O CONSISTENCIA (1) | 1 0,5 0 | 0,5 |
| | | Compacto Semisuelto Suelto | |
| ESTRUCTURA (1) | 1 0,5 0 | 0 | |
| | Masivo Medianamente fractu- Rado y estratificado Fracturado y estratificado | | |
| GEOMORFOLOGÍA (5) | MORFOLOGÍA (1) | 1 0,5 0,5 0 | 0,5 |
| | | Explanada Colina Ladera Montaña | |
| | PENDIENTE TRANSVERSAL (1) | 1 0,5 0,5 0 | 0,5 |
| | | Suave Moderada Abrupta Muy Abrupta | |
| | METEORIZACION (1) | 1 0,5 0 | 1 |
| Moderado Fuerte Muy fuerte | | | |
| EROSIÓN (1) | 1 0,5 0 | 0,5 | |
| | Inicial Moderada Antigua | | |
| DRENAJE (1) | 1 0,5 0 | 0 | |
| | Alto Medio Bajo | | |
| HIDROGEOLOGÍA (3) | HUMEDAD (1) | 1 0,5 0 | 1 |
| | | Secos Húmedos Saturados | |
| | ESCORRENTIA (1) | 1 0,5 0 | 0 |
| Alta Media Baja | | | |
| PERMEABILIDAD (1) | 1 0,5 0 | 0,5 | |
| | Permeable Semipermeable Impermeable | | |
| GEOTECNIA (8) | CAPACIDAD PORTANTE (2) | 2 1 0 | 1 |
| | | Alta Media Baja | |
| | ESTABILIDAD DE TALUDES(2) | 2 1 0 | 1 |
| | | Estable Medianamente Estable Inestable | |
| ESCARIFICACIÓN (2) | 2 1 0 | 1 | |
| | Suelos Suelos duros y rocas suaves Roca | | |
| FUENTES DE MATERIALES (2) | Base. Sub-base. Áridos. Mejorar subrasante. Relleno. Ninguno. | 1 | |
| CALIDAD GEOTECNICA | VALOR | | 9,5 |
| | CLASIFICACIÓN GEOTECNICA | | Regular |
| | TIPO | | III |

Tabla 33: Caracterización geotécnica

La zona en estudio está clasificada como Regular (9,5/20), Tipo III. Son ripables y moderadamente compactables, presentan caída de bloques y erosión longitudinal.

3.8. HIDROGEOLOGÍA DEL SITIO

La escoria volcánica presenta una fisuración leve a moderada, mientras que el suelo arenoso superficial presenta una porosidad intergranular media. No existen vertientes superficiales cercanas a la zona de de interés, y el clima árido disminuyen las probabilidades de encontrar fuentes de agua dulce subterránea. Sin embargo, la excavación de material pétreo llevo al nivel freático, en donde se observa el afloramiento de agua salobre, como se puede observar en la siguiente imagen:



Foto 22: Afloramiento de agua salobre

Adicionalmente, cabe recalcar la existencia de movimiento de agua a través de las fisuras del suelo, como se observa en la siguiente imagen debido a la aparición de arcillas de diferentes tonalidades:



Foto 23: Movimiento de agua a través de fisuras

3.9. DETERMINACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Contando ya con todos los elementos pertinentes para la conceptualización del relleno sanitario, se procede a realizar el diseño. En resumen se tienen las siguientes condiciones meteorológicas y datos para el diseño:

| Condiciones Meteorológicas | Valores |
|----------------------------|---|
| Pluviosidad en la costa | Media anual de 480.9 mm Máxima mensual 589.7 mm |
| Temperatura | diciembre - mayo media de 25°C junio - noviembre media de 18°C |
| Humedad | Media anual 80 % |
| Heliofonía | 196.7 horas/mes |
| Evaporación | 165 mm anuales |

Tabla 34: Resumen de condiciones meteorológicas

| Base de diseño | | |
|--|---------------------|-----------|
| Criterio | Unidad | Valor |
| Residuos a disponer (Promedio 15 años) | Ton/día | 4.35 |
| Densidad | Kg/m ³ | 215.63 |
| Orgánico | % | 24.9% |
| Materia Orgánica (50% total generado) | Ton/día | 1.08 |
| Celda de relleno | | |
| Densidad en relleno | Kg/m ³ | 600.00 |
| Volumen diario de relleno | m ³ | 7.26 |
| Ancho | m | 3.00 |
| Alto | m | 0.90 |
| Largo | m | 2.69 |
| Cobertura de celda diaria | | |
| Alto de cobertura | m | 0.10 |
| Área de cobertura | m ² | 18.83 |
| Volumen de material cobertura | m ³ /día | 1.88 |
| Área de relleno sanitario | | |
| Primer año | m ³ | 2,648.67 |
| Volumen de relleno 15 años | m ³ | 39,729.98 |
| Altura de cada capa | m | 1.00 |
| Área anual | m ² | 2,648.67 |
| Área anual | Ha | 0.26 |

| | | |
|----------------------------------|------|------|
| Numero de capas | | 7.00 |
| Área disponible útil (promedio)* | Ha | 0.72 |
| Años de utilización | Años | 19.1 |
| Altura de relleno (Total) | m | 7.00 |

Tabla 35: Base de diseño para el relleno sanitario

*Basado en un promedio del área para cada metro de relleno, debido a la forma de la zanja.

Los datos de operación del relleno son los siguientes:

- Tiempo de descarga: 10 minutos
- Frente de trabajo asumido: 3 metros
- Talud frontal de la celda de disposición: 3 a 1 (H:V)
- Talud lateral de la celda de disposición: 3 a 1 (H:V)
- Cobertura diaria: 0.10 m

La siguiente imagen satelital a la cual se ha sobrepuesto el estudio topográfico del sitio permite tener una idea del área de trabajo, y sobre la cual se han obtenido los volúmenes antes descritos:



Foto 24: Imagen satelital y topografía de la mina de Cerro Quemado

El sitio de interés dentro de la mina corresponde a la parte sur oriental del terreno que aparece sombreada, en donde se establece la plataforma inicial en la cota 9.00 m y la altura final del relleno sanitario, llegando a los 16.00 m.

La designación a la cota 8.00 m como cota inicial de trabajo se la realiza como precaución frente al empozamiento actual en partes del relleno, los cuales llegan hasta la cota 6.25 m. El material para dicho relleno se obtendrá del peinado de la zanja, así como préstamo de la misma mina.

Como previamente descrito, el relleno sanitario funcionará como disposición final para los residuos de rechazo, y como medida de seguridad se considera que el 50% de los desechos orgánicos generados por el cantón también contarán con este método de disposición final.

En el anexo 1 se encuentran los planos de diseño del relleno, con todos los componentes que se detallan a continuación.

3.9.1. CONFORMACIÓN DE CELDAS DIARIAS

Para el diseño de la celda diaria se consideró la generación que promedio de 4.35 toneladas diarias en 15 años. Se prevé una densidad en el relleno de 600 kg/m^3 , considerando que esta es una densidad aceptable dada la maquinaria que se utilizará, y que se ha llevado a cabo un proceso de clasificación y reciclaje previo que no exige un alto control del proceso de compactación. Con estas consideraciones el volumen a disponer al día es de 7.26 m^3 .

Las celdas diarias se han diseñado en base a una celda tipo, la cual cuenta con un frente de trabajo de 3.00 m, por facilidad de maniobra de la maquinaria. El material de cobertura diaria será obtenido de la mina adyacente, y no requiere ser mayor a 10 cm debido a vientos de fuerza reducida, presencia de roedores e insectos controlada, y precipitación reducida. Por facilidad de manejo, se ha decidido realizar el relleno en capas de 0.90 m adicionales a la cobertura diaria, los cuales permiten una fácil distribución de los residuos sólidos diarios y una fácil compactación, disminuyendo la ocurrencia de asentamientos. En consecuencia el avance al día será de 2.69 m. En resumen se tiene el siguiente cuadro:

| Características de la celda | Unidad | Valor |
|-----------------------------|-------------------|--------|
| Densidad en relleno | kg/m ³ | 600.00 |
| Volumen día de relleno | m ³ | 7.26 |
| Ancho | m | 3.00 |
| Alto | m | 0.90 |
| Largo | m | 2.69 |

Tabla 36: Filtración a través de un sistema de arcilla únicamente

3.9.2. DRENAJE E IMPERMEABILIZACIÓN INICIAL

Para evitar la acción física, química y bacteriológica de los contaminantes contenidos en los líquidos lixiviados, se preverá la impermeabilización del fondo del relleno sanitario mediante el uso de un sistema compuesto de doble dren y geomembrana. Este sistema, garantizará que la inexistencia de fugas de lixiviado al contar con tres capas de impermeabilización y dos niveles de drenaje. La capa inferior consta de una capa de arcilla de 20 cm, la cual una vez compactada deberá tener una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/seg; la segunda será una geomembrana de HDPE (Polietileno de Alta Densidad) de 1,0 mm de espesor termosellada. La capa de arcilla además de proveer una seguridad adicional a la migración del lixiviado, provee de una superficie estable y libre de protrusiones para protección de la geomembrana. Sobre la geomembrana se colocará una capa secundaria de drenaje para el control de fugas y sobre esta una segunda capa de geomembrana de HDPE. Finalmente se tiene el dren principal.

Este sistema provee de un doble control del lixiviado, que a su vez permite la evaluación del sistema principal. La capa superior actúa como drenaje principal, y la secundaria como control de fugas.

La elección de HDPE sobre otros materiales (PVC también representa una opción competitiva en el Ecuador) se da debido a su mayor resistencia a la tensión, la cual representa un mayor de seguridad debido a las pendientes pronunciadas en la trinchera, adicionalmente de sus mejores prestaciones en relación a las condiciones climatológicas del sitio y agresión química y física de los residuos sólidos.

Dada la geometría de la plataforma, así como el espacio disponible, resulta conveniente realizar el sistema de drenaje en forma de espina de pescado y con ramales que están ubicados cada 30 m, los cuales se dirigirán hacia un pozo de revisión desde el cual serán bombeados hasta la planta de tratamiento. Todos los drenes deben mantener una pendiente de 1% hacia el sitio de recolección. Estos se componen de un tubo colector de lixiviado de PVC perforado de 160 mm de diámetro ($A = 0.017 \text{ m}^2$).

Dicho drenaje deberá ser conectado a un sistema de bombeo que dirija a la planta de tratamiento de lixiviados. El bombeo es necesario debido a que no existe terreno circundante a un nivel inferior al de las celdas, por lo que la planta de tratamiento de lixiviados debe ser construida a un nivel más alto que el relleno.

El sistema de drenaje para un relleno sanitario consta de tres elementos: el filtro, el conducto y el sistema de eliminación. El filtro, que en este caso es la capa de drenaje, es esencial para mantener la eficiencia del dren y para impedir la erosión por filtración cuando el gradiente hidráulico es alto.

El filtro debe ser suficientemente permeable para permitir el flujo de lixiviado dentro del dren, con poca pérdida de carga.

El filtro es esencial para mantener la eficiencia del dren y para impedir taponamientos de los ductos. Por esta razón, una opción válida para la construcción de filtros es el uso de material granular de diámetro entre 3 y 7 cm., consistente en piedra sin filos (imprescindible para evitar punzonamiento en la geomembrana).

Los datos para el cálculo son los siguientes, basados en el diseño del drenaje descrito en el Capítulo 2.2.6.6:

| ESTIMACION CAUDAL GENERADO DE LIXIVIADOS | | |
|---|---------|---------------------|
| Precipitación máxima mensual = | 589.70 | mm |
| Evaporación anual (E) = | 165.00 | mm |
| Coefficiente de escorrentía (C_e) = | 0.05 | Suelo arenoso plano |
| Escorrentía ($E_s = p * C_e$) = | 29.49 | mm |
| Infiltración en 24 hrs ($I = p - E - E_s$) = | 17.62 | mm |
| Área del relleno (A) = | 9144.16 | m^2 |

| | | |
|--|--------|----------------------|
| Coeficiente de grado de compactación (K) = | 0.25 | Compactación regular |
| Caudal máximo de lixiviado (Q) = | 0.466 | l/s |
| | 40.279 | m ³ /día |

Tabla 37: Caudal de ingreso al relleno sanitario

El diseño de las capas de impermeabilización se basa en la evaluación de desempeño descrita en el Capítulo 2.3.4. Siguiendo las ecuaciones presentadas, se evalúa el desempeño del sistema de impermeabilización con el método descrito. Para indicación de la nomenclatura, referirse al Capítulo 2.3.4:

| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
|---------------|----------------|-----------|--|
| q_i | m/s | 5.098E-08 | Caudal por unidad de área del relleno |
| i | | 0.02 | Pendiente mínima |
| $k_{DRENAJE}$ | m/s | 1.00E-02 | Aproximado para el tamaño de piedra escogido |
| k_{SUELO} | m/s | 1.00E-09 | Mínimo necesario obtenido por compactación |
| H_s | m | 0.20 | |
| R_0 | m | 0.001 | Tamaño de diseño según Akhün (1997) |
| a | m ² | 0.000003 | |
| N | u | 8 | Número de agujeros en el sitio basado en una densidad de 17/ha |
| B | m | 19.54 | Ancho mínimo del carril de flujo considerando el diseño geométrico |

Tabla 38: Datos para evaluación del sistema de impermeabilización

En base a las ecuaciones del Capítulo 2.2.6.6, se obtienen los siguientes valores:

| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
|-----------|-------------------|-----------|--------------------------------------|
| T | m ² /s | 1.193E-03 | Despejando de las ecuaciones citadas |
| t | m | 0.12 | Ancho mínimo de la capa de drenaje |

Tabla 39: Valores calculados para el dimensionamiento de la capa de drenaje

Se requiere una capa de drenaje de al menos 12 cm. Sin embargo, debido a la variabilidad en los factores que representa la construcción de este sistema, así como la permeabilidad del material, la formación de una capa biológica sobre las piedras producto de la actividad microbiana en el líquido lixiviado, y a que dicho líquido contiene material suspendido que sedimentará en esta capa, se elige un

espesor de 30 cm. La capa de drenaje inferior (correspondiente al control de filtraciones) contará con el mismo espesor, ya que en caso de falla del sistema principal, este deberá transportar el mismo caudal.

Es imperativo el correcto funcionamiento del sistema de drenaje ya que se debe evitar cualquier crecimiento innecesario en la cabeza de presión de líquido sobre los sistemas de impermeabilización, ya que este escenario causaría un flujo excesivo como se mostrará a continuación.

En cuanto a la evaluación del desempeño de la geomembrana, se toma las recomendaciones y ecuaciones descritas en el Capítulo 2.3.4. Por tanto, se debe evaluar el comportamiento de un sistema de impermeabilización que consta de una geomembrana entre dos medios porosos, y el sistema inferior de geomembrana y arcilla, considerando el contacto que exista en entre los dos medios. Los resultados de dichas ecuaciones y cálculos se resumen a continuación, basados en los datos iniciales presentados en la Tabla 38:

Filtración a través de la geomembrana principal (superior)

| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
|------------------------|-----------------------|-----------|--|
| h_w | m | 0.30 | Cabeza de presión máxima asumida (Giroud y Bonaparte, 1989a) |
| $Q_{\text{filtrante}}$ | m^3/s | 3.658E-05 | Flujo infiltrado correspondiente al número de agujeros modelados |
| $q_{\text{filtrante}}$ | m/s | 7.595E-09 | Tasa de infiltración hacia capa de control de filtraciones |

Filtración a través del sistema geomembrana-arcilla (inferior)

| Buen contacto | | | |
|----------------------------|-----------------------|-----------|--|
| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
| $h_{w\text{-inf}}$ | m | 0.03 | Cabeza de presión máxima asumida (Giroud y Bonaparte, 1989a) |
| R | m | 4.21E-01 | |
| i_{avg} | | 1.01E+00 | |
| $Q_{\text{inf-filtrante}}$ | m^3/s | 4.46E-09 | Flujo infiltrado correspondiente al número de agujeros modelados |
| $q_{\text{inf-filtrante}}$ | m/s | 9.269E-13 | Tasa de infiltración hacia el suelo natural |

| Contacto pobre | | | |
|-----------------------|-------------------|--------------|--|
| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
| h_{w-inf} | m | 0.03 | Cabeza de presión máxima asumida (Giroud y Bonaparte, 1989a) |
| R | m | 9.88E-01 | |
| i_{avg} | | 1.01E+00 | |
| $Q_{inf-filtrante}$ | m ³ /s | 2.44E-08 | Flujo infiltrado correspondiente al número de agujeros modelados |
| $q_{inf-filtrante}$ | m/s | 5.068E-12 | Tasa de infiltración hacia el suelo natural |
| LR | | 1.006E+04 | Razón de lixiviados drenados/filtrantes (Basados en un contacto pobre) |

Tabla 40: Resultados de evaluación del sistema de impermeabilización

Como se puede observar, el funcionamiento del sistema reduce filtraciones significativamente. Adicionalmente, el valor de la Razón LR permitirá monitorear el estado de los sistemas de drenaje y lixiviados durante la vida útil del relleno.

En contraste, un sistema enteramente de arcilla, en donde dicha capa llegaría a ser 7.5 veces de mayor espesor (incurriendo en gastos de transporte de material y compactación), la cantidad de lixiviados filtrantes hacia el suelo natural sería superiores a 39 veces los lixiviados filtrantes por el sistema implementado (considerando la cantidad de agujeros en las geomembranas y un contacto pobre; dos factores que se consideran bajo el peor escenario), como se muestra a continuación:

Filtración en capa de arcilla (por motivos de comparación únicamente)

| Parámetro | Unidad | Valor | Comentario |
|------------------|-------------------|--------------|---|
| k_{SUELO} | m/s | 1.00E-09 | |
| h_w | m | 0.30 | |
| H_s | m | 1.50 | |
| A | m ² | 4817 | |
| $Q_{filtrante}$ | m ³ /s | 9.63E-07 | $Q_s = k_s \cdot (h/H_s) \cdot A$ (Akhün, 1997) |
| $q_{filtrante}$ | m/s | 2.00E-10 | |

Tabla 41: Filtración a través de un sistema de arcilla únicamente

Para la utilización de un geotextil de protección, se evalúa de la siguiente manera como lo descrito por Koerner et. al. (1996), resumido en el Capítulo 2.3.4:

| Protección con geotextil | | |
|---------------------------------|-------------------|--------------|
| Parámetro | Unidad | Valor |
| Altura relleno | m | 7.00 |
| γ | kg/m ³ | 600.00 |
| | kN/m ³ | 5.88 |
| H | mm | 25.00 |
| FS | | 3.00 |
| P_{req} | kPa | 147.10 |
| P_{adm} | kPa | 441.30 |
| FM_S | | 1.00 |
| FM_{DR} | | 0.50 |
| FM_A | | 1.00 |
| FR_{FL} | | 1.00 |
| FR_{DQB} | | 1.50 |
| M | g/m ² | 459.69 |
| | g/m ² | 460 |

Tabla 42: Protección de geomembrana con geotextil

Por tanto, se recomienda el uso de un geotextil de 460 g/m² o más para protección de la geomembrana.

3.9.3. TRATAMIENTO DE LIXIVIADO

Debido a que se trata de un proyecto para una población pequeña, un tratamiento extensivo del lixiviado elevaría mucho los costos operativos, por lo que se ha optado aprovechar el clima cálido de la región, para realizar un proceso menos complejo. Debido a que gran parte del líquido lixiviado contiene partículas orgánicas suspendidas, se iniciará el proceso con un sistema de decantación primario, consistente en tanque de sedimentación de doble cámara. Mediante este sistema se espera remover cerca del 30% a 40% de la DBO₅ presente en los lixiviados (Para el diseño, se adopta 30%). Después se conducen los lixiviados a un filtro anaerobio granular de flujo ascendente, con el cual se eliminará la

mayoría de la carga orgánica y finalmente para la disposición del efluente se contará con una piscina de evaporación y estabilización, la cual contarán con la mayor área posible de exposición para facilitar la evaporación, la cual se verá facilitada por los altos niveles de radiación solar y la baja pluviosidad de la zona.

En base a una caracterización (Castillo, 1994) del relleno de Zámbriza en Quito, que presenta el escenario más aproximado para la caracterización de los líquidos lixiviados de los rellenos sanitarios en el Ecuador, se identifica una carga orgánica (DBO_5) de hasta 20,000 mg/l, valor que se utilizará para los cálculos siguientes.

Los volúmenes relativamente pequeños de producción de líquidos lixiviados diarios permiten un dimensionamiento de los componentes que tienen un alta remoción de DBO_5 y de sólidos suspendidos.

Para aprovechar la capa de drenaje de lixiviados con la que se cuenta, se la utilizará como lecho biológico para reducir la carga orgánica.

Para el dimensionamiento del sedimentador de doble cámara se procede a los cálculos basados en los flujos de operación promedios. Este método de remoción actúa como un tanque séptico, en donde presentan una solución económica para remover la carga orgánica y los sólidos suspendidos en el caudal. Estos permiten la sedimentación y digestión en los lixiviados, permitiendo así un control del efluente del relleno. El método de diseño, tiempo de retención, velocidad de diseño y eficiencia de remoción de DBO_5 y el diseño de doble cámara se basa en las recomendaciones dadas por De la Torre (2010) y la Armada (1988) En cuanto al dimensionamiento del mismo y eficiencia de remoción de DBO_5 :

| ESTIMACION CAUDAL GENERADO DE LIXIVIADOS | | |
|--|--------------|--------------------------|
| Precipitación promedio anual (p) = | 480.90 | Mm |
| Evaporación anual (E) = | 165.00 | Mm |
| Coefficiente de escorrentía (C_e) = | 0.05 | Suelo arenoso plano |
| Escorrentía ($E_s = p * C_e$) = | 24.05 | Mm |
| Infiltración en 24 hrs ($I = p - E - E_s$) = | 0.80 | Mm |
| Área del relleno (A) = | 9144.16 | m ² |
| Coefficiente de grado de compactación (K) = | 0.25 | |
| Caudal promedio de lixiviado (Q) = | 0.021 | l/s |
| | 1.828 | m³/día |
| DBO_5 lixiviado = | 20,000 | mg/l |

| LECHO BIOLÓGICO EN DRENAJE | | |
|---|--------|--------------------------------|
| Carga de DBO (W) = | 36.56 | kg/día |
| Longitud promedio del dren = | 100.00 | m |
| Alto del dren = | 0.40 | m |
| Ancho de frente de flujo asumido = | 1.00 | m |
| Volumen del medio de contacto (V) = | 40.00 | m ³ |
| $Q_{\text{recirculado}}/Q_{\text{efluente}}$ (R) = | 0.00 | |
| Factor de recirculación (F) = | 1.00 | |
| Eficiencia de remoción de DBO ₅ (E) = | 70% | |
| DBO ₅ remanente = | 5,950 | mg/l |
| SEDIMENTADOR PRIMARIO DE DOBLE CAMARA (FOSA SÉPTICA) | | |
| Tiempo detención = | 2 | días |
| Volumen requerido = | 3.66 | m ³ |
| Velocidad de sedimentación de diseño = | 6.0 | m/h |
| Altura = | 1.20 | m (+0.20 libres) |
| Ancho = | 1.20 | m |
| Área pared (Ap) = | 1.44 | m ² |
| Área orificios (Ao = 5% de Ap) = | 0.072 | m ² |
| Diámetro tubería de PVC D = | 200 | mm |
| Sección transversal tubo PVC = | 0.03 | m ² |
| Número necesario de orificios = | 2.3 | |
| Número asumido de orificios = | 3 | |
| Longitud total ajustada = | 2.60 | m |
| Longitud cámara 1 = | 1.00 | m |
| Longitud cámara 2 = | 1.60 | m |
| Eficiencia en la remoción de DBO ₅ = | 30% | |
| DBO ₅ remanente = | 4,165 | mg/l |
| FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE | | |
| Medio de Contacto = | Piedra | |
| DBO ₅ afluente (Si) = | 4,165 | mg/l |
| Caudal (Q) = | 1.83 | m ³ /día |
| Temperatura mínima media de la zona (T) = | 18 | °C |
| Área específica del medio de contacto (As) = | 70 | m ² /m ³ |
| Profundidad efectiva del filtro (Z) = | 0.80 | m |
| Ancho del filtro = | 1.20 | m |
| Largo del filtro = | 2.00 | m |
| Área transversal del filtro (A)= | 2.40 | m ² |
| Porosidad del medio de contacto (n) = | 0.38 | |
| Constante de velocidad de eliminación a 25°C (K ₂₅) = | 0.05 | m/día |
| Kt = | 0.029 | |
| Se/Si = | 0.12 | |
| Eficiencia en la remoción de DBO ₅ = | 88.3 | % |
| DBO ₅ remanente = | 487.57 | mg/l |
| Tiempo detención (TD) = | 0.40 | días |
| | 9.58 | horas |

Tabla 43: Diseño de etapas de tratamiento de lixiviado

A partir de este flujo, con una remoción de DBO_5 mayor al 99%, se procede a evaporar el lixiviado en una piscina de evaporación:

| PISCINA DE EVAPORACIÓN | | |
|-------------------------------|-------|--------------|
| Tiempo detención = | 10 | días |
| Volumen requerido = | 18.28 | m^3 |
| Pendientes laterales | 45 | ° |
| Profundidad máxima = | 0.40 | m |
| Longitud = | 10.00 | m |
| Ancho = | 5.00 | m |

Tabla 44: Diseño de piscina de evaporación de lixiviados

El sistema de drenaje aportará a una reducción considerable de la carga orgánica.

Como se tiene dos fosas sépticas en serie la longitud total de las dos fosas será de 2,60 m. Las fosas sépticas tendrán dispositivos de entrada, salida e inspección.

Con el fin de reducir la carga de DBO en el efluente final, se ha planteado un tratamiento de tipo biológico, consistente en un filtro anaerobio de flujo ascendente con medio de contacto que favorezca el desarrollo de biopelícula y por lo tanto aumente la eficiencia del tratamiento.

El medio de contacto en el filtro está constituido por material pétreo con un granulometría que puede variar entre 4 cm y 7 cm, con una altura del lecho de 0,80 m.

La pared entre la fosa séptica y el filtro está compuesta por una estructura que soporta el medio filtrante y de orificios de 10 cm en el primer tercio desde el fondo de la pared, los mismos que conducen el agua residual hacia el medio filtrante. En la parte superior cuenta con una tubería perforada que recoge el agua tratada y la conduce hacia el efluente final.

Se estima que el tiempo de retención de líquido en la piscina de 10 días será suficiente para permitir la evaporación del líquido durante la mayoría de meses. Debido a la variabilidad climática (existen meses con precipitaciones mayores a 300 mm y otros prácticamente sin precipitaciones, de acuerdo a los anuarios meteorológicos del INHAMI), es importante diseñar para retener flujos altos. Sin

embargo, se debe tomar en cuenta la ocurrencia de eventos climáticos especiales, como lo es el Fenómeno de El Niño, en cuyo caso se puede recircular el lixiviado hacia el relleno, el cual actuaría como un filtro biológico por sí mismo. Adicionalmente, se prevé una altura adicional de 0.30 m sobre el nivel calculado en caso de existir mayores volúmenes.

3.9.4. TRATAMIENTO DE GASES

Para la captación de gases generados en el relleno se ha previsto la construcción de chimeneas. Las chimeneas se ubican sobre la base preparada del relleno.

La geometría y forma de operación del relleno sanitario está directamente relacionada con la generación y migración de gases. Para su diseño, se debe considerar que se trata de un relleno sanitario tipo zanja en donde no hay vías de evacuación de gases en los taludes laterales, que se prevé una compactación adecuada de los residuos y la aplicación de una capa de cobertura diaria. Por tanto, se recomienda la utilización de un sistema pasivo con chimeneas que evacúen los gases fuera del relleno sanitario.

Se ubicarán en forma de cuadrícula con un espaciamiento 20 m entre ellas, distancia la cual se considera adecuada debido a la geometría del sitio antes descrita (De la Torre, 2010). Estas serán ubicadas directamente sobre la base de drenaje de lixiviados. De esta manera se aprovechará el mismo dren para conducir ambos residuos. La elección de la separación entre

La sección de la chimenea corresponde a un diseño sencillo, el cual cuenta con un sobredimensionamiento por facilidad constructiva y garantizar la evacuación correcta. Serán cuadradas de 0.40 m X 0.40 m , totalizando un área transversal cuadrada de 0.16 m² en base a recomendaciones de De la Torre (2010).

Los aspectos constructivos de la chimenea serán en base al criterio de minimizar costos, por lo que se construirán con palos en los vértices y con malla de gallinero en su perímetro. A su interior se colocará piedras de 5 a 15 cm de diámetro.

Se ha previsto adicionalmente contar con una boquilla que permita la quema de los gases generados, la cual requerirá un monitoreo constante para verificar que esta permanezca encendida en la fase de operación.

3.9.5. DRENAJE DE AGUAS LLUVIAS

Se requiere la ubicación de una serie de cunetas perimetrales para interceptar el agua lluvia y evitar que estas ingresen al relleno aumentando el caudal de líquidos lixiviados.

Las cunetas para evitar escurrimiento de agua superficial al relleno deberán ser implementadas a lo largo del perímetro del relleno.

Es necesario el diseño de dos tipos de cunetas debido a las distintas etapas del relleno:

- Temporales: Tienen por objeto evitar que durante la operación diaria de las celdas ingresen aguas lluvias durante toda la vida útil del relleno, por lo que su ubicación dependerá de los requerimientos durante la operación, no requieren de revestimiento.
- Permanentes: Tienen por objeto interceptar el ingreso de agua lluvias a la zona del relleno provenientes de área contiguas al relleno, por lo cual estas se construirán alrededor del perímetro de la plataforma del relleno, las mismas que requieren de revestimiento.

Para el cálculo se debe estimar el caudal que llegará hacia el relleno (Jaramillo, 2002):

$$Q = C \cdot I \cdot A$$

Donde:

- Q = Caudal a ser drenado en m³/s
- C = Coeficiente de escurrimiento superficial
- I = Intensidad de lluvia mm/ min.
- A = Área de recepción de la cuenca

El coeficiente de escurrimiento para suelo fino arenoso es de 0.30. El área de aportación realmente no es considerable por la configuración del terreno y el suelo rocoso. Por efecto de la loma alledaña y depresiones existente, de todas maneras se supone que el caso más crítico para esta etapa del proyecto, será el área de aportación la totalidad del terreno que se encuentra sobre el nivel máximo del relleno, que es de aproximadamente 2 Ha con lo cual se toma una medida de seguridad para evitar el ingreso de aguas lluvias al relleno.

Aplicando las ecuaciones correspondientes, los resultados obtenidos muestran que en base a una intensidad de 100 mm/hora con una duración máxima de 6 horas, se tiene un caudal de $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con el valor de caudal obtenido procedemos a determinar las dimensiones de los canales de recolección de aguas lluvias que se producen en el relleno mediante la ecuación:

$$Q = \frac{1}{n} (S \cdot R_h^2)^{1/2} \quad \text{– Formula de Chezy}$$

$$N = \text{Coeficiente de rugosidad (0,025) – Coeficiente Manning, canal de tierra relleno}$$

$$S = \text{Área mojada, se adopta una cuneta triangular de } 0,30 \times 0,30 = 0,60 \text{ m}$$

$$R_h = \text{Radio hidráulico} = 0.075$$

$$I = \text{Pendiente del canal}$$

$$I = \left[\frac{(0,17 \cdot 0,025)}{(0,60 \cdot 0,075^2/3)} \right]^2$$

$$I = 0,00158$$

$$I = \text{Se adopta } 1\%$$

Con esta pendiente, procedemos a determinar la velocidad del flujo en los canales mediante la ecuación de continuidad:

$$Q = V \cdot S$$

$$V = 0,28 \text{ m/s}$$

Por este motivo, se procede a implementar una cuneta triangular de 0,30 m x 0,30 m, que corresponde a un diseño con dimensiones mínimas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de control de escorrentía.

3.9.6. OBRAS COMPLEMENTARIAS

3.9.6.1. CERRAMIENTO

El cerramiento perimetral se lo construye con postes de madera de matazarno y 5 filas de alambre de púas galvanizado. Adjunto al cerramiento se realizará una siembra con una especie local, a modo de cerca viva para minimizar el impacto visual. Se recomienda también la implementación de una puerta de malla de acceso peatonal y vehicular.

3.9.6.2. CASETA DE CONTROL Y BODEGA

Se ha establecido la construcción de una guardianía para el control de ingreso de personal y vehículos. Deberá disponer de facilidades para el personal, con baño y bodega para almacenar herramientas menores. Área aproximada recomendada no mayor a 10 m².

Debido a que no existe una red de alcantarillado ni de agua potable municipal que llegue al sitio, se prevén las siguientes medidas:

Dicha caseta de control requerirá de una red interna de alcantarillado para el manejo de aguas servidas generadas en las diferentes unidades que permitirá descargar directamente en el sistema de tratamiento de líquidos lixiviados. Longitud de la red aproximada: 20 m.

Se requiere adicionalmente una cisterna de agua potable para el consumo de la unidad sanitaria, será necesario disponer de una cisterna de 6 m³. El suministro de agua se lo hará mediante tanqueros.

De igual forma serán necesarios todas las instalaciones de artefactos sanitarios y puntos de agua.

3.9.6.3. VÍAS INTERNAS Y DE ACCESO

La vía de acceso va desde la carretera desde Puerto Baquerizo Moreno a la playa de La Lobería constituye un camino de acceso hacia el relleno en condiciones de operación normales.

Se contará con una vía que permita el acceso hacia la plataforma de maniobras, así como hacia la plataforma donde se emplazará el relleno sanitario. Debido a que el acceso hacia el patio de maniobras ya forma parte de la topografía de la mina, esta será de 6 m de ancho. Se debe adecuar una vía lastrada del mismo ancho hacia la plataforma del relleno que permita el acceso hacia el frente de trabajo de la celda diaria, de 3 m de ancho debido a que existe un solo camión recolector, la misma que es diseñada con una pendiente de 6%. Esta debe tener una base granular de al menos 20 cm para evitar su erosión. Su geometría se verá modificada cada vez que se concluya cada capa del relleno para satisfacer las necesidades de acceso al frente de trabajo.

3.9.6.4. EQUIPO Y MAQUINARIA PARA LA OPERACIÓN

Para la operación del relleno sanitario se ha previsto contar con una mini - cargadora que es suficiente para la generación de residuos de la ciudad de San Cristóbal, este equipo contará con un rodillo vibrador como accesorio, que permita la compactación de los residuos y de la capa de cobertura para alcanzar los 600kg/m³. Adicionalmente se requiere como equipo de apoyo una volqueta (períodos cortos) para preparar material de cobertura y una retroexcavadora sobre ruedas.

3.9.7. CIERRE TÉCNICO

El sitio se recuperará para que guarde el tono con el paisaje natural y evitar la erosión del relleno, para lo cual se ha dispuesto que se contará con una cobertura de tierra vegetal o negra, la que permitirá el re-poblamiento natural de pasto en todo el relleno, este proceso será conforme se lleguen a los niveles finales previstos en el relleno.

Adicionalmente, se contará con arboles nativos, palo santo, y arbustos como rodilla de caballo.

3.10. ESTUDIO ECONÓMICO

En base a las referencias obtenidas del Municipio de San Cristóbal y el cálculo realizado, se tiene el siguiente costo actual de operación y mantenimiento de sistema de gestión de residuos sólidos:

| Tarifas del servicio en situación actual Sin Proyecto | |
|--|-------------------|
| DESCRIPCIÓN | 2010 |
| DEMANDA | |
| Población (ha) | 8,087 |
| % de Cobertura del servicio | 0.98 |
| Población servida (ha) | 7,925 |
| Producción de basuras (Kg./ha/día, PPC) | 0.85 |
| Producción de basuras (Ton/día) | 6.89 |
| Producción de basura anual (ton/año) | 2,516 |
| Número de usuarios (Predios urbanos y rurales) | 2,692 |
| GASTOS EN EL SERVICIO | |
| Operación y Mantenimiento (\$) | \$ 223,098 |
| Total de Gastos anuales (\$) | \$ 223,098 |
| TARIFA PROMEDIO ANUAL | |
| Tarifa promedio Operación y Mant./usuario | \$ 82.87 |
| Tarifa promedio Operación y Mant./Ton | \$ 88.67 |
| TARIFA PROMEDIO MENSUAL | |
| Tarifa promedio Operación y Mant./usuario | \$ 6.91 |
| Tarifa promedio Operación y Mant./Ton | \$ 7.39 |

Tabla 45: Tarifa actual del servicio

Incluyendo la presente propuesta para el relleno sanitario, los costos operativos serían los siguientes. Dichas cifras fueron proporcionadas por el economista Félix Cruz (2010):

| Tarifas del servicio proyectada | |
|--|------------------|
| DESCRIPCIÓN | 2010 |
| DEMANDA | |
| Población (ha) | 8,087 |
| % de Cobertura del servicio | 0.98 |
| Población servida (ha) | 7,925 |
| Producción de basuras (Kg./hab/día, PPC) | 0.85 |
| Producción de basuras (Ton/día) | 6.89 |
| Producción de basura anual (ton/año) | 2,516 |
| Número de usuarios (Predios urbanos y rurales) | 2,692 |
| Habitantes por predio/incremento de usuarios | 3.00 |
| GASTOS EN EL SERVICIO | |
| Operación y Mantenimiento (\$) | \$ 301,648 |
| Depreciación inversión inicial | \$ 46,640 |
| Total de Gastos anuales (\$) | \$ 348,288 |
| Sostenibilidad 20% | \$ 60,330 |
| Total de Gastos anuales + Sostenibilidad (\$) | \$ 408,618 |
| TARIFA PROMEDIO ANUAL | |
| Tarifa promedio Operación y Mant./usuario | \$ 112.05 |
| Tarifa promedio OyM + Depreciación./usuario | \$ 151.79 |
| TARIFA PROMEDIO MENSUAL | |
| Tarifa promedio Operación y Mant./usuario | \$ 9.34 |
| Tarifa promedio OyM + Depreciación./usuario | \$ 12.65 |
| Tarifa promedio Operación y Mant./Ton | \$ 119.89 |
| Tarifa promedio OyM + Depreciación./Ton | \$ 162.41 |

Tabla 46: Tarifa proyectada del servicio

Los costos antes reflejados representan los gastos operativos para el sistema completo, incluyendo Recolección, barrido, compostaje y reciclaje, disposición final y gastos administrativos.

En cuanto al diseño anteriormente propuesto, los costos de infraestructura inicial son los siguientes, según lo proporcionado por Félix Cruz (2010):

| PRESUPUESTO DE CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO | |
|--|---------------------|
| DESCRIPCION | PRECIO TOTAL |
| Vía de ingreso | \$15,684.58 |
| Movimiento de tierras, impermeabilización y drenaje | \$206,254.81 |
| Cunetas de coronación protección de taludes | \$14,905.23 |
| Drenajes lixiviados | \$8,883.02 |
| Construcción de chimeneas | \$464.03 |
| Cerramiento del relleno sanitario | \$9,300.53 |
| Instalaciones eléctricas | \$14,826.30 |
| Caseta de control | \$8,814.95 |
| Cisterna Agua potable | \$3,769.71 |
| Instalaciones hidráulicas y sanitarias | \$1,313.21 |
| Fosa séptica caseta de control | \$1,386.68 |
| Filtro flujo ascendente anaerobio | \$8,942.28 |
| Piscina evaporación lixiviados | \$2,494.71 |
| | |
| Total: | \$297,040.04 |
| | |
| Cierre relleno (año 15) | \$66,227.50 |

Tabla 47: Presupuesto de construcción del relleno sanitario

En cuanto al costo de operación del relleno sanitario propuesto, se tienen los siguientes datos:

| COSTOS OPERATIVOS DEL RELLENO SANITARIO | | | | |
|--|----------|---------|--------------------------|--------|
| Costos directos | | | \$3,092 | |
| Costos indirectos | | 9% | \$283 | |
| Costo total mensual | | | \$3,375 | |
| Costo anual | | | \$40,500 | |
| COSTO UNITARIOS | | | COSTOS POR PREDIO | |
| | ton/mes | 64 | Viviendas | 2,692 |
| | \$ / ton | \$52.77 | \$/mes/vivienda | \$1.25 |
| | | | 2% Sostenibilidad | \$1.28 |

Tabla 48: Costos operativos del relleno sanitario

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se ha determinado la necesidad de conformar una base teórica extensa para la realización adecuada de un relleno sanitario, sin la cual no es posible la

realización de un diseño óptimo ya que se trata de un proyecto multidisciplinario de alta complejidad.

- El entendimiento y predicción de los procesos por los cuales atraviesa los residuos sólidos dentro de un relleno sanitario son cruciales para entender su comportamiento y diseñar de acorde a la vida útil del proyecto.
- Se realizaron todos los estudios de campo necesarios para la realización del proyecto, así como el levantamiento de información requerido para poder dimensionar sus componentes.
- Se ha determinado una generación de basura promedio para la población, en base a la cual se dimensionaron las diferentes estructuras.
- Dichos volúmenes de generación y las características de los residuos son muy variables y dependen de una vasta cantidad de factores.
- La impermeabilización inicial y el sistema de drenaje son cruciales para controlar la infiltración de contaminantes hacia el terreno, y se lo evaluó basado en su desempeño frente a otras opciones.
- La implementación de un relleno sanitario presenta la mejor opción para la adecuada disposición final de los residuos sólidos, ya que permite controlar y disminuir la migración de contaminantes, proliferación de roedores, insectos y otros animales pequeños, así como evitar la transmisión de enfermedades a causa de los vectores antes descritos, y a su vez solucionar un problema estético.
- El diseño del relleno fue realizado en base a garantizar el mínimo impacto ambiental posible, por lo que se consideró reutilizar un sitio estéticamente deteriorado y se utilizó una compleja capa de impermeabilización y drenaje.
- Se ha tomado en cuenta las posibilidades de recursos del Municipio para el diseño del relleno sanitario, el cual incluye sistemas económicos de tratamiento de lixiviados y gases.
- Las condiciones climáticas son cruciales para el diseño del relleno sanitario, ya que deben ser apropiadas para las estaciones de lluvia y de sequía.
- Es fundamental la implementación de rellenos sanitarios en poblaciones pequeñas, ya que la situación generada por residuos no tratados adecuadamente puede resultar muy costosa, y puede generar daños permanentes.

- Cualquier proyecto de disposición final de residuos sólidos debe contar con la realización de un estudio de cantidad y calidad de residuos sólidos, base fundamental para el correcto diseño del mismo.
- Es fundamental tomar en cuenta todos los aspectos que incurren en el proceso de gestión de residuos sólidos, para optimizar los procesos y establecer mecanismos que permitan un menor impacto ambiental, menores costos y mejorar la calidad de vida.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Albán, Galo. "Estudio Geológico de la mina de Cerro Quemado en San Cristóbal, Galápagos". Quito. 2010.
2. "Análisis sectorial de residuos sólidos: Ecuador". OPS-OMS. Ecuador. 2002.
3. "Anuario Meteorológico" INAMHI. Ecuador. 2006.
4. Bouazza, A., & Van Impe, W.F., "Liner design for waste disposal sites". *Environmental Geology*. 38:1 (1998). 41–54.
5. Castillo, Marcelo. "Diagnóstico y caracterización de los líquidos percolados del botadero de Zámiza". Escuela Politécnica Nacional, Quito. 1994.
6. Censo de población y vivienda. INEC-INGALA, Ecuador. 2006.
7. Censo de población y vivienda. INEC-INGALA, Ecuador. 2001.
8. Collazos, H. *Diseño y Operación de rellenos Sanitarios*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Cali. 2003.
9. Cruz, Félix. "Estudio Económico del nuevo relleno sanitario de San Cristóbal, Galápagos". Quito. 2010.
10. De la Torre, Francisco. Entrevista Personal. 25 de abril 2010.
11. "Domestic Wastewater Treatment". Armada y Fuerza Aérea USA, AFM 88-11. Vol 3. Estados Unidos. 1988.
12. Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K., & Bonaparte, R. "Rate of Leakage Through a Composite Liner due to Geomembrane Defects". *Geotextiles and Geomembranes*, 11:1 (1992). 1-28.
13. Giroud, J.P., & Bonaparte, R. "Leakage through Liners Constructed with Geomembranes, Part I : Geomembrane Liners". *Geotextiles and Geomembranes*, 8:1 (1989a). 27-67.
14. Giroud, J.P., & Bonaparte R. "Leakage through Liners Constructed with Geomembranes, Part II : Composite Liners". *Geotextiles and Geomembranes*, 8:2 (1989b). 71-111.
15. Hamman, O. "Plant communities of the Galapagos Islands". *Dansk Botanisk Forening*. 1981.
16. Ingala, Orstom y Ponareg. *Inventario Cartográfico de los Recursos Naturales, Geomorfología, Vegetación, Hídricos, Ecológicos y Biofísicos de las Islas Galápagos, Ecuador*. Edición Ingala. Quito. 1987.

17. Instituto Nacional Galápagos. INGALA. 2008. 15 de marzo 2010.
<www.ingala.gov.ec>
18. Jaramillo, Jorge, "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales." Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Perú. 2002.
19. McBean, E. A., F. A. Rovers, and G. J. Farquhar, 1995. *Solid Waste Landfill Engineering and Design*. Prentice Hall PTR, New Jersey. 1995.
20. *Proyecto de Ordenamiento Territorial de la Provincia de Galápagos*. Fundación Natura – INGALA. Ecuador. 2002
21. Röben, Eva. "Diseño, construcción, operación y cierre de Rellenos Sanitarios Municipales." Ilustre Municipalidad de Loja. Loja. 2002.
22. Sakurai, Kunitoshi. "Método Sencillo de análisis de Residuos Sólidos Municipales. CEPIS, Hojas de divulgación técnica. Lima. 1983.
23. "San Cristobal Island". *Galapagos Cruises*. Galasam. 2007. 15 de marzo 2010.
<<http://www.galapagoscruises.com.au/galapagos-islands-information/new%20islands/sancristobal.html>>
24. Santos, Fabian. "Climatología". *Infogalápagos*. 2009. 15 de marzo 2010.
<<http://infogalapagos.ec:443/WikiGala/Wiki.jsp?page=CLIMATOLOGIA.>>.
25. Valencia, Guillermo. "Filtros Biológicos". CEPIS. Lima. 1976.

**Relleno sanitario de la isla San Cristóbal, provincia de
Galápagos: Diseño e impermeabilización**

ANEXO No. 1
Planos de diseño