

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

Trabajo de diploma en opción al título de Ingeniero Geólogo

Título:

**Esquema hidrogeológico para la infiltración de los lixiviados
del relleno sanitario La Rosa.**

Autor:

Leonel Rodríguez González

Tutores:

**Ing. Luis Fidel Miranda Castañeda
Dr. Constantino de Miguel Fernández**

Julio de 2005

“Año de la Alternativa Bolivariana para Las Américas”

PENSAMIENTO.

*Cuando las cosas vayan mal como a veces pasa,
Cuando el camino parezca cuesta arriba,
Cuando tus recuerdos mengüen y tus deudas suban,
Y al querer sonreír solo suspiras.
Cuando tus preocupaciones te tengan agobiado,
Descansa si te urge, pero no te rindas.*

*Así que no te rindas, aunque el paso sea lento,
El triunfo puede estar a la vuelta de la esquina,
El triunfo es el fracaso al revés.
Por eso, decídete a luchar, sin duda,
Porque en verdad,
Cuando todo empeora, el que es valiente,
No se rinde, ¡Lucha!*

Pablo Neruda.

DEDICATORIA.

A mi madre, mi padre, mi hermano y familia en general, por permitirme alcanzar, gracias a todo su amor, sacrificio y apoyo, uno de mis sueños más deseados.

AGRADECIMIENTOS.

A la Revolución Cubana por brindarme la oportunidad de poder ser un profesional

A toda mi familia, especialmente a mis padres, hermanos, primos y tíos por todo su cariño y ayuda...

A mis tutores Dr. Constantino de Miguel y especialmente al Ing. Luis Fidel Miranda por su amistad, ayuda incondicional y acertados consejos en la realización de este trabajo.....

A los compañeros de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Ciego de Ávila, en especial a los pertenecientes a la U.E.B. – 1: Jacqueline Hernández, Sonia Moya, Serguey Fernández, Roberto Vásquez y Luis Valero (el Flaco), por todos sus aportes y colaboración....

A todos los profesores que han intervenido en mi formación como profesional durante estos 5 años de carrera, fundamentalmente los que pertenecen al Departamento de Geología del I.S.M.M. de Moa.....

A mis compañeros y amigos de cinco años de estudio.....

A mis amistades más personales, por toda la comprensión y ayuda incondicional que me han brindado, especialmente en estos últimos tiempos.....

A los compañeros Osmín de la Paz Conde y Rolando González Santana por su paciencia y cooperación.....

Finalmente a todos aquellos que en su momento, han contribuido a mi formación como ingeniero y a la realización de este trabajo.

RESUMEN:

El presente trabajo tiene como objetivo, esclarecer las condiciones hidrogeológicas del área de estudio para la infiltración de los lixiviados del relleno sanitario, así como de las aguas totales que pueden acumularse en este, por concepto de precipitaciones directas sobre el área de vertido.

Para garantizar la ejecución de este estudio, se cumplieron una serie de trabajos preparatorios, de campo y de gabinete, los cuales incluyeron la recuperación de toda la información existente acerca de la zona de estudio y el procesamiento de esta, así como la preparación de la base cartográfica 1:25 000 y 1:10 000, básica para el reconocimiento de la zona. Se realizó un levantamiento geológico – hidrogeológico y a partir de todos los datos obtenidos se confeccionaron con la utilización de diferentes programas (Excel, Aquitest, Surfer 8 y Autocad Map), una serie de mapas, perfiles y tablas, que se usaron junto a otros datos, para el cálculo e interpretación de los resultados que se muestran en esta investigación.

A partir del volumen de trabajos realizados, se pudo determinar que según el comportamiento histórico, los máximos valores de lixiviados generados en el relleno sanitario son de 59.10 mm/mes, los que equivalen en las 6 hectáreas que este ocupa, a un volumen total de 3 546 m³/mes, siendo entonces el caudal máximo medio a infiltrar de 1.37 L/s. Igualmente se conoció que los gastos máximos a infiltrar por la acumulación en el relleno sanitario, de los lixiviados y aguas de precipitaciones directas sobre el área de vertido, oscilan entre 131.0 y 735.0 L/s, según una lluvia máxima del 1% de probabilidad de 350 mm, para diferentes probabilidades de ocurrencia y tiempos de evacuación. El número de pozos a construir con un gasto mínimo de 57.82 L/s, para evacuar tales gastos máximos, según las condiciones expuestas, varía entre los 3 y 13 pozos, en dependencia de la elección del inversionista. Por último se determinó, que los horizontes más factibles para la infiltración de los lixiviados son los formados por las calizas de las formaciones Güines y Chambas.

SUMMARY:

The present investigation was realized with the objective of clarify the hydrogeological conditions in the study area to infiltrate the landfill lixiviates and pluvial water accumulated in the landfill.

To guarantee the execution of this study, were accomplished several previous works, field and office works, being analyzed and processed all existing information about this area, as well as the preparation of the cartographic base 1:25 000 and 1:10 000, basic for the recognition of the zone. Were realized geological and hydrogeological surveys and with the data obtained in these ones and the previous data were realized: several maps, geological and geophysical cross-sections and tables. These results were very useful to do the calculus and interpretations showed in this investigation.

From the volume of made works, it was possible to be determined that according to the historical behavior, the maximum values of landfill lixiviates is 59.10 mm/month, that means in the 6 hectares of surface a total volume of 3 593 m³/month, being then maximum average rates of pluvial water to infiltrate are between 131.0 and 735.0 L/s, 1 % of probability rainfall of 350 mm to different occurrence probabilities and times of evacuation. The number of wells to do, with a minimum rate of 57.82 L/s, to evacuate the rates of pluvial water vary between 3 and 13 wells. For last, was determined that the horizons more fictile for infiltrate the landfill lixiviates and pluvial water accumulated in the landfill are the limestones of the Güines and Chambas Formations.

ÍNDICE.

	Páginas.
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	5
1.1 <i>Ubicación</i>	5
<i>geográfica.....</i>	
1.2 Clima.....	5
1.3 Hidrografía.....	8
1.4 Geomorfología.....	8
1.5 Flora.....	9
1.6 Fauna.....	9
1.7 Vías de acceso.....	10
1.8 Caracterización económica.....	10
CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DE LA REGIÓN Y EL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
2.1 Características geológicas.....	11
2.2 Estratigrafía.....	16
2.3 Tectónica.....	21
2.4 Características hidrogeológicas.....	22
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	24
3.1 Recopilación y análisis de la información existente.....	24
3.1.1 Determinación de las condiciones geológicas.....	24
3.1.2 Determinación de las propiedades geofísicas del medio.....	25
3.1.3 Determinación de las condiciones hidrogeológicas.....	27
3.1.4 Análisis de los lixiviados.....	28
3.2 Levantamiento geólogo-hidrogeológico.....	29
3.3 Procesamiento y análisis de la información.....	30
3.4 Determinación del volumen de lixiviados y total de aguas a infiltrar del relleno sanitario.....	31
3.5 Estimación del caudal que se puede infiltrar en las secuencias del Neógeno y número de pozos necesarios para evacuar las aguas totales.....	32

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	
OBTENIDOS	33
4.1 Contaminación del medio hídrico por lixiviados.....	33
4.2 <i>Especificaciones sobre el vertimiento de aguas residuales (lixiviados) a las aguas terrestres y cuerpos receptores.....</i>	36
4.3 Esclarecimiento de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio.....	40
4.3.1 Análisis de las hidroisohipsas y de los niveles.....	41
4.3.2 Análisis del comportamiento hidroquímico.....	42
4.3.3 <i>Cálculo de los parámetros hidráulicos del acuífero.....</i>	43
4.3.4 <i>Análisis de los resultados obtenidos por los métodos utilizados...</i>	49
4.4 Cálculo del volumen de lixiviados y total de aguas a infiltrar.....	51
4.5 Alternativas para la infiltración de los lixiviados y las aguas pluviales que se pueden acumular en relleno sanitario.....	54
4.6 Monitoreo de la calidad de las aguas.....	58
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA	
PLANOS Y ANEXOS	

INTRODUCCIÓN:

El problema de los residuos sólidos urbanos, en la gran mayoría de los países, y particularmente en determinadas regiones, se viene agravando como consecuencia del acelerado crecimiento de la población y su concentración en las áreas urbanas, del desarrollo industrial, los cambios de hábitos de consumo y mejor nivel de vida, así como también debido a otra serie de factores que conllevan a la contaminación del medio ambiente y al deterioro de los recursos naturales.

Los problemas ocasionados por un inadecuado manejo de esos desechos están afectando, tanto a las grandes ciudades y sus zonas marginales, como a las pequeñas poblaciones rurales. La disposición sanitaria final de los residuos sólidos urbanos, debido a la escasez de recursos económicos, constituye el punto crítico de los servicios de aseo urbano de los distintos países de nuestro hemisferio.

La Organización Panamericana de la Salud, consiente de esta situación y considerando que: el “relleno sanitario” es una técnica de eliminación final de los desechos sólidos en el suelo, que no causa molestias ni peligros para la salud, seguridad pública y el medio ambiente, durante su operación ni después de terminado el mismo; ha venido promoviendo en los países del área, el uso de esta forma de disposición final de los residuos sólidos, teniendo en cuenta también, que es una obra que está al alcance de las municipalidades de la región, debido a que no requiere grandes recursos técnicos ni financieros para su funcionamiento.

En esta y otras obras construidas para estos fines, la descomposición o putrefacción natural de la basura, produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, muy parecido a las aguas residuales domésticas (aguas servidas) pero mucho más concentrado, que posee una elevada carga contaminante y constituye la principal fuente de polución que genera el vertido de residuos sólidos urbanos. Estas sustancias pueden verse incrementadas en caudal y diluidas por las aguas de lluvia o escorrentía superficial que entran en contacto con la masa de basura, de ahí la importancia de interceptar y desviar las aguas de escorrentía y pequeños hilos de agua antes del inicio de la operación del relleno, puesto que si el volumen de este líquido aumenta demasiado, puede causar no solo problemas en el funcionamiento del mismo, sino también contaminar las corrientes de agua y pozos vecinos.

Desde hace ya algún tiempo, en diferentes partes del mundo, se vienen realizando numerosas investigaciones y trabajos con vistas a lograr una adecuada gestión de estos residuos líquidos, de modo que se minimicen y controlen los impactos negativos que estos pueden provocar sobre el medio ambiente. En este contexto y según las experiencias obtenidas por los Programas de Aseo Urbano, con la aplicación de la metodología del relleno sanitario en distintas comunidades latinoamericanas, principalmente en pequeños poblados y zonas urbanas marginales de las grandes ciudades; el Programa de Salud Ambiental para los países de América Latina y el Caribe recomienda, que como el área promedio a rellenar para situar los desechos sólidos de tales poblaciones no es muy grande y los volúmenes de percolado entonces serán también pequeños, se puede optar por su infiltración en el subsuelo. Esta opción se justifica debido a que, con el paso del tiempo, la carga contaminante de los lixiviados disminuye una vez terminado el relleno, donde además el suelo actúa como filtro natural. Si antes de su infiltración, dichas sustancias se someten a un sistema de tratamiento primario, que asegure que los efluentes obtenidos como resultado de tal proceso, cumplan con las normas y requisitos existentes para la preservación de la calidad de las aguas subterráneas, el efecto negativo que provocan los mismos sobre el medio hídrico disminuye notablemente.

En Cuba, siguiendo la tendencia mundial de lograr un mayor cuidado y respeto al medio ambiente y según las recomendaciones dadas por la Organización Panamericana de la Salud, se promueve y fomenta el uso de la técnica de relleno sanitario para la disposición sanitaria final de los residuos sólidos producidos por numerosos poblados y ciudades del país, prestándosele particular interés, al control y seguimiento de los lixiviados generados en estos, posibilitando así que disminuyan los riesgos y afectaciones que estos pueden provocar.

Un ejemplo de la aplicación en el país de tal metodología, lo constituye, la construcción y operación del relleno sanitario "La Rosa", encargado de efectuar la disposición sanitaria final de una parte de los residuos sólidos generados por la ciudad de Morón y el poblado de Santa Sofía, siendo igualmente necesario para este, lograr una adecuada gestión de los lixiviados generados en él. De acuerdo con esto y con vista a dar respuesta a la tarea técnica emitida por la entidad proyectista de la UEB-1 de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Ciego de Ávila (Anexo 1), se realizó el presente estudio

hidrogeológico para la infiltración de los lixiviados generados en el relleno sanitario “La Rosa”, siguiendo para ello la metodología de investigación siguiente:

Objetivo del trabajo: Esclarecer las condiciones hidrogeológicas del área de estudio para la infiltración de los lixiviados del relleno sanitario, así como de las aguas totales que pueden acumularse en este, por concepto de precipitaciones directas sobre el área de vertido.

Problema que resuelve: La disposición final de los lixiviados del relleno sanitario La Rosa y las aguas de precipitaciones directas que pueden acumularse en este.

Objeto de estudio: Condiciones geológicas e hidrogeológicas de la zona aledaña al relleno sanitario La Rosa.

Hipótesis: Con una investigación hidrogeológica precisa del área de estudio, es posible determinar la factibilidad para infiltrar los lixiviados generados en el relleno sanitario La Rosa y las aguas totales que por precipitaciones directas sobre el área de vertido, pueden acumularse en este.

Marco teórico conceptual: Los estudios para la infiltración de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios y otras técnicas de disposición final de residuos sólidos urbanos, se vienen realizando en el mundo desde finales de la década de 1970, a raíz de los disímiles problemas ambientales causados por el vertimiento incontrolado de los desechos urbanos y la gestión casi nula de los lixiviados y emisiones de gases resultantes de estos. Los países pioneros en la realización de tales trabajos fueron fundamentalmente Alemania, Canadá y España, a través de la ejecución de investigaciones conjuntas entre diferentes universidades y los gobiernos municipales de las poblaciones afectadas. En América Latina y en Cuba, estos estudios se comenzaron a realizar a mediados y finales de la década de 1980, bajo la supervisión y capacitación de especialistas provenientes de los países con experiencia en el tema y el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud, contando además, con el interés y participación de los diferentes organismos e instituciones relacionados con la protección del medio ambiente y el manejo de los recursos hídricos. De acuerdo con esto, la ejecución del presente trabajo, se basa en los resultados y experiencias obtenidas en Latinoamérica y Cuba, por la realización de investigaciones de este tipo.

Justificación de la investigación: Esta investigación se realiza para dar solución a la tarea técnica emitida por la entidad proyectista de la UEB-1 de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Ciego de Ávila, de infiltrar los lixiviados generados en el relleno sanitario La Rosa y las aguas totales que por precipitaciones directas sobre el área de vertido, pueden acumularse en este.

Principales resultados a obtener: Se determinará, a partir de la recopilación y análisis de toda la información disponible acerca del área de estudio y la realización de los trabajos de campo correspondientes, los posibles cuerpos receptores y sus características hidráulicas, se esclarecerán las características físico-químicas de las aguas, así como la profundidad de las mismas y su dirección predominante de flujo. Se conocerá el volumen y caudal de lixiviados y aguas totales que pueden acumularse en el relleno sanitario, así como el número de pozos necesarios para evacuar estas.

CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOGRÁFICAS DE LA REGIÓN DE ESTUDIO.

1.1- Ubicación Geográfica:

El área de estudio se encuentra enclavada en el municipio Morón, provincia Ciego de Avila, al este de la ciudad de Morón y el poblado de Patria, a unos 1500 m al noreste del poblado de Saladrigas y a aproximadamente la misma distancia al suroeste del poblado de Santa Sofía (Cooperativa “La Rosa”), en el margen oeste del camino que une a los dos poblados antes mencionados (Plano 1). Cartográficamente dicho sector se encuentra en la Hoja Morón (4482-II) del Mapa de la República de Cuba a escala 1:50 000, editado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía en 1977, enmarcándose dentro del Sistema Cuba Norte entre las coordenadas Lambert siguientes:

X	Y
749 263	256 000
749 263	251 650
753 642	251 650
753 642	253 468
750 339	256 000

Tabla 1.1- Coordenadas que delimitan el área de estudio.

1.2- Clima:

Al igual que en todo nuestro país el clima es propio de zonas tropicales húmedas, donde con frecuencia se registran altas temperaturas. La temperatura media del aire es de 24.4 °C, siendo el mes más frío, según el comportamiento histórico, enero con 21.3 °C de temperatura promedio y el más caliente julio con 27.2 °C de temperatura promedio (Tabla 1.2), aunque se han registrado valores muy inferiores y mayores a estos. Constituyen los mínimos y máximos absolutos los siguientes registros: 4.5 °C el 3 de marzo de 1986 y 37.3 °C el 29 de abril de 1971. Estos datos fueron obtenidos por la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos en la Estación Hidrometeorológica de Violeta.

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Med. Anua I
Tem. Med. (°C)	21. 3	21. 4	22. 7	24. 1	25. 6	26. 5	27. 2	26. 9	26. 2	25. 2	23. 7	21. 9	24.4

Tabla 1.2 - Valores medios de temperatura del aire °C.

Las lluvias están enmarcadas en dos periodos bien definidos: seco y húmedo. La precipitación media hiperanual es de 1171.00 mm, registrándose los máximos valores en el año 2002 con 1960.50 mm y los mínimos en el año 1965 con 858,50 mm. Estos datos fueron obtenidos según mediciones realizadas en el pluviómetro CA-644 situado al sureste del área de estudio, con más 35 años de observaciones (Anexo 2).

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Precipit. mm/mes	29.65	29.51	43.51	48.85	180.5 7	184.6 2	92.02	118.9 0	178.4 5	142.7 0	78.92	35.54

Tabla 1.3 - Precipitaciones medias históricas por meses (mm/mes).

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Med · Anua al
Horas Luz	6.9	7.7	8.4	8.7	7.9	7.5	8	7.7	7.6	7.2	6.8	6.5	7.6

Tabla 1.4 - Horas Luz.

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Med. Anual
Nubosidad	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	4	4	4.5

Tabla 1.5 - Comportamiento de la nubosidad.

La humedad relativa promedio histórica es del 81 %, siendo abril el mes con más bajo valor de esta variable con 75 % y octubre el más alto con 86 %. (Tabla 1.6).

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Med. Anual
Humedad Relativa	82	79	77	75	80	82	80	82	85	86	85	84	81

Tabla 1.6 - Humedad Relativa.(%)

La dirección del viento se comporta con una media anual de componente este, con una velocidad promedio de 8.95m/h. Aunque se ha llegado a registrar rachas hasta de 177 Km/h el 19 de noviembre de 1985, al paso del huracán Kate por el norte de la provincia (Tabla 1.7).

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Med. Anual
Direcc. del vient	NE	NE	E	E	E	E	E	E	E	E	NE	ENE	E
Veloc. Media Viento	9.6	10.4	11.3	11.6	9.3	7.6	9.2	7.9	6.3	6.6	8.4	9.2	8.95

Tabla 1.7 - Distribución temporal del viento (Km/h)

1.3- Hidrografía:

La red hidrográfica está muy poco desarrollada en el área debido a la ausencia de ríos, la misma esta formada por arroyos y vaguadas con régimen de escurrimiento intermitente ya que su fuente de alimentación fundamental son las precipitaciones. Además de esto existe un sistema de canales hechos por el hombre que se encargan del drenaje superficial de las aguas, desembocando al norte y noreste del sector de estudio en los humedales relacionados con llanuras bajas de mal drenaje.

1.4- Geomorfología:

De modo general la mayor parte del territorio es llano, con algunas formas de relieve ondulado que van disminuyendo al norte, todo ello como consecuencia de la interacción de los procesos morfogenéticos, relacionados con la erosión de las tierras emergidas y los movimientos neotectónicos ocurridos a partir del Mioceno superior. Las mayores cotas oscilan entre los 8 y 10 metros sobre el nivel medio del mar, desarrollándose principalmente hacia la parte central del sector de estudio. En la zona norte, el relieve es más regular, con cotas que oscilan entre los 6 y 4 metros sobre el nivel medio del mar.

1.5- Flora:

La vegetación de modo general es pobre, existen pocas variedades de especies de plantas, a continuación relacionamos las más representativas:

FAMILIA	ESPECIES	NOMBRE COMUN
Poaceae	Dichanthium Annulatun	Pasto Linea
	Cinehrus echinatus	Guizaso
	Cynodon Dachylon	Hierba fina
	Sorghum halepense	Don Carlos
	Paspalum notatum	Alpargata
Convolvulaceae	Turbina corymbosa (L.) Rof.	Campanilla
Asteraceace	Partherium Hysterophorus	Escoba Amarga
Asteraceae	Xanthium strumarium L.	Guizaso de caballo
Enphorbiceae	Enphorbia cyatophora	Hierba lechera
Gramineáceas	Saccharum officinarum	Caña de azúcar
Malpighiaceae	Stigmaphyllum sagraeanum A. Juss.	Bejuco de san pedro
Musáceas	Dichrotachys glorunata	Marabú

Tabla 1.8- Flora.

1.6- Fauna:

Por las características propias del área de estudio la fauna terrestre es pobre. Predomina la clase insecta representada fundamentalmente por los órdenes *Lepidoptera*, *Hymenoptera*, *Diptera*, el resto de los órdenes aparecen con menor número de especies.

Entre las aves se observaron cuatro especies residentes permanentes (Sinsonte, Tojosa, Aura tiñosa y Paloma raviche) y una migratoria de invierno (Bijirita común)

Además por su cercanía al poblado, en el área se observan perros, carneros chivos, *Herpestes aeropunctatus* (Mangosta), conocido comúnmente como hurones. También existen Vacas - *Vos tauro* y Caballos - *Egus caballus*.

1.7- Vías de acceso:

El acceso al área se puede realizar por la carretera que une a la ciudad de Morón con Bolivia hasta la cooperativa "La Rosa", la cual se encuentra en buen estado, también se puede Saladrigas el cual se encuentra en mal estado.

1.8- Caracterización Económica:

La base económica fundamental del territorio esta relacionada con la siembra y labranza de la caña de azúcar y cultivos varios por parte de la Cooperativa de Producción Agropecuaria "La Rosa". También existen centros de desarrollo agropecuario y un criadero de cocodrilos para la visita del turismo nacional e internacional.

CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLOGICAS DE LA REGION Y EL ÁREA DE ESTUDIO.

2.1- Características geológicas:

Desde el punto de vista regional, el territorio cubano es considerado geológicamente en un sentido amplio, como un cinturón plegado y fallado, obducido y acresionado sobre el margen pasivo de Norteamérica, con el desarrollo de cuencas contemporáneas en el período comprendido entre el Cretácico Campaniano Superior y el Eoceno Superior, cubierto por una secuencia sedimentaria oligomiocénica poco deformada (Jesús Blanco, 1996).

En este contexto geológico, en la provincia Ciego de Ávila, zona en la que se enmarca el área de estudio, se reconocen unidades pertenecientes a los dos niveles estructurales principales en los que se divide el modelo geológico generalizado de Cuba (Iturralde-Vinent, 1997): substrato plegado y neoautóctono.

El substrato plegado esta constituido por distintos tipos de terrenos de naturaleza continental y oceánica. Dentro de los grupos rocosos de naturaleza continental, acogiendo el concepto de Asociación Estructuro Formacional (AEF) del Dr. Félix Quintas Caballero, se encuentran las secuencias pertenecientes a la AEF del Protogolfo de México y más específicamente a la Sub-AEF del Paleomargen de Bahamas. Estas aparecen en las zonas de Turiguanó, Punta Alegre y Loma de Cunagüa, a modo de la Formación Punta Alegre, constituida fundamentalmente por rocas evaporíticas de edad Jurásico Superior, probablemente del Oxfordiano al Kimmeridiano, las cuales se depositaron según Iturralde-Vinent, 1994 en una cuenca hipersalina en el lugar que hoy ocupan las Bahamas, reflejando en sus características los cambios ocurridos en Pangea. Actualmente las mismas conforman los diapiros salinos presentes en dichas localidades.

Integrando también los terrenos de naturaleza continental se reconocen componentes referentes a la AEF de la Paleoplatформа de Bahamas. De esta AEF se identifican, aunque sin aflorar, las rocas carbonatadas de edad Aptiano al Maastrichtiano de la Zona Cayo Coco, las cuales se asocian a la Sub-AEF del Graben del Shelf. Estas de acuerdo a sus características se depositaron en uno de los canales que subdividía a la antigua Plataforma de Bahamas. Más al sur de las secciones tipo Cayo Coco, se disponen las secuencias que se han denominado Zona Remedios, estas representan una plataforma

alargada que se sitió en la antigua periferia meridional de las Bahamas y se relacionan con la Sub-AEF del Paleoshelf, la cual se desarrolló entre el Cretácico Aptiano al Maastrichtiano. En las secuencias de Remedios están reflejados ambientes marinos de barras arenosas y bancos donde habitaron abundantes foraminíferos bentónicos, algas calcáreas, ostracodos, así como rudistas del Cenomaniano (?) y Maastrichtiano (Díaz e Iturralde-Vinent, 1981; Díaz, 1985). Las secciones referentes a esta Sub-AEF afloran hacia el sector noroeste de la provincia a modo calizas biogénicas, biomicritas, calciruditas y dolomitas relacionadas con el Grupo Remedios.

Entre los elementos geológicos de naturaleza oceánica que se manifiestan dentro de Ciego de Ávila se hallan, hacia la porción norte-occidental, las rocas correspondientes a las ofiolitas septentrionales, las cuales son de edad Triásico Tardío? al Cretácico más temprano (Iturralde-Vinent, 1990, 1996, Ando et al, 1989) y pertenecen a la AEF del Protogolfo de México. Este complejo litológico constituye fragmentos de una litosfera oceánica antigua relacionada con la corteza antigua del Caribe, generada a partir del proceso de riftogenia de Pangea. Las mismas nacionalmente afloran como una serie de cuerpos alargados en la mitad septentrional de la Isla de Cuba, formando mantos tabulares muy desmembrados, donde las rocas están intensamente deformadas y alcanzan hasta 6 Km de espesor (Iturralde-Vinent, 1996).

Localizándose principalmente hacia la parte central y nor-occidental del territorio, se hallan las secciones correspondientes a la AEF de los Paleoarcos y más específicamente a la Sub-AEF del Arco de Isla Volcánico del Cretácico. Esta unidad es propia de un antiguo archipiélago de islas volcánicas que se desarrolló entre el Cretácico Inferior Albiano y el Cretácico Superior Campaniano. Según Iturralde-Vinent, 1996 en la región la misma yace en contacto tectónico con las ofiolitas septentrionales, encontrándose hacia la zona de contacto con estas, más deformadas, generalmente trituradas hasta brechas. A menudo los contactos coinciden con zonas fisuradas y foliadas, o con masas caóticas que contienen una mezcla de bloques de ofiolitas, vulcanitas y plutónitas del arco. De modo general en la provincia se reconocen elementos característicos de los complejos vulcanógeno-sedimentario y plutónico.

El complejo vulcanógeno-sedimentario se relaciona con las rocas efusivas, piroclásticas y sedimentarias que se forman en las islas volcánicas y en los mares que la rodean (Iturralde-Vinent, 1996). Las mismas están representadas esencialmente hacia la porción

central por las secuencias vulcano-sedimentarias de la Formación Durán y el Miembro San Mateo, además de las secuencias vulcanógenas de la Formación Caobilla, con más amplia difusión que las anteriores. En esta predominan las variedades ácidas encontrándose dacitas, riocitas y riolitas, hallándose ocasionalmente entre las dacitas traquidacitas. Las variedades medias incluyen andesitas de amplia difusión lateral y vertical, pero son poco significativas de acuerdo al volumen de la unidad, también se reportan tobas de composición andesito-dacítica y calizas de grano mediano. Hacia el borde nor-occidental del territorio este complejo se asocia a las diabasas y basaltos de la Formación Zurrupandilla y a las tobas, lavas y lavobrechas aglomeráticas de composición andesítico-basáltica de la Formación La Rana.

A partir de las características litológicas de las secuencias pertenecientes a este complejo, de modo general las mismas se pueden agrupar en el conjunto de rocas formadas en la cuenca axial del arco, donde es común la presencia de lavas, sills y cuerpos sub-volcánicos que se intercalan con tobas, tufitas y rocas sedimentarias, siendo la presencia de este conjunto aceptada y registrada en la provincia por numerosos autores y especialistas (Iturralde-Vinent, 1996).

Las rocas efusivo-sedimentarias del archipiélago volcánico están a menudo atravesadas por plutonitas de composición variada que conforman el complejo plutónico de este arco de isla y constituyen el eje magmático de el mismo, los afloramientos más extensos de estas se extiende a lo largo de unos 400 km entre Cumanayagua (suroeste de Santa Clara) y Buenaventura al suroeste de Holguín. En buena parte de la literatura publicada hasta el presente estos afloramientos se describen como plutones aislados, pero lo cierto es que desde el punto de vista de su composición, su reflejo en los campos físicos (magnético, gravimétrico y aerogamma espectrométrico) y los datos de cartografía geológica y perforación, se puede asegurar que se trata de un mismo plutón. El hecho de que en la actualidad aparezcan como exposiciones aisladas, aparentemente inconectas, es debido a que su techo está distintamente erosionado y/o en parte cubierto por sedimentos más jóvenes (Iturralde-Vinent, 1996). En Ciego de Ávila las rocas del complejo plutónico afloran hacia la mitad oriental de la franja central del territorio a modo de cuerpos de granitos leucocráticos y sienitas aplíticas según el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, 2000?).

La acreción del cinturón plegado-fallado cubano a la placa norteamericana, desarrollada en un ambiente tectónico compresivo, en una colisión oblicua entre placas tectónicas dio lugar al surgimiento de cuencas que se desarrollaron a lo largo de los sistemas de fallas de deslizamiento por el rumbo, cuencas transportadas al dorso de los sistemas de sobrecorrimiento y un sistema de cuencas de antepaís (Jesús Blanco, 1996). En la provincia de modo general se reconocen elementos correspondientes a cada uno de estos sistemas de cuencas, los cuales se agrupan en la AEF de las Cuencas de Colisión, que se desarrollo entre el Cretácico Superior Campaniano al Eoceno Medio Superior, período este que comprendió el proceso de colisión. Dentro de los elementos propios a estos sistemas de cuencas, se reconoce principalmente la Cuenca Central la cual se extiende hacia la franja occidental del territorio provincial y se halla cubierta discordantemente por las rocas del neoaútóctono cubano. La evolución de esta cuenca estuvo ligada al surgimiento de fallas rumbodeslizantes y movimientos de sobrecorrimiento por el buzamiento de fallas de bajo ángulo, lo que provoco la formación de un relieve desmembrado y complejo con zonas elevadas y hundidas adyacentes con determinado orden marcado por la tectónica (Jesús Blanco, 1996). La existencia de estas condiciones favoreció la acumulación de sedimentos terrígenos y carbonatados que constituyeron las rocas presentes hoy en este sistema.

Ocupando la mayor parte de la superficie del territorio provincial se hallan las rocas pertenecientes al segundo nivel estructural principal en el que se divide el modelo geológico de Cuba. Las rocas y estructuras del neoaútóctono cubano se formaron después de la consolidación del substrato plegado, es decir, a partir del Eoceno Superior. Según las investigaciones realizadas (Iturralde-Vinent 1978,1988b, Bresznyászky e Iturralde-Vinent 1978), durante esta etapa y hasta el presente, dominan los movimientos verticales oscilatorios, que dieron lugar a la formación de una estructura de bloques distintamente elevados. Algunos bloques son de altitud positiva, donde apenas se depositaron sedimentos de este intervalo; otros son de altitud intermedia, donde los espesores de sedimentos no superan los cientos de metros; y por fin los hay de altitud negativa, que conservan espesores de más de 3 000 metros de sedimentos del Eoceno Superior tardío al Reciente. Estos depósitos presentan muy pocas deformaciones cubriendo casi subhorizontalmente de forma discordante al substrato plegado (Iturralde-Vinent, 1996).

En estos sedimentos se pueden reconocer tres ciclos sedimentarios o estadios de transformación de la paleogeografía. Un estadio del Eoceno Superior al Oligoceno representado en la región de estudio por las rocas de las formaciones Chambas, Ferrer, Piedras, Marroquí, Vertientes Tamarindo y Jatibonico. Este ciclo se caracteriza hacia la zona oriental y central de Cuba, además de la cuenca de los Palacios, por la presencia de facies terrígenas y sílice-clásticas derivadas de la erosión de rocas preexistentes. Sobre este conjunto terrígeno se fueron acumulando sedimentos carbonatados que predominan hacia la porción superior de este estadio. El segundo ciclo se extiende del Mioceno Inferior al Medio Superior y al mismo se refieren las formaciones Paso Real, Arroyo Palma y Güines. Este ciclo presenta características estratigráficas más uniformes mostrando un predominio de facies carbonatadas. Los sedimentos propios del tercer ciclo de sedimentación del neautoctono cubano ocupan el período comprendido entre el Plioceno al Reciente, en los mismo se evidencia un marcado carácter terrígeno y en Ciego de Ávila se representan por las formaciones Villa Roja, Jaimanitas, Camacho, los depósitos aluviales-coluviales-proluviales, palustres y marinos.

De modo más específico, teniendo en cuenta los datos ofrecidos por el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, 2000?), los registros de archivo de las perforaciones realizadas con anterioridad y los registros del Estudio Geofísico para el Abasto a Cayo Coco. Zona Santa Bárbara, Provincia Ciego de Ávila, la constitución geológica de la zona del Relleno Sanitario La Rosa y sus áreas adyacentes es relativamente sencilla. El corte geológico representativo (Plano 2A) esta formado por rocas correspondientes al neautoctono cubano, las cuales a su vez pertenecen a la AEF de la Neoplataforma, datada del Eoceno Superior Tardío al Reciente. Las secuencias propias de esta AEF se originaron básicamente (a diferencia de los elementos del substrato plegado) en el mismo lugar que hoy ocupa el territorio de Cuba, evolucionando en un régimen de desarrollo platafórmico. Según las características litológicas de las secuencias presentes, en ellas se reconocen elementos propios de cada uno de los tres ciclos sedimentarios o estadios de transformación de la paleogeografía del neautoctono cubano, pudiéndose identificar un predominio de las facies carbonatadas. En correspondencia con las características generales de este nivel estructural, las rocas del área se hallan muy poco deformadas, cubriendo casi subhorizontalmente de modo discordante al substrato plegado.

De acuerdo a los datos geofísicos el área donde va enclavado el relleno sanitario se encuentra en una zona de transición entre calizas algo arcillosas y calizas limpias con resistividades calculadas para las calizas que oscilan entre 50 y 70 Ohm·m, (Plano 9) y profundidades de yacencia para las mismas, según datos geofísicos, de alrededor de los 5.00 m (Plano 10). Como se puede observar en cualquiera de los dos planos antes mencionados el área del relleno sanitario se sitúa a una distancia de aproximadamente 172 m al noroeste del corte de isohomas SS – SS' (Plano 11), más específicamente correspondiendo su ubicación entre los puntos de sondeo SS – 116 y SS – 117, donde el corte geoelectrico se corresponde con lo descrito anteriormente. Entre los dos puntos de sondeo antes mencionados aparece una zona con resistividades entre 12 y 40 Ohm·m alrededor de los 35 m de profundidad, que pudiera asociarse a un estrato impermeable conformado por sedimentos margosos o a la presencia de intrusión salina.

2.2- Estratigrafía:

Desde el punto de vista estratigráfico, según el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, 2000?) y teniendo en cuenta principalmente los registros de archivo de las perforaciones realizadas con anterioridad, hacia la base del corte geológico estudiado en el área de trabajo (Plano 2A), aparecen principalmente rocas carbonatadas referentes al sistema del Paleógeno, las cuales se agrupan en la Formación Chambas. A continuación y ubicándose discordantemente sobre las anteriores, aparecen rocas pertenecientes al sistema del Neógeno, las cuales conforman las Formaciones Paso Real y Güines, en las que de modo general se conserva mayormente un carácter carbonatado. Por último se encuentran las rocas terrígenas que pertenecen a la Formación Camacho, las cuales se sitúan discordantemente sobre las secuencias anteriores. Las rocas de esta formación junto a los depósitos palustres del holoceno que se ubican al norte del área de estudio forman parte en general del sistema Cuaternario. Seguidamente, atendiendo a su edad geológica y composición litológica se ofrece una breve descripción de las formaciones antes mencionadas, según aparece en el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 1997?).

➤ ***Secuencia del Paleógeno.***

Se halla representada por la Formación Chambas la cual se enmarca dentro del primer ciclo sedimentario de desarrollo del neoaútctono cubano. La misma se agrupa dentro de

las formaciones que se constituyeron sobre el arco volcánico cretácico y su cobertura (cuencas superpuestas), más específicamente en la Cuenca Cabaiguán (Cuenca Central) (García Delgado y Torres Silva, 1997).

- **Formación Chambas (chm).**

Litología diagnóstica: Calizas microgranulares, porosas, de capas gruesas, calizas arcillosas, porosas, que pasan a margas, es característico en ellas la presencia de ejemplares grandes de Teredos y muchas Lepidocyclina, calizas organógenas, porosas, constituidas principalmente por Moluscos y en menor cantidad por Lepidocyclina y calizas detríticas. Se observa en algunas calizas organógenas fragmentos redondeados de rocas volcánicas.

Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Arroyo Blanco y Marroquí. Está cubierta discordantemente por las formaciones Camacho, Paso Real y los depósitos del Cuaternario. Transiciona lateralmente a la Fm. Tamarindo.

Edad: Oligoceno Superior (P₃³ chm).

Ambiente de sedimentación: Se depositó en condiciones de mar profundo, en una zona con aguas tranquilas, con muy escaso aporte de material terrígeno.

Espesor: Oscila entre los 100 y 1500 m.

➤ **Secuencia del Neógeno.**

Se encuentra compuesta por las formaciones Paso Real y Güines las cuales se desarrollaron durante el segundo ciclo sedimentario del neotectónico cubano. Se puede apreciar en concordancia con los registros generales de este período geológico, un predominio de rocas carbonatadas, reconociéndose en menor proporción y en diferentes niveles, rocas terrígenas y evaporíticas (Franco y Delgado Damas, 1997).

- **Formación Paso Real (psr).**

Litología diagnóstica: Son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas,

calizas dolimitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan pseudoconglomerados calcáreos de matriz margosa arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita) que contienen en algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimíctico de matriz margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos.

Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre las formaciones Báguanos, Camazán, Colón, Jaruco, Lagunitas y Sevilla Arriba y discordantemente sobre las formaciones Arroyo Blanco, Artemisa, Caobilla, Capdevila, Chambas, Charco Redondo, Chirino, El Embarcadero, Florida, Grande, Guáimaro, Jatibonico, Loma Candela, Los Negros, Marroquí, Mata, Peñón, Presa Jimaguayú (parte indiferenciada y sus miembros Chorrillo y Portillo), Río Yáquimo, San Cayetano, San Luis, Santa Teresa, Veloz, Venero, Vertientes, Vía Blanca, los grupos Mariel, Remedios y Universidad, el Miembro Berrocal (Fm. Crucero Contra maestre), los complejos Esmeralda y Mabujina y las ultramafitas y granitoides. Está cubierta concordantemente por las formaciones Güines, Loma Triana y Manzanillo y discordantemente por las formaciones Bayámo, Cauto, Guane, Guevara, Punta del Este, Sigüanea, Vedado, Villarroja y el Mbro. El Maíz (Fm. Bellamar). Transiciona lateralmente con las formaciones Arabos, Cojímar, Güines, Lagunitas, Río Jagüeyes y el Grupo. Nipe (Fm. Camazán).

Edad: Oligoceno Superior- Mioceno Superior basal.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral limitado y en áreas lagunares de circulación restringida, señaladas estas por la asociación Ammonia - Ostrácodos y la presencia de yeso, halita, pirita y lignito en sedimentos arcillosos.

Espesor: Oscila entre 30 y 1 640 m (este último en el pozo Candelaria 1 e incluye al Mbro. Baños).

- **Formación Güines. (gn).**

Litología diagnóstica: Calizas biotriticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohémicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes

ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. Coloración blanca, amarillenta, crema o gris.

Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre las formaciones Arabos, Caobas, Cojímar, Colón (parte indiferenciada y su Miembro. Coliseo), Jaruco, Lagunitas, Loma Triana (localmente lo puede hacer también con una ligera discordancia) y Paso Real y transgresivamente sobre las formaciones Arroyo Blanco, Artemisa, Caibarién, Cantabria, Caobilla, Carmita, Caunao, Guanajay, Margarita, Mataguá, Nazareno, Peñón, Perla, Presa Jimaguayú, Punta Brava, Saladito, Santa Teresa, Tamarindo, Trocha, Vega, Vertientes, Vía Blanca, los grupos Pico San Juan, Universidad, el complejo Mabujina y cuerpos de granitoides. Está cubierta concordantemente por la Fm. Arabos y discordantemente por las formaciones Bellamar (parte indiferenciada y sus miembros Cárdenas y El Maíz), Camacho, Canímar (miembros El Abra y Maica), Guevara, Jaimanitas, Punta del Este, Vedado, Vega y Villarroja. Transiciona lateralmente con las formaciones Cojímar y Paso Real.

Edad: Mioceno Inferior parte alta - Mioceno Superior parte basal.

Ambiente de sedimentación: *Se depositó en un ambiente sublitoral con muy poca influencia arrecifal.*

Espesor: Oscila entre 50 y 1670 m.

➤ **Secuencia del Cuaternario.**

Se halla constituida por la Formación Camacho y los depósitos palustres del Holoceno que se observan al norte del nuestro sector. Las rocas y sedimentos que constituyen esta secuencia se formaron durante el tercer ciclo sedimentario del neoaútctono cubano, y en ella predomina un marcado carácter terrígeno.

- **Formación Camacho (cmc).**

Litología diagnóstica: Limos areno - arcillosos y arcillas limosas con intercalaciones de gravas finas y concreciones de carbonato, así como cristales dispersos de yeso.

Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Arroyo Blanco, Caibarién, Chambas, Grande, Güines, Mata, Tamarindo, Vega, el Gr. Remedios y los sedimentos aluviales antiguos. Su límite superior es erosivo.

Edad: Sobre la base de su posición estratigráfica se le asigna una Edad Pleistoceno parte alta.

Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente marino.

Espesor: Puede alcanzar hasta 3 m.

- **Depósitos palustres (Q_{4p}).**

Litología diagnóstica: Residuos vegetales, limos carbonatados, arcillas salinizadas arenosas con restos carbonizados de troncos y raíces de mangles.

Edad: Holoceno.

2.3- Tectónica:

Atendiendo a los rasgos estructurales de la parte norte-central del archipiélago cubano, el área de estudio se ubica dentro del macrobloque Camaguey. El mismo está constituido fundamentalmente por depósitos y rocas de cobertura, formados después de la consolidación del substrato plegado, luego de la Orogénesis Cubana, a partir del Eoceno Superior hasta el Reciente, por lo que pertenecen al Neoaútctono Cubano, donde dominan los movimientos verticales oscilatorios que dieron lugar a un mosaico de bloques distintamente elevados (emergidos y sumergidos), que presentan muy pocas deformaciones tanto plicativas (pliegues y rizaduras) como disyuntivas (fallas y grietas), vinculadas regionalmente al campo de esfuerzos transpresionales que generan los movimientos de la corteza a lo largo de las fallas de deslizamiento por el rumbo (NNE-SSW) La Trocha al Oeste y Camagüey al Este, con direcciones predominantes de esfuerzos NE-SW pertenecientes al Sistema Disyuntivo Camagüey, mayormente heredadas del substrato plegado.

Durante los trabajos ejecutados en esta investigación no fueron detectadas localmente deformaciones algunas, por lo que se puede inferir que el sector ha tenido una evolución estructural y geodinámica relativamente tranquila y estable. No obstante existen algunos

indicios que sugieren la presencia de eventos neotectónicos vinculados notablemente con las condiciones limítrofes del acuífero presente en el área de estudio:

1. La existencia en toda la franja norte de nuestra provincia de los domos Punta Alegre, Isla de Turiguanó y Cunagua, en dirección característica oeste – este, de forma conjunta con la presencia del humedal en toda esa zona, indican la presencia de movimientos neotectónicos ascendentes que provocan cierto apantallamiento al norte.
2. Al observar la descripción litológica de las calas CC-3 y CC-4, se nota que en la cala CC-3 a la profundidad de 72.5 m se encuentra a la Formación Paso Real, mientras que en la cala CC-4 a los 125.0 m no se cortó en ningún intervalo rocas que caracterizan a esta formación por lo que se observa un desplazamiento notable en las capas.

2.4- Características hidrogeológicas:

Desde el punto de vista hidrogeológico, habitualmente, las rocas que funcionan como acuífero en la provincia Ciego de Ávila, son las calizas miocénicas pertenecientes principalmente a la Formación Güines, aunque podemos encontrar otros horizontes acuíferos compuestos esencialmente por calizas también, pero pertenecientes fundamentalmente a formaciones del Paleógeno. Muchos de estos conjuntos litológicos se hallan alterados en distinto grado por procesos cárnicos lo cual explica la alta variabilidad de los parámetros hidrogeológicos para estos acuíferos, así como su anisotropía.

De modo general los acuíferos de la provincia clasifican como acuíferos libres y su alimentación esta relacionada sobre todo con las precipitaciones atmosféricas. Jurisdiccionalmente el recurso hídrico es abundante en todo el territorio, contando tanto hacia la parte norte como en la sur, con grandes reservas de este valioso elemento, según la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Ciego de Ávila.

De forma regional en toda la zona adyacente a el sector de estudio, según el mapa de hidroisohipsas del período seco para un 95% de probabilidad confiable del Esquema Regional Precisado inédito a escala 1: 100 000 (Plano 3), la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas varia entre los 2 y 6 metros y las cotas absolutas de las mismas están en el orden de los 1 a 6 metros sobre el nivel medio del mar, para un gradiente

hidráulico con valores que oscilan entre 0,0005263 y 0,000833. La dirección predominante del flujo, según este mapa es de modo general hacia el noroeste.

Desde el punto de vista hidroquímico, teniendo en cuenta los datos ofrecidos por el Esquema Regional Precisado a escala 1: 100 000 pertenecientes al período seco de 1990 (Plano 4), las aguas subterráneas alojadas en el horizonte acuífero miocénico en la zona aledaña al área de estudio se caracterizan por ser: al norte, aguas pocas salinizadas considerando la clasificación de las aguas por su mineralización de O. A. Aliokin, presentando una mineralización que supera el gramo por litro, hacia la porción sur del territorio las aguas clasifican como aguas dulces presentando una mineralización por debajo del gramo por litro.

Al analizar el comportamiento de los isocloruros (Plano 5) se observa que al norte de la sección de interés, el contenido del ión cloro excede los 250 mg/l, pudiéndose observar registros que superan los 500 mg/l, valores estos que se sitúan por encima de la concentración máxima aceptable para aguas potables. Hacia la franja sur la concentración del ión cloro se halla por debajo de los niveles máximos aceptables para aguas potables.

De forma específica en el área de estudio las rocas que funcionan como acuífero, son las calizas y calizas margosas correspondientes a las formaciones del Mioceno. Las mismas constituyen un acuífero libre, cuya alimentación esta relacionada sobre todo con las precipitaciones atmosféricas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA Y VOLUMEN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.

3.1- Recopilación y análisis de la información existente.

Para la confección del presente trabajo, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica, en la que se recopiló y examinó toda la documentación disponible acerca de la región de estudio y sus zonas adyacentes, así como se efectuó la preparación de la base cartográfica 1:25 000 y 1:10 000, básica para el reconocimiento de la zona. Igualmente se le prestó particular interés al análisis de buena parte de la literatura, investigaciones y experiencias precedentes relacionadas con el objetivo de esta tesis, en Cuba y en otras regiones del mundo. A continuación se relacionan los principales aspectos que se esclarecieron durante esta etapa:

3.1.1- Determinación de las condiciones geológicas.

Para lograr un mejor conocimiento de las particularidades geológicas de la región y el área de estudio, se revisó la información ofrecida por el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 (Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, 2000?), el Léxico Estratigráfico de Cuba (Instituto de Geología y Paleontología, 1997?), y el Mapa Tectónico de Cuba a escala 1: 500 000 (Instituto de Geología y Paleontología, Centro de Investigaciones Geológicas, 1985), además de numerosos artículos en Internet, investigaciones y bibliografía en la que se caracteriza el desarrollo geológico de Cuba y se tratan aspectos propios del sector de interés. Igualmente se tuvo acceso a la base de datos del Archivo de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (E.I.P.H) de la provincia, de donde se extrajo información inédita del “Esquema Regional Precisado para el Aprovechamiento Integral de los Recursos Hidráulicos y Agrarios de Ciego de Ávila”, del cual se le prestó particular atención al análisis de los diferentes perfiles geológicos realizados en el territorio y dentro de estos, especialmente al Perfil VI – VI’ confeccionado a partir de los registros de perforaciones y estudios geofísicos realizados con anterioridad. Este corte atraviesa en dirección norte – sur el territorio provincial pasando aproximadamente de 1.5 a 2 Km al oeste del área de estudio, por lo que fue tomado como base para la elaboración del perfil geológico regional y la columna geológica típica de esta (Plano 2A).

Paralelamente se examinaron los cortes litológicos de 9 calas existentes en el área de trabajo y sus cercanías (CC-3, CC-4, CC-5, CC-7, CC-8, CN-P2, CN-P10, P-2 Y P-8), de estas, se representan en los Anexos 3, 4 y 5 las que se sitúan dentro de los límites del

sector de trabajo. Por último se estudiaron las características geológicas emitidas por investigaciones precedentes efectuadas en la región por la E.I.P.H de Ciego de Ávila y otras instituciones.

A partir del análisis de toda esta documentación, se obtuvieron criterios acerca de la constitución geólogo-estructural de la zona, se conocieron las principales formaciones y grupos litológicos presentes en el área, así como la distribución y espesores aproximados de estos.

3.1.2- Determinación de las propiedades geofísicas del medio.

Con el fin de conocer las características geoelectricas de las rocas presentes en la zona, se llevo a cabo un examen detallado de la información ofrecida por el “Estudio geofísico para el abasto de agua a Cayo Coco. Zona Santa Bárbara – Cayo Manacas. Morón. Ciego de Ávila” efectuado con el objetivo de caracterizar las condiciones geólogo-hidrogeológicas del territorio para la localización de nuevas fuentes de abasto. En esta investigación se aplicó la metodología del Sondeo Eléctrico Vertical con un dispositivo simétrico lineal de Schlumberger en un total de 159 puntos de medición distanciados a modo general a un paso de 300-500 m y ubicados en 9 perfiles trazados según criterios propios del Ingeniero al frente del proyecto.

De la documentación expuesta en este informe, se le dedico especial interés a los cortes geoelectricos PE-PE' y SS-SS' (Plano 11), los cuales atraviesan la franja occidental del área en dirección noreste-suroeste, pasando en el caso específico del SS-SS' cerca de los límites del relleno sanitario. A continuación se muestran las descripciones dadas en dicho informe, para los cortes antes mencionados:

✓ Perfil PE-PE' (Plano 11A).

El corte geólogo-geofísico que se muestra esta conformado principalmente por sedimentos arcillosos presentes en la parte superior del corte y un horizonte de calizas subyaciéndolo, los primeros presentan espesores que varían desde los 9-10 m al inicio del perfil hasta los 2 metros hacia el final con resistividades eléctricas aparentes en el rango de los 9 hasta los 13 Ohm·m. El horizonte calcáreo presenta una diferenciación en profundidad de los parámetros eléctricos que lo asociamos a una transición de calizas margosas (con espesores desde los 13 hasta 22 metros y resistividades desde 32 hasta

54 Ohm·m) hacia las calizas limpias presentes en la parte inferior del corte con resistividades desde los 57 hasta 89 Ohm·m.

Al final del perfil en la parte inferior del corte se presenta un horizonte con valores de resistividades muy bajos (29-30 Ohm·m) que pudiera asociarse a la presencia de un estrato impermeable o al efecto provocado por la intrusión salina, muy bien correlacionable con la detectada en los estudios realizados en la zona Patria, Perfil P-P'; pudiera asociarse además a una posible salinización geológica por la presencia de domos que se desarrollan en la zona.

En el horizonte correspondiente a las calizas se aprecia una diferenciación en el plano vertical de las resistividades en las cercanías del punto de medición PE-138 que se manifiesta claramente en el corte de Isohomías y que se relaciona con la transición de sedimentos calcáreos con intercalaciones margosas hacia las calizas limpias.

✓ Perfil SS-SS' (Plano 11B).

Muy similar al caso anterior, en la parte similar del perfil desde el inicio hasta el punto SS-116 se presenta un estrato arcilloso con espesores desde 5 hasta los 10 metros y resistividades desde 9 hasta 15 Ohm·m. Infrayaciendolo se encuentra un horizonte de calizas con resistividades que varían desde los 30 hasta los 110 Ohm·m que presentan una zona de transición limitada por un contacto de tipo vertical en el punto SS-117 a partir del cual y hasta el final del perfil se desarrollan las calizas limpias con resistividades que varían desde los 86 hasta los 151 Ohm·m. En la parte inicial las calizas presentan un comportamiento de resistividades característico a zonas de transición horizontal de sedimentos calcáreo-margosos hacia calizas limpias.

En la parte inferior del perfil y a partir del punto SS-117 hasta el final se presenta un horizonte con resistividades entre los 12 y 40 Ohm·m que pudiera asociarse como en el perfil anterior a la presencia de un estrato impermeable conformado por sedimentos margosos o a la presencia de una intrusión salina.

Del examen minucioso de estos datos, se extrajeron consideraciones sobre la constitución litológica de los diferentes cortes geólogo-geofísicos obtenidos, así como los valores de resistividades eléctricas correspondientes a cada uno de ellos. También se obtuvieron referencias acerca de las profundidades de yacencia y espesores de las rocas

existentes y se adquirieron criterios sobre la distribución espacial, de los posibles horizontes acuíferos (calizas) e impermeables (arcillas o margas).

3.1.3- Determinación de las condiciones hidrogeológicas.

El conocimiento de las características hidrogeológicas se realizó básicamente, a través de la revisión de toda la información disponible en el Archivo de la E.I.P.H de Ciego de Ávila sobre la franja de estudio. Primeramente y con vistas a conocer dichas peculiaridades de modo regional, se analizaron los datos del Esquema Regional Precisado, de donde concluyó, cuales son las principales rocas y formaciones que funcionan como acuíferos en la provincia, además de los fundamentales tipos de acuíferos con que se cuentan en esta y la abundancia de los recursos hídricos en el territorio. También se revisó el Mapa de Hidroisohipsas a escala 1: 100 000 del período seco para un 95% de probabilidad confiable (Plano 3), con el fin de observar la dirección predominante de las aguas subterráneas y la profundidad de yacencia de estas. De igual modo, para comprender las particularidades hidroquímicas, se observaron los mapas de Sales Solubles Totales e Isocloruros a escala 1: 100 000 pertenecientes al período seco de 1990 (Planos 4 y 5).

Posteriormente, para lograr un mejor entendimiento de los detalles propios del sector de interés y sus áreas adyacentes, se estudiaron varios informes emitidos por investigaciones anteriores obteniendo de ellos, referencias sobre la distribución de las hidroisohipsas pertenecientes al periodo seco 1987-1988 (Plano 7), y datos sobre el comportamiento de las propiedades hidráulicas de los acuíferos principales. A su vez, se consiguió información acerca de las calas realizadas y se alcanzaron criterios sobre la profundidad, espesor y distribución espacial de los posibles horizontes acuíferos.

Con el objetivo de establecer una línea base para la caracterización y profundización de las propiedades hidroquímicas de las aguas subterráneas existentes en el sector de trabajo, se realizó la búsqueda y examen de los resultados de análisis químico de 11 pozos diseminados por toda el área (Anexo 6), los cuales fueron tomados el 1ro de febrero de 1988, a finales del período seco 1987-1988. Dicha caracterización, servirá como referencia para determinar en el futuro, el grado de influencia que han tenido sobre las aguas, la construcción del relleno sanitario u otras obras realizadas por el hombre.

Por último, para el esclarecimiento de las propiedades hidráulicas de las rocas del área, se recopilaron los datos de aforo de 5 pozos existentes en esta (tres de ellos con dos

pruebas) (Anexo 7). Dichos pozos, por su profundidad y ubicación, caracterizan fundamentalmente a las formaciones del Neógeno.

3.1.4- Análisis de los lixiviados.

Según las experiencias y recomendaciones dadas por los Programas de Aseo Urbano de varias comunidades latinoamericanas y el Programa de Salud Ambiental de dicha región, además de la revisión de las regulaciones que establecen el cuidado de las aguas subterráneas y el estudio de numerosos artículos en Internet, investigaciones y cursos relacionados con el tema, se pudieron conocer, varios aspectos sobre las condiciones que favorecen la formación de estos residuos líquidos, así como las afectaciones e implicaciones que ocasionan al medio en general y especialmente a las aguas terrestres.

Paralelamente, se supo sobre las medidas que se deben tomar para la infiltración de los lixiviados generados en un relleno sanitario y cuales son límites máximos permisibles promedios, de los principales parámetros básicos que se controlan, para el vertimiento de tales sustancias contaminantes. También se conoció acerca de los distintos indicadores de contaminación fecal máxima admisible según el cuerpo receptor con que se cuenta. Por último, se extrajeron criterios sobre el monitoreo de la calidad de las aguas, para la detección temprana, del posible deterioro que pueden sufrir estas, por la infiltración de los lixiviados.

3.2- Levantamiento geólogo-hidrogeológico.

Las labores de levantamiento geólogo-hidrogeológico, se llevaron a cabo con el fin de lograr un mejor entendimiento de los rasgos propios del sector de interés. Para el caso específico de la geología se tuvo como objetivo principal, verificar la información ofrecida por el Mapa Geológico de Cuba a escala 1: 100 000 elaborado por el Instituto de Geología y Paleontología y la Academia de Ciencias de Cuba en el 2000?, acerca del área de estudio, por lo que dicho levantamiento se restringió a los límites específicos de esta. Para la realización de esta tarea se efectuaron 3 salidas al campo, en las que se documentaron 56 puntos distanciados de modo general a un paso de 100-200 m, tomándose también varias muestras. Estas actividades se dificultaron en cierto grado, dada la escasez de afloramientos en la zona, lo cual se explica por la existencia de un relieve mayormente llano, en el que hay un amplio desarrollo de la corteza de meteorización y la capa vegetal.

Por su parte los trabajos de levantamiento hidrogeológico, se realizaron a una escala de 1:10 000 y contaron con la ejecución entre los días 1 y 3 de junio del 2004, de un censo y sondeo de todos los pozos y demás elementos hidrogeológicos de interés presentes en el área (Anexo 8), con el fin de confeccionar un plano de hidroisohipsas más detallado a dicha escala. Se considera que dicha tarea, pese a que se efectuó a principios del periodo húmedo del 2004, no haya registrado valores alterados de los niveles de las aguas subterráneas, dada la escasez de precipitaciones ocurridas en ese tiempo, reflejando así más bien, el comportamiento de los niveles para finales del periodo seco 2003-2004.

De acuerdo a los datos obtenidos por dicho censo y según la información lograda por las demás salidas al campo, se identificó la existencia de una fuente de abasto en el área, la cual se sitúa en las cercanías del poblado Santa Sofía (Cooperativa La Rosa), en la intercepción de las carreteras Saladrigas-Santa Sofía con Morón-Bolivia, específicamente en las coordenadas Lambert 752 020 y 254 040. No obstante, se reconoce la existencia de numerosos pozos criollos particulares para el abasto casero y otros utilizados para el riego. Por último, se determinaron los principales focos contaminantes, los cuales son el relleno sanitario y el centro porcino “Revolución de Octubre” situado al suroeste de la zona.

3.3- Procesamiento y análisis de la información.

A partir del análisis integral de todo el volumen de información existente después de efectuados los trabajos de campo, se elaboraron, con la utilización de diferentes programas (Excel, Aquitest, Surfer 8 y Autocad Map), una serie de mapas, perfiles y tablas, que se usaron junto a otros datos, para la obtención e interpretación de los resultados de esta investigación. De acuerdo con esto y según la documentación disponible, se confeccionó un mapa geológico a escala 1:100 000 (Plano 2), un perfil geológico regional y una columna geológica tipo (Plano 2A) en los que se plasman las características geólogo-estructurales, formaciones y grupos litológicos presentes en el territorio circundante al área de estudio. Para lograr un mejor entendimiento de las condiciones hidrogeológicas de esta, se elaboró un perfil geológico tentativo (Plano 12), teniendo en cuenta las descripciones litológicas de varias calas y los cortes geoelectricos logrados en estudios anteriores, donde se refleja, la distribución y espesor de las principales rocas existentes. Igualmente, se determinó el tipo de acuífero con que se cuenta en la zona y cuales son las secuencias que lo conforman.

Por otro lado, se confeccionó un mapa de hidroisohipsas para principios del periodo húmedo del 2004 (Plano 8) y se observó la dirección predominante del flujo según este y el mapa correspondiente al periodo seco 1987-1988 (Plano 7). Teniendo en cuenta los datos expuestos en el primero, se analizaron los niveles de las aguas subterráneas y se hallaron los valores referentes al gradiente hidráulico del territorio. También se elaboró un mapa de datos reales (Plano 6), donde se reflejan algunos de los principales rasgos hidrogeológicos del área.

Con los datos de análisis químico de los 11 pozos existentes en la zona (Anexo 6), se confeccionaron los mapas de sales solubles totales, cloruros y sulfatos (Planos 13, 14 y 15), examinando de ellos, su distribución y comportamiento, lo que permitió respectivamente, clasificar las aguas alojadas en horizonte acuífero de acuerdo a su mineralización según A. O Aliokin y extraer criterios sobre el estado químico sanitario de estas.

De igual modo y para conocer las características hidráulicas de la zona, se reevaluaron los parámetros hidrogeológicos de 5 pozos con aforo presentes en el sector de trabajo, a través del programa AQUITEST por los métodos de Cooper y Jacob (Tiempo vs Abatimiento), Theis, y el método de recuperación de Theis y Jacob, para acuíferos no confinados. Los valores de estos, se relacionan en tablas (Anexo 7 y Tabla 4.4), en las que aparecen también, los resultados de los análisis estadísticos a que los mismos fueron sujetos.

Por último, una vez procesada toda esta información, se extrajeron criterios sobre la valoración de las posibles variantes a tener en cuenta, para la infiltración de los lixiviados y las aguas que se pueden acumular en el relleno sanitario, así como los planes de monitoreo de la calidad de las aguas a adoptar, en dependencia de las soluciones que se escojan.

3.4- Determinación del volumen de lixiviados y total de aguas a infiltrar del relleno sanitario.

Para definir el volumen de lixiviados originados en el relleno sanitario La Rosa se utilizó el Método Básico de Balance de Agua, según el cual, si el relleno sanitario ha sido correctamente diseñado, la cantidad de lixiviados generados depende de la diferencia entre las precipitaciones directas sobre el área de vertido y la evapotranspiración. Los valores de precipitaciones directas a usar para estos cálculos, fueron hallados según la

media histórica mensual de lluvias registradas por el pluviómetro CA-644 (Anexo 2) situado en las cercanías del área de estudio. La evapotranspiración se determinó a través del método semiempírico de Penman utilizando para ello los datos de evaporación en superficie de agua libre en mm/mes ofrecidos por la Estación Meteorológica de Fallas y los valores de los coeficientes reductores correspondientes a cada mes. De acuerdo con todo esto se hallaron los volúmenes medios de lixiviados generados por mes, en las 6 hectáreas que ocupa el relleno sanitario y los caudales medios a infiltrar de estos (Tabla 4.5).

Paralelamente, con vistas a evitar que ocurran inundaciones que interrumpan por un tiempo prolongado las labores de vertido, se calcularon los gastos máximos de agua a evacuar (Tabla 4.6) por el Método de Cálculo del Módulo de Drenaje según Pérez Monteagudo, 1981, utilizando una lluvia máxima del 1% de probabilidad de 350 mm, de acuerdo a diferentes probabilidades de ocurrencia y varios tiempo de retención.

3.5- Estimación del caudal que se puede infiltrar en las secuencias del Neógeno y número de pozos necesarios para evacuar las aguas totales.

Para determinar el caudal que se puede infiltrar en estas secuencias, se utilizó un despeje de la ecuación para calcular el coeficiente de filtración (k), correspondiente al método de vertimiento en calas en acuíferos freáticos, más específicamente para el caso de vertimiento en zonas de saturación en presencia de acuíferos con un espesor considerable (De Miguel, F C, 1999). Para ello se consideraron las características hidrogeológicas del medio, además del diseño y particularidades de los pozos proyectados (Plano 16), para el vertimiento de los lixiviados y aguas totales a las rocas del Neógeno.

Una vez estimado el caudal que pueden evacuar dichas secuencias, se determinó el número de pozos a construir para asegurar el buen funcionamiento del relleno (Tabla 4.7), dividiendo para ello: los gastos máximos de agua a evacuar obtenidos por el Método de Cálculo del Módulo de Drenaje, utilizando una lluvia máxima del 1% de probabilidad de 350 mm, según distintas probabilidades de ocurrencia y tiempos de retención; entre los gastos mínimos que pueden asumir los pozos de infiltración para un 75 % de eficiencia.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

4.1- Contaminación del medio hídrico por lixiviados.

El crecimiento de la población, así como el desarrollo económico, la urbanización y otros efectos del desarrollo experimentado por Cuba y los demás países del mundo, vienen produciendo un incremento considerable en la cantidad y variedad de los residuos sólidos urbanos generados en las actividades realizadas por la población.

El tratamiento y eliminación de los residuos sólidos urbanos, produce una serie de afectaciones, sobre los tres medios físicos: aire, agua y suelo/subsuelo, cuyo resultado es la contaminación atmosférica, de las aguas superficiales, subterráneas y la contaminación del suelo.

El principal problema que genera este tipo de contaminación son los lixiviados, entendidos en este caso como los residuos líquidos generados en los procesos de fermentación y compactación de los residuos sólidos (Nieto, 1987). Estos líquidos, que presentan elevadas cargas contaminantes, pueden verse incrementados en caudal y diluidos por las aguas de las lluvias o escorrentía superficial que entra en contacto con la masa de basuras.

Además de diversos impactos sobre los diferentes factores del medio físico, por ejemplo y dentro del marco geológico, los lixiviados si son muy agresivos en su composición pueden generar la disolución de materiales y ocasionar, en consecuencia, hundimientos y colapsos del terreno, especialmente en las zonas con evaporitas, sulfatos y calizas. Estos residuos líquidos son especialmente dañinos para las aguas.

Los lixiviados generados en los vertederos son la causa esencial de contaminación del medio hídrico. Esto es principalmente preocupante en vertederos incontrolados (como es el caso actualmente del relleno sanitario La Rosa), donde estos fluidos contaminantes no son recogidos adecuadamente y el riesgo de su incorporación a las aguas es muy alto.

La contaminación en las aguas superficiales se produce por una agregación de lixiviados y el impacto de dicha contaminación es función tanto de la concentración y caudal del afluente, como del caudal y calidad del agua del medio receptor. La contaminación de los cauces reviste en este caso una importancia relativamente menor, ya que, al dejar de

actuarse el vertido, el cauce se lava, aunque pueden suceder fenómenos de impermeabilización del lecho debido a las partículas en suspensión.

Más grave es la contaminación de las aguas subterráneas, ya que, además de contaminarse el agua, afecta el acuífero, cuya regeneración puede resultar prácticamente inviable habida cuenta de la circulación lenta de dichas aguas. Cuando se producen vertidos de componentes industriales en canteras y vertederos incontrolados se puede alterar, drásticamente y de manera irreversible, la calidad del agua subterránea en la zona de vertido y sus alrededores.

La cantidad de líquido que se produce en vertederos en superficie depende inicialmente del que contenga la propia basura, pero principalmente del agua de filtración que reciben de la lluvia. A modo orientativo puede citarse que según Weaver, 1965, el lavado continuo de un depósito de basuras puede proporcionar por m³ de las mismas: 1.22 kg de Na¹⁺ + K¹⁺; 0.81 kg de Ca²⁺ + Mg²⁺; 0.74 kg de Cl¹⁻; 0.186 kg de SO₄²⁺ y 3.15 kg de HCO₃¹⁺, pudiéndose realizar el lavado total en menos de un año.

La velocidad con que se producen las reacciones de descomposición en los residuos depende la humedad, actividad biológica y temperatura, así como del suministro de oxígeno. En unos casos la estabilización se produce en escasos años, mientras que en otros, después de ese período la basura aún aparece relativamente fresca.

Lamentablemente en Cuba según el análisis bibliográfico efectuado no se han realizado investigaciones para el estudio y caracterización de los lixiviados generados a partir del vertido de residuos sólidos urbanos. A modo de ejemplo se puede observar en la Tabla 4.1 los datos obtenidos de los análisis medios de lixiviados para residuos de 2 y de 10 años de vertidos, realizados por la Diputación de Barcelona siguiendo la sistemática empleada en Landfill Technology (Crawfor y Smith, 1985).

Elementos (en mg/l)	2 años	10 años
PH	5- 6.5	6.5-8.5
DBO	5.000-60.000	<1.500
DQO	10.000-100.000	100-800

TOC	1.000-20.000	<200
Sólidos Totales	8.000-50.000	1.000-3.000
N (Total)	100-1.500	<100
Fosfatos	5-150	<5
Cl	50-3.000	100-500
Sulfatos	50-2.000	<50
Fe	100-2.500	10-400
Na	500-3.000	<500
K	200-1.000	50-400
Ca	500-3.000	100-500

Tabla 4.1- Análisis de los lixiviados de vertederos de residuos sólidos urbanos. (DBO: demanda bioquímica de oxígeno; BQO: demanda química de oxígeno; TOC: oxígeno consumido total;).

El líquido resultante puede tener una composición muy variable, aunque su grado de contaminación es muy elevado. En general, los sólidos disueltos, la dureza y los contenidos en Cl, SO₄, HCO₃, Na, K, Ca y Mg son muy elevados durante varios años. La agresividad depende del PH. Es típica una elevada demanda química y bioquímica de oxígeno, hasta llegar a veces a valores insólitos (más de 100.000 ppm en O₂). El líquido es muy reductor y suele contener mucho NH₄¹⁺ (hasta 1.500 ppm), así como Fe²⁺ y Mn²⁺ y a veces Zn²⁺ (hasta más de 1.000 ppm en algunos casos; Custodio y Llamas, 1983).

El flujo de los lixiviados en el material acuífero es como sigue: en la zona no saturada el flujo es eminentemente vertical, mientras que una vez alcanzada la zona saturada, el lixiviado se incorpora al sentido del flujo subterráneo. El grado de contaminación producido depende de la autodepuración que se puede producir durante la infiltración en el medio no saturado.

Con vista a minimizar los daños causados por la generación de estos residuos líquidos y pese a todo el conjunto de afectaciones que los mismos ocasionan al medio hídrico, según las experiencias obtenidas por los Programas de Aseo Urbano de distintas comunidades latinoamericanas, el Programa de Salud Ambiental para dicha región recomienda que como el área promedio a rellenar para disponer los desechos sólidos mediante la técnica de relleno sanitario no es muy grande, y por consiguiente los

volúmenes de percolado entonces serán también pequeños se puede optar por su infiltración en el suelo. Dicha alternativa esta dada por el hecho que, con el paso del tiempo, la carga contaminante de los lixiviados disminuye una vez terminado el relleno, donde además el suelo actúa como filtro natural.

4.2- Especificaciones sobre el vertimiento de aguas residuales (lixiviados) a las aguas terrestres y cuerpos receptores.

La preservación de la calidad de las aguas terrestres (agua de los ríos, lagunas, embalses y otros depósitos de aguas superficiales, así como las aguas subterráneas) adquiere cada vez mayor importancia por lo que implica para la sociedad las perdidas por concepto de deterioro de estas desde el punto de vista higiénico-sanitario, económico, ambiental, social, estético y cultural. A partir de toda la gama de riesgos y afectaciones que implica la utilización de aguas contaminadas se justifica la confección de una serie de normas y decretos que regulen el vertimiento a los cuerpos receptores y aguas terrestres de las aguas residuales, entiéndase por estas, todas las aguas cuya calidad original se ha degradado, en alguna medida, como consecuencia de su utilización en diferentes acciones y procesos (NC 27/99; 1999). De acuerdo con esto como los lixiviados constituyen los residuos líquidos generados en los procesos de fermentación y compactación de los residuos sólidos, los mismos se consideran como aguas residuales y están sujetos a las mismas normas que regulan su tratamiento y vertimiento.

En Cuba de acuerdo a la norma cubana confeccionada para estos fines (NC 27/99; 1999) el cuerpo receptor presente en el área de estudio se clasifica cualitativamente según su uso de la forma siguiente:

Clase (A): Ríos, embalses y zonas hidrogeológicas que se utilizan para la captación de aguas destinadas al abasto público y uso industrial en la elaboración de alimentos. La clasificación comprende a los cuerpos de aguas situados en zonas priorizadas de conservación ecológica.

Los **parámetros básicos** para las descargas que en dicha norma se consideran son los siguientes:

- pH
- Conductividad eléctrica
- Temperatura
- Grasas y Aceites

- Sólidos sedimentables totales
- Materia flotante
- Oxígeno disuelto
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Nitrógeno total (Kjeldahl)
- Fósforo total
- Coliformes fecales
- Compuestos tóxicos inorgánicos
- Compuestos tóxicos orgánicos

Los parámetros seleccionados no cubren el universo de posibilidades que hoy en día se pueden presentar en descargas individuales o mixtas. En las evaluaciones para casos específicos corresponde al organismo rector de las aguas terrestres señalar, si fuera necesario, otros parámetros a considerar y sus límites máximos permisibles promedio o cargas contaminantes permisibles, siempre de acuerdo con la clasificación de los cuerpos receptores, su estado sanitario actual y las prioridades para su conservación.

El límite máximo permisible promedio para las concentraciones en las descargas de aguas residuales, atendiendo a la clasificación cualitativa de los cuerpos receptores, no debe superar los relacionados en la tabla siguiente:

Parámetros	UM	Acuífero vertimiento en suelo y zona no saturada de 5 m (clase A)
pH	Unidades	6-9
Conductividad eléctrica	μ S/cm	1 500
Temperatura	°C	40
Grasas y aceites	mg/L	5
Materia flotante	-	Ausente
Sólidos Sedimentables Totales	mL/L	1,0

DBO ₅	mg/L	40
DQO (Dicromato)	mg/L	90
Nitrógeno total (Kjd)	mg/L	5
Fósforo total	mg/L	5

Tabla 4.2- Límites Máximos Permisibles Promedio para las Descargas de Aguas Residuales según la Clasificación del Cuerpo Receptor.

Las descargas de aguas residuales no podrán producir un aumento de la media geométrica del Número Más Probable de Coliformes Totales y Fecales en 100 mL (NMP/100mL) que supere los valores dados en la tabla 4.3.

Categoría del cuerpo receptor	NMP/100 mL Coliformes totales	NMP/100 mL Coliformes fecales	Relación CF/CT %
A (subterráneo)	100	20	20 %

Tabla 4.3- Indicadores de contaminación fecal máxima admisible en los cuerpos receptores según su clasificación cualitativa (NMP/100mL- número más probable en 100 mL).

Ningún vertimiento de aguas residuales efectuado en cuerpos receptores de categoría A podrá elevar los tenores de compuestos inorgánicos tóxicos y orgánicos tóxicos a valores superiores a los establecidos en las NC 93-11 y la NC 93-02 como concentraciones máximas admisibles.

Los límites máximos permisibles promedios para los parámetros seleccionados que se relacionan en la Tabla 4.2 corresponden a muestreos compuestos proporcionales al caudal de descargas efectuados en días representativos de la generación de las aguas residuales.

Los responsables de las descargas deberán informar al organismo rector de las aguas terrestres de cualquier cambio en sus acciones o procesos, cuando con ello ocasionen modificaciones en las características o en los volúmenes de aquellas aguas residuales que hubieran recibido permisos de vertimiento a un cuerpo receptor.

Los responsables de las descargas de residuales a los cuerpos receptores, tienen la obligación de realizar la caracterización de éstos mediante los análisis y mediciones correspondientes, con la finalidad de determinar si los parámetros relacionados en las Tablas 4.2 y 4.3 u otros cumplen con los Límites Máximos Permisibles Promedio regulados por dicha norma.

En el caso específico de la infiltración al suelo de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, con vista a proteger las aguas superficiales y subterráneas, el Programa de Salud Ambiental para Latinoamérica recomienda tomar las medidas siguientes:

- Verificar que las aguas subterráneas y superficiales cercanas no estén siendo utilizadas para el consumo humano o animal.
- Establecer una altura mínima de 1.0 a 2.0 m (depende de las características del suelo) entre la parte inferior del relleno y el nivel del agua subterránea.
- Tratar de contar con un suelo arcilloso o en su defecto impermeabilizar la parte inferior mediante una capa de arcilla de 0.30 – 0.60 m.
- Interceptar, canalizar y desviar el escurrimiento superficial y los pequeños hilos de agua, a fin de reducir el volumen de líquido percolado, y mantener en buenas condiciones la operación de relleno.
- Construir un sistema de drenaje para posibilitar la recolección del líquido percolado y facilitar su posterior tratamiento en caso necesario.
- Cubrir con una capa de tierra firme final de unos 0.40 a 0.60 m, compactar y sembrar las áreas del relleno que hayan sido terminadas con pasto o grama para disminuir la infiltración de aguas de lluvia.

4.3- Esclarecimiento de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio.

Para lograr un mejor entendimiento de las condiciones hidrogeológicas del área, se confeccionó un perfil geológico tentativo de esta (Plano 12), teniendo en cuenta las descripciones litológicas de las calas situadas dentro o en las cercanías del sector de estudio (Anexo 3, 4 y 5), así como el corte geoelectrico obtenido en los trabajos geofísicos realizados anteriormente (Plano 11). Se dice que este perfil geológico es tentativo, porque esta sujeto a comprobaciones futuras en zonas de dudas. En él se observa hacia la parte inferior, la presencia de una caliza organógena que esta cubierta y transiciona lateralmente con margas, estando cubiertos ambos estratos por un horizonte de arcilla que al parecer presentan cierta continuidad hacia el norte del área y una presencia a

verificar en la zona del relleno sanitario. Estos sedimentos pertenecientes al Paleógeno, se encuentran cubiertos de forma discordante por las formaciones rocosas del Mioceno, las cuales son las que funcionan como acuífero de interés y a la vez están cubiertas de forma discordante por los sedimentos del Cuaternario y el Holoceno Tardío.

Como se mencionó anteriormente, las rocas que funcionan como acuífero, son las calizas y calizas margosas correspondientes a las formaciones del Mioceno, principalmente las de la Formación Güines con un espesor aproximado de 21 m. Dentro de estas, las primeras se hallan afectadas por procesos cárnicos, por lo cual los valores de los parámetros hidrogeológicos calculados para los pozos con aforo, existentes en el área (Anexo 7) son variados debido a la anisotropía producida por estos procesos. De modo general estas rocas constituyen un acuífero libre, cuya alimentación está relacionada sobre todo con las precipitaciones atmosféricas.

La presencia de una caliza organógena en la parte inferior del corte (Plano 12) cubierta por un horizonte de margas y/o arcilla, nos hace pensar, que de presentar dicha caliza un comportamiento hidráulico similar al de las rocas miocénicas, estas podrían constituir el horizonte factible para la infiltración de los lixiviados, ya que el horizonte de arcilla serviría de sello evitando el ascenso de los lixiviados menos densos que el agua.

No obstante, para la correcta interpretación de las condiciones hidrogeológicas, es necesario realizar un examen detallado de los niveles, las características hidroquímicas y el comportamiento hidráulico de las aguas contenidas en los horizontes acuíferos de interés.

4.3.1- Análisis de las hidroisohipsas y de los niveles.

La dirección predominante del flujo comprobada para el período seco de 1987-1988 (Plano 7) y para principios del período húmedo del 2004 (Plano 8) es hacia el noreste con una ligera inclinación hacia el este, convergiendo en canales de flujo con el rumbo antes mencionado y con rumbo norte también, la definición de estos canales no es tan detallada en el plano correspondiente al período seco 1987 – 1988 debido a que el espaciamiento entre puntos de este sondeo es mayor que el del sondeo realizado para confeccionar el plano de hidroisohipsas del período húmedo del 2004, el cual se realizó con una mayor densidad de puntos con el objetivo de obtener un mayor grado de detalle.

A partir del plano de hidroisohipsas para principios del período húmedo del 2004 (01-03/06/2004) la profundidad de yacencia de las aguas oscila entre 1.76 y 6.20 m con un valor medio de 3.80 m, mientras que las cotas del agua oscilan entre 1.58 (al norte del área) y 6.28 metros sobre el nivel medio del mar (al suroeste del área) con un valor medio de 2.95 m sobre el nivel medio del mar, para un gradiente hidráulico con valores que oscila entre 0.00119 y 0.0027.

4.3.2- Análisis del comportamiento hidroquímico.

Para poder conocer las características hidroquímicas del sector de estudio, se realizó la búsqueda y revisión de la información ofrecida por los resultados del Laboratorio de Acueducto sobre los datos de análisis químico de 11 pozos diseminados por toda el área (Anexo 6), los mismos fueron tomados el 1ro de febrero de 1988, a finales del período seco 1987-1988.

Con los datos contenidos en estos, se confeccionó un mapa de Sales Solubles Totales (Plano 13), según el cual, las aguas subterráneas alojadas en el horizonte acuífero miocénico se caracterizan por ser dulces de acuerdo a la clasificación de O. A. Aliokin, su mineralización no supera el gramo por litro y oscila entre 538.00 y 652.00 mg/L, observándose las mayores concentraciones hacia la parte noreste. Los iones predominantes son el hidrogenocarbonato, el calcio y el magnesio, fluctuando entre los 299.00 – 348.00, 44.00 – 88.00 y 19.00 – 79.00 mg/L respectivamente. Al observar el Anexo 6, se puede notar que el calcio y el magnesio tienen un comportamiento bastante similar, a excepción de los pozos #12, # 19, RH -1950 donde el calcio supera marcadamente al magnesio, y en el pozo RH – 3287 donde esta situación se invierte. De acuerdo con esto y de modo general, teniendo en cuenta la clasificación de Kurlov, las aguas en el territorio varían de bicarbonatadas cálcicas magnesianas a bicarbonatadas magnésico cálcicas, estando en correspondencia con la estructura geológica del acuífero.

Por su parte, el contenido del ión cloro es relativamente bajo, comportándose por debajo de la concentración máxima deseable para aguas potables (200 mg/L), de acuerdo a la Norma Cubana NC 93-02 de 1985 que define los requisitos sanitarios y de muestreo para aguas potables, oscilando así, entre los 36 y 99 mg/L. Según el mapa de isocloruros construido (Plano 14), los mayores valores de este se registran hacia la porción noreste del mapa, coincidiendo así con la franja del área de estudio más próxima a los humedales y la línea de costa.

El nitrato presenta valores bastantes homogéneos y medianamente pequeños, en correspondencia a los expuestos en la Norma Cubana NC 93-02 de 1985 (45 mg/L de concentración máxima admisible), variando entre los 8.00 y 10.00 mg/L. Al analizar el comportamiento del anión SO_4^{2-} , se aprecia que el mismo oscila entre los 14.00 y 91.20 mg/L, mostrando valores muy inferiores a las concentraciones máximas deseables exigidas para el uso de las aguas potables (200 mg/L). Si se observa el mapa confeccionado para los sulfatos (Plano 15), se puede apreciar, que los mismos muestran pocas variaciones y sus mayores contenidos se registran de forma local alrededor del pozo RH-11296, disminuyendo hacia la franja central y norte del mapa.

4.3.3- Cálculo de los parámetros hidráulicos del acuífero.

Las características hidráulicas de las rocas de la zona fueron determinadas a partir del recalcu de los parámetros hidráulicos de cinco pozos con aforo (tres de estos con dos pruebas) presentes en el sector de trabajo con una profundidad total que varia de los 18.50 a los 26.52 metros. Los mismos fueron reevaluados a través del programa AQUITEST por los métodos de Cooper y Jacob (Tiempo vs Abatimiento), Theis, y el método de recuperación de Theis y Jacob, para acuíferos no confinados. La descripción de estos métodos se muestra a continuación:

➤ Método de Theis

Theis (1935) resolvió la ecuación de flujo de no-equilibrio en coordenadas radiales de la siguiente forma:

$$S = \frac{Q}{4\pi * T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad 4.1$$

Donde:

$$u = \frac{r^2 * \mu}{4T * t} \quad 4.2$$

$$S = h_0 - h_i \quad 4.3$$

Para una definición específica de u mencionemos que la integral es conocida como la “función del pozo” ($W(u)$), y puede ser representada por una serie infinita de Taylor de la siguiente forma:

$$W(u) = -0.5772 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2 * 2!} + \frac{u^3}{3 * 3!} \dots \quad 4.4$$

Usando esta función, la ecuación se convierte en:

$$S = \frac{Q}{4\pi * T} * W(u) \quad 4.5$$

En un gráfico bilogaritmico el ploteo de la relación $W(u)$ por el eje de las “y” versus $1/u$ por el eje de las “x” es comúnmente llamado “curva de Theis “. Las mediciones de campo son igualmente ploteados en un grafico bilogaritmico con el tiempo (t) por el eje de las “x” y el abatimiento (s) por el eje de las “y”. El análisis de los datos se hace igualmente la curva correspondiente a los datos observados con la curva tipo, obteniéndose a partir de un punto común a las curvas de los datos los valores de $W(u)$, $1/v$, S y t para los cuales es calculado el valor de la transmisibilidad (T) y el coeficiente de almacenamiento (μ) según las ecuaciones siguientes:

$$T = \frac{Q}{4\pi * S} \quad 4.6$$

$$\mu = \frac{4T * t * u}{r^2} \quad 4.7$$

Donde:

Q - Gasto de bombeo

r - Distancia radial

t - Tiempo de bombeo

S - Abatimiento

La solución de Theis asume las siguientes condiciones:

1. El acuífero es confinado y tiene una extensión aparentemente infinita.
2. El acuífero es homogéneo, isotrópico, de espesor uniforme en el área influenciada por el bombeo.
3. La superficie piezométrica era horizontal antes de comenzar el bombeo.
4. El pozo es bombeado a un gasto constante.
5. El pozo es completamente penetrante.

6. El agua es descargada instantáneamente con una diferencia de carga.
7. El diámetro del pozo es tan pequeño que el almacenamiento de agua en el mismo es despreciable.

Los datos requeridos para la solución de Theis son:

- Abatimiento y tiempo en un pozo de observación.
- Distancia del pozo de observación al pozo de bombeo.

➤ Método de Cooper - Jacob

Cooper y Jacob observaron que después de un tiempo de bombeo el parámetro u se convierte muy pequeño. Si u , $\left[\frac{r^2 * \mu}{4 * T * t}\right] < 0.05$ entonces se pueden ignorar todos los elevados valores de u y simplificando se llega a la ecuación siguiente:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi * (h_0 - h)} * \log\left(\frac{2.25T * t}{r^2 * \mu}\right) \quad 4.8$$

Si la condición límite de u es encontrada se plotea una línea recta sobre papel semilogaritmico. Esto puede ser verdadero para valores mayores de t o pequeños de r . Así la línea recta ploteada de abatimiento contra tiempo puede ocurrir después que ha pasado suficiente tiempo luego del inicio de bombeo. En prueba de bombeo con muchos pozos satélites, los pozos más cercanos encontraran las condiciones antes que los más distantes.

En este método se dibuja una línea recta a partir de los datos obtenidos en el campo y extrapolada hasta el eje de cero abatimiento. Este eje deberá interceptar en algún valor positivo de tiempo, el que es denotado por t_0 . El valor de la diferencia de abatimiento por ciclo logarítmico de tiempo $[\Delta(h_0 - h)]$ es obtenido de la pendiente del gráfico. Los valores de transmisibilidad (T) y coeficiente de almacenamiento (μ) pueden ser calculados a partir de las ecuaciones siguientes:

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi * \Delta(h_0 - h)} \quad 4.9$$

$$\mu = \frac{2.25T * t_0}{r^2} \quad 4.10$$

Donde:

$\Delta (h_0-h)$ - Diferencia de abatimiento para un ciclo logarítmico

Q - Gasto de bombeo

r - Distancia radial

t_0 -Tiempo de bombeo

Según Fetter, 2001 si se comparan las soluciones teóricas de Cooper y Jacob con las soluciones de Theis se puede observar que son casi iguales, solo que como son métodos gráficos pueden ocurrir pequeñas variaciones en los resultados.

La solución de Cooper y Jacob asume las siguientes condiciones:

1. El acuífero es confinado y tiene una extensión aparentemente infinita.
2. El acuífero es homogéneo, isotrópico, de espesor uniforme en el área influenciada por el bombeo.
3. La superficie piezométrica era horizontal antes de comenzar el bombeo.
4. El pozo es bombeado a un gasto constante.
5. El pozo es completamente penetrante.
6. El agua es descargada instantáneamente con una diferencia de carga.
7. El diámetro del pozo es tan pequeño que el almacenamiento de agua en el mismo es despreciable.
8. Los valores de u son pequeños ($u < 0.05$).

Los datos requeridos para la solución de Cooper y Jacob son:

- Abatimiento y tiempo en un pozo de observación.
- Distancia del pozo de observación al pozo de bombeo.

➤ **Prueba de recuperación de Theis – Jacob**

La recuperación del nivel del agua en un pozo de bombeo puede ser usado para estimar la transmisibilidad del acuífero. El análisis de la recuperación puede ser usada para confirmar los valores obtenidos usando los datos de la prueba de bombeo, o este puede ser el único dato disponible en el caso donde solo se dispone de un pozo de bombeo. En casos donde no se dispone de pozos de observación y es necesario estimar las características del acuífero con solo un pozo de bombeo, los datos del nivel de agua

durante la prueba de bombeo no deben ser usados debido a que están sujetos a las “perdidas en el pozo” las cuales causan que el abatimiento en el pozo sea significativamente mayor que el abatimiento en el acuífero en la vecindad del pozo. Esto puede ser solucionado mediante la recuperación del nivel en el pozo después que se ha finalizado el bombeo.

Acorde a Theis (1935), el abatimiento residual después que el bombeo a cesado es:

$$S' = \frac{Q}{4\pi * T} * W(u) - W(u') \quad 4.11$$

Donde:

$$u = \frac{r^2 * S}{4T * t} \quad u' = \frac{r^2 * S'}{4T * t'}$$

Q - Gasto constante.

T- Transmisibilidad.

r - Distancia al pozo de observación.

s'-Abatimiento residual.

s y s'-Valores de abatimiento durante el bombeo y la recuperación respectivamente.

t y t' - Tiempos transcurridos del comienzo y final del bombeo respectivamente.

Usando la aproximación para W(u) mostrado en el método de Cooper y Jacob la ecuación 4.11 se convierte en :

$$S' = \frac{Q}{4\pi * T} \left(\ln \frac{4T * t}{r^2 * S} - \ln \frac{4T * t'}{r^2 * S'} \right) \quad 4.12$$

Donde:

S y S' son constantes e iguales.

T es constante.

Esta ecuación puede ser reducida a:

$$S' = \frac{2.3Q}{4\pi * T} * \log \left(\frac{t}{t'} \right) \quad 4.13$$

Cuando S y S' son constantes pero diferentes y T es constante, la línea recta a través de los datos intercepta el eje de las x, donde S'=0 y donde t/t'=(t/t')₀. como resultado se obtiene la siguiente ecuación:

$$O = \frac{2.3Q}{4\pi * T} * \left[\log\left(\frac{t}{t'}\right)_0 - \log\frac{s}{s'} \right] \quad 4.14$$

Debido a que $\frac{2.3Q}{4\pi * T} = 0$, entonces el $\log(t/t')_0 - \log(s/s')_0$, y por tanto $(t/t')_0 = s/s'$ determinándose la relación relativa de S.

Para analizar estos datos, S' es ploteada sobre el eje de las "Y" en escala logarítmica y el tiempo es ploteado sobre el eje de las "X" en escala lineal como la relación de t/t' (tiempo total desde que comenzó el bombeo dividido por el tiempo desde que cesó el bombeo).

La prueba de recuperación de Theis y Jacob asume lo siguiente:

1. El acuífero es confinado y tiene una extensión aparentemente infinita.
2. El acuífero es homogéneo, isotrópico, de espesor uniforme en el área influenciada por el bombeo.
3. La superficie piezométrica era horizontal antes de comenzar el bombeo.
4. El pozo es bombeado a un gasto constante.
5. El pozo es completamente penetrante.
6. El agua es descargada instantáneamente con una diferencia de carga.
7. El diámetro del pozo es tan pequeño que el almacenamiento de agua en el mismo es despreciable
8. Los valores de u son pequeños ($u < 0.05$).

Los datos requeridos para la solución de este método son:

- Datos de recuperación vs tiempo en un pozo de bombeo.
- El gasto y el tiempo en que el bombeo fue parado.

4.3.4- Análisis de los resultados obtenidos por los métodos utilizados.

Los resultados obtenidos de los parámetros hidráulicos (transmisividad, coeficiente de filtración y coeficiente de almacenamiento) por los métodos antes expuestos corresponden, de acuerdo a la ubicación y profundidad de los pozos con aforo, a las secuencias miocénicas, fundamentalmente a la Formación Güines y los mismos se relacionan en el Anexo 7. El análisis estadístico de estos parámetros aparece en la tabla 4.4, según la cual, las calizas y calizas margosas miocénicas son capaces de coleccionar y/o

entregar determinada cantidad de agua, con transmisividades que oscilan entre los 1 432.32 y 3 1008.00 m²/día, para un valor medio general de 7 820.22 m²/día. Por su parte el coeficiente de filtración varía entre 96.65 y 1 384.29 m/día con un valor medio de 495.58 m/día. El coeficiente de almacenamiento a su vez oscila entre 0.0046 y 0.350, para una media de 0.086. El alto grado de variabilidad observado en los valores de estos parámetros, se debe a que las rocas que funcionan como acuífero se hallan afectadas en diferente grado por procesos cárcicos, lo que da lugar a una alta anisotropía.

Parám.	Aspectos	Cooper y Jacob Tiempo - Abat.	Theis	Recup. Theis y Jacob	media	Unidad
		No Confinado	No Confinado	No Confinado		
T	n	8	8	8	8	U
	Min	1169.28	989.28	1258.56	1432.32	m ² /día
	Max	28944.00	13248.00	50832.00	31008.00	m ² /día
	Media	8168.76	4313.52	10978.38	7820.22	m ² /día
	Sn-1	9225.75	4894.74	16611.05	9941.96	m ² /día
	CV	1.13	1.13	1.51	1.27	Adim
K	n	8	8	8	8	U
	Min	95.69	87.40	84.92	96.65	m/día
	Max	1668.46	591.43	2269.29	1384.29	m/día
	Media	577.97	244.40	664.36	495.58	m/día
	Sn-1	591.81	198.37	740.26	464.20	m/día
	CV	1.02	0.81	1.11	0.94	Adim
μ	n	3	4		3.5	U
	Min	0.0000	0.0093		0.0046	Adim
	Max	0.350	0.030		0.350	Adim
	Media	0.126	0.020		0.086	Adim
	Sn-1	0.194	0.008		0.148	Adim
	CV	1.54	0.42		1.71	Adim

Tabla 4.4- Análisis estadístico de los parámetros hidráulicos.

4.4- Cálculo del volumen de lixiviados y total de aguas a infiltrar.

El cálculo del volumen de lixiviados generados en el Relleno Sanitario La Rosa se realizó a través del Método Básico de Balance de Agua, a partir del cual, según Gómez-Martín, Antigüedad Auzmendi, 1997, el balance general global de agua en un vertedero de residuos sólidos urbanos, sin considerar otros aspectos de detalle (como el consumo de agua por la descomposición de los residuos y generación de gas, por ejemplo) se puede expresar mediante la ecuación siguiente:

$$L = (P+W_{gw}+W_d) - (R+EVP+L_i)$$

Donde:

L: cantidad de lixiviados generados.

P: precipitaciones directas sobre el área de vertido.

W_{gw} : penetración de aguas subterráneas al vertedero.

W_d : agua aportada por la descomposición de los residuos.

R: aguas debidas a la escorrentía superficial.

EVP: evapotranspiración.

L_i : salida subterránea de lixiviados directamente al medio circundante.

Si el vertedero ha sido correctamente diseñado, no debe de haber entrada de aguas subterráneas (W_{gw} nulo), ni salida de lixiviados hacia las aguas subterráneas del entorno (L_i nulo), así como tampoco, salidas de agua del vertedero por escorrentía superficial. El agua aportada por la descomposición de los residuos (W_d) puede considerarse en general, despreciable frente a las entradas por precipitación (P) y la consiguiente percolación. Con estas simplificaciones la ecuación anterior se puede expresar de la forma resumida siguiente:

$$L = P - EVP$$

De acuerdo con esto las precipitaciones directas sobre el área de vertido (P) se calcularon a partir de la media histórica para cada mes, según los registros de una serie de más de 35 años de observaciones del pluviómetro CA-644 (Anexo 2), ubicado en las cercanías

del relleno sanitario. Por su parte los valores de evapotranspiración (EVP) se obtuvieron a través de la utilización del método semiempírico de Penman, según el cual, esta se puede calcular de la manera siguiente:

$$EVP = f \cdot d \cdot EV$$

Siendo:

f: coeficiente reductor correspondiente al mes.

d: número de días del mes.

EV: evaporación en superficie de agua libre en mm/día.

Los valores de evaporación en superficie de agua libre se adquirieron gracias a los datos ofrecidos por la Estación Meteorológica de Falla, correspondiendo a una serie de 15 años de observaciones. Estos fueron dados en mm/mes, por lo que en la fórmula de evapotranspiración se puede omitir la multiplicación por los días del mes.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se realizó el cálculo por mes, del volumen y caudal medio de los lixiviados generados en las 6 hectáreas (60 000 m²) que ocupa el Relleno Sanitario La Rosa. Estos se relacionan en la tabla 4.5 donde aparecen también, los datos utilizados para la realización de estos cálculos.

Meses	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
EV (mm/mes)	122.6	141.7	189.8	206.5	202.7	195.6	209.2	200.6	170.5	145.4	120.2	112.4	-
EV (mm/d)	3.95	5.06	6.12	6.88	6.54	6.52	6.75	6.47	5.68	4.69	4.01	3.63	-
f	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	-
ETP (mm/mes)	73.56	85.02	132.86	144.55	162.16	156.48	167.36	160.48	119.35	101.78	72.12	67.44	1443.16
P (mm/mes)	29.65	29.51	43.51	48.85	180.57	184.62	92.02	118.90	178.45	142.70	78.92	35.54	1163.23
Lixiv (mm/mes)	0	0	0	0	18.413	28.141	0	0	59.099	40.918	6.8005	0	153.37

Vol. de lixiv. en las 6 Ha (m ³ /mes)	0	0	0	0	1104.8	1688.4	0	0	3545.9	2455.1	408.03	0	9202.185
Q de lixiv (L/s)	0	0	0	0	0.4262	0.6514	0	0	1.368	0.9472	0.1574	0	3.550226

Tabla 4.5- Volumen y gastos máximos medios de lixiviados generados en las 6 Ha del relleno sanitario.

Del análisis de esta tabla se deduce que, según el comportamiento histórico, los máximos valores de lixiviados generados en el área corresponden al mes de septiembre, con 59.10 mm/mes, los que equivalen en las 6 hectáreas del relleno a un volumen total de 3 546 m³/mes. De acuerdo con esto, el caudal máximo medio de lixiviados que a los efectos de esta investigación se deben de infiltrar al subsuelo corresponde a 1.37 L/s.

No obstante, para evitar interrupciones durante la operación del relleno sanitario, se determinó el gasto máximo de agua a evacuar en este según el Método de Cálculo del Módulo de Drenaje (Pérez Monteagudo, 1981), utilizando una lluvia máxima del 1% de probabilidad de 350 mm, la cual fue obtenida después de ser procesada por métodos estadísticos la serie de observaciones de lluvias máximas del pluviómetro CA-644. El cálculo de los gastos máximos se realizó para precipitaciones de 1%, 5% y 10 % de probabilidad, en distintos tiempos de evacuación (5, 12 y 24 horas), empleando para ello las fórmulas siguientes:

$$Q = q \cdot A$$

Donde:

Q: gasto.

q: modulo de drenaje ó caudal por unidad de área a recoger o evacuar del relleno.

A: área del relleno sanitario (60 000 m²).

$$q = \frac{166.7 \cdot P_0 \cdot \eta}{T}$$

Siendo:

P_0 : precipitaciones a diferentes probabilidades.

η : coeficiente de escurrimiento.

T: tiempo en el cual se va a evacuar el escurrimiento.

Los valores de gastos máximos a infiltrar para las condiciones antes mencionadas se relacionan en la tabla 4.6.

Área del vertedero	5 Horas			12 Horas			24 Horas		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
Gastos generados (L/s)	735	478	382	411	267	214	251	164	131

Tabla 4.6- Gastos máximos a infiltrar según una lluvia máxima de 1% de probabilidad de 350 mm, para 1%, 5% y 10% de probabilidades de ocurrencia, de acuerdo a un tiempo de evacuación de 5, 12 y 24 horas.

4.5- Alternativas para la infiltración de los lixiviados y las aguas pluviales que se pueden acumular en relleno sanitario.

Atendiendo al fin de la presente investigación y teniendo en cuenta las condiciones hidrogeológicas y geológicas del área de estudio, se propone el análisis de las siguientes alternativas para la infiltración de los lixiviados generados en el relleno sanitario, así como de las aguas pluviales que por concepto de precipitaciones directas sobre la masa de vertido, se pueden acumular en este.

➤ ***1) Infiltración de los lixiviados y de las aguas pluviales en las rocas de la Formación Güines.***

Teniendo en cuenta que las secuencias correspondientes a la Formación Güines constituyen el horizonte acuífero principal en el sector de trabajo, para la infiltración de los lixiviados en las calizas de este complejo, se deberá someter a los mismos, a un tratamiento primario que garantice que los efluentes obtenidos como resultado de tal proceso, cumplan con los requisitos expuestos en la Norma Cubana NC-27/99 que regula el vertimiento de estas sustancias a las aguas terrestres y sus cuerpos receptores.

Para la evacuación al subsuelo de dichos residuos líquidos y las aguas totales que pueden acumularse en el relleno, considerando que el complejo litológico de interés tiene un espesor aproximado de 21 m, se prevee la construcción de uno o varios pozos (en dependencia del gasto que estos puedan evacuar), cuya profundidad total será de 19 metros. Dichos pozos se comenzarán a perforar con un diámetro de 500 mm hasta la profundidad de 14 m, a partir de donde se seguirán las labores de perforación pero con un diámetro de 400 mm. En el intervalo de 0 a 14 m se instalarán camisas sin ranuración (ciegas) y se procederá a la cementación de este intervalo, situándose en los 5 m restantes filtros con un 25 % de ranuración, todo esto, con el objetivo de que la infiltración de las sustancias contaminantes se realice hacia la parte más baja del horizonte acuífero. El diseño final de estos pozos se refleja en el Plano 16.

La estimación del caudal que se puede infiltrar en estas secuencias, considerando las características de los pozos descritos primeramente, se determinó a través del despeje de la ecuación para calcular el coeficiente de filtración (k) según el método de vertimiento en calas en acuíferos freáticos, más específicamente para el caso de vertimiento en zonas de saturación en presencia de acuíferos con un espesor considerable (mayor que 5 m)(De Miguel, F C, 1999). Dicha formula plantea que:

$$k = \frac{Q}{l_o \cdot H_o} \cdot \log\left(\frac{0.66 \cdot l_o}{r_o}\right)$$

Siendo:

Q: gasto estabilizado de vertimiento (m³/día).

l_o: largo del tramo en prueba (largo del filtro en m).

H_o: carga hidrostática sobre el nivel del agua natural (m).

r_o; radio de la cala.

De la expresión anterior se deduce que:

$$Q = \frac{k \cdot l_o \cdot H_o}{0.525 \cdot \log\left(\frac{0.66 \cdot l_o}{r_o}\right)}$$

Para realizar los cálculos en esta ecuación, se asumió que los valores máximos de carga hidrostática sobre el nivel del agua natural para el sitio específico del relleno, deben estar por el orden de los 3.5 m. Esta consideración se tomo teniendo en cuenta las mediciones de la profundidad de yacencia de la aguas subterráneas efectuadas el 14 de abril del

2005, en un pozo abandonado ubicado a orillas de la zona de vertido. Por su parte, para el coeficiente de filtración, se tomo el valor medio de 244.4 m/día, obtenido por el método de Theis a través del calculo de los parámetros hidrogeológicos de los afloros existentes en el área (Tabla 4.4), prestando atención a que dicho valor estadísticamente presenta un coeficiente de variación comparativamente menor a los logrados por los otros métodos, reflejando así, un comportamiento más homogéneo de la serie que él representa. Finalmente conociendo que el radio del pozo es de 200 mm (0.2 m) en el tramo de prueba (5 m) se tiene entonces que:

$$Q = \frac{244.4m / día \cdot 5m \cdot 3.5m}{0.525 \cdot \log\left(\frac{0.66 \cdot 5m}{0.2m}\right)}$$

$$Q = 6\,661.395 \text{ m}^3/\text{día} = 77.10 \text{ L/s}$$

De acuerdo con esto, las rocas de la Formación Güines son capaces de asumir, según las particularidades del pozo descrito anteriormente, un gasto de 77.10 L/s. No obstante, como en el proceso de infiltración van a escurrir a través del pozo, aguas con sólidos en suspensión y una composición química y bacteriología que acelera el proceso de colmatación, originando así el deterioro y la disminución del gasto específico que inicialmente puede asumir este, se prevee, según las recomendaciones para estos casos de Olof Anderson et al. 1997, (Anexo 9) que el mantenimiento del pozo no se realice hasta que su eficiencia descienda a un valor cercano al 75 % (o sea que el gasto específico descienda un 25 %), por lo que entonces, el caudal mínimo a infiltrar por el mismo será el producto de la eficiencia por el gasto que él es capaz de evacuar ($0.75 \cdot 77.10 \text{ l/s}$), resultando así de 57.82 L/s.

Este valor, correspondiente a la capacidad de drenaje de un solo pozo, garantiza sobradamente el escurrimiento a dicho horizonte del volumen de lixiviados generados en el relleno sanitario, pero a su vez, resulta insuficiente para evacuar los gastos máximos de aguas totales que se producen según una lluvia máxima de 1% de probabilidad de 350 mm, para 1%, 5% y 10% de probabilidades de ocurrencia, lo cual ocasionaría paralizaciones en las operaciones de vertido por un lapso de tiempo determinado. De acuerdo con esto, con el fin de minimizar tales afectaciones, determinamos la cantidad de pozos necesarios para infiltrar dichas aguas (Tabla 4.7), según un tiempo de evacuación

de 5, 12 y 24 horas, dividiendo para ello, los valores de gastos máximos producidos por las lluvias, con los gastos mínimos que pueden asimilar los pozos (57.82 L/s).

Área del vertedero	5 Horas			12 Horas			24 Horas		
	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
Gastos generados (L/s)	735	478	382	411	267	214	251	164	131
# de Pozos	13	9	7	8	5	4	5	3	3

Tabla 4.7. Número de pozos a construir con un gasto mínimo de 57.82 L/s, para infiltrar los gastos máximos de aguas totales originados por una lluvia máxima de 1% de probabilidad de 350 mm, para 1%, 5% y 10% de posibilidades de ocurrencia, de acuerdo a un tiempo de evacuación de 5, 12 y 24 horas.

A partir de los datos relacionados en esta tabla, queda sujeto a elección del inversionista, la cantidad de pozos a ejecutar para que el funcionamiento del relleno sanitario no se vea afectado por las inundaciones.

➤ ***II) Infiltración de los lixiviados y de las aguas pluviales en las rocas de la Formación Chambas.***

Pese a que en el alcance del presente estudio, no se caracterizan hidrogeológicamente las rocas de la Formación Chambas, la presencia de calizas organógenas correspondientes a esta formación en la parte inferior del corte geológico (Plano 12), cubiertas a su vez, por un horizonte de margas y/o arcillas, hacen pensar que de presentar dichas calizas un comportamiento hidráulico similar al descrito para las rocas miocénicas, estas podrían constituir un horizonte factible para la infiltración de los lixiviados, ya que el horizonte de arcilla serviría de sello, evitando el ascenso de los lixiviados menos densos que el agua. No obstante, para el vertimiento de estos residuos líquidos a dichas calizas, se deberá someter también a los mismos, a un sistema de tratamiento que asegure que los efluentes obtenidos como resultado de tal proceso, cumplan con los requisitos expuestos en la Norma Cubana NC-27/99 que regula el vertimiento de estas sustancias a las aguas terrestres y sus cuerpos receptores.

La selección de esta alternativa estará condicionada por la realización de trabajos (ya en marcha) que determinen la continuidad espacial del estrato de calizas y del lente de arcillas y/o margas que pudiesen servir de sello. En estos estudios también se deberán efectuar los cálculos de los parámetros hidráulicos de dichas rocas con el objetivo de esclarecer las particularidades hidrogeológicas de estas.

4.6- Monitoreo de la calidad de las aguas.

Pese a que el vertimiento de los lixiviados al subsuelo disminuye los daños causados por estos al medio en general, los mismos producirán como es evidente, un descenso en la calidad de las aguas subterráneas del entorno en que ellos han sido infiltrados.

Tales afectaciones se ven en alto grado minimizadas si dichas sustancias contaminantes se someten a un sistema de tratamiento primario que asegure que los efluentes obtenidos como resultado de ese proceso cumplen con las exigencias y requisitos existentes para preservar la calidad de esas aguas (NC 27/99; 1999, y otras).

No obstante, según las experiencias obtenidas por los Programas de Aseo Urbano de distintas comunidades latinoamericanas, el Programa de Salud Ambiental para dicha región recomienda la planificación de un sistema de monitoreo que detecte tempranamente el posible deterioro que pueden sufrir las aguas subterráneas.

Con vista al control y evaluación de la calidad de las mismas, se debe efectuar el análisis de los parámetros siguientes:

- ✓ Ph
- ✓ Demanda química de oxígeno (DQO), mg/L.
- ✓ Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), mg/L.
- ✓ Nitratos, mg/L.
- ✓ Cloruros, mg/L.
- ✓ Sulfatos, mg/L.
- ✓ Recuento total de colonias, colonias /mL.
- ✓ Conductividad, μ S/cm

Los análisis de laboratorio de las muestras de agua subterráneas cercanas se pueden hacer intensivos durante los primeros meses y menos frecuentes una vez se perciban valores constantes en los resultados.

De acuerdo con lo anterior y en concordancia con las alternativas valoradas en el epígrafe anterior, se propone para cada caso los sistemas de monitoreo siguientes:

- 1- Para el caso de que la infiltración se realice en las secuencias pertenecientes a la Formación Güines, se recomienda la construcción de 2 pozos de monitoreo con una profundidad de 25 m cada uno, de forma que corten la mayor parte del espesor de estas rocas. Los mismos estarán situados a 100 m de distancia del límite del relleno sanitario, en dirección norte y noreste, aguas abajo.

- 2- Para el caso de que el vertimiento de los lixiviados se realice en las calizas de la Formación Chambas, se sugiere la construcción de 4 pozos de monitoreo. De ellos 2 se harán con una profundidad total de 40 m, de modo que alcancen bien los estratos de calizas de esta formación. Estos se ubicarán uno en dirección noreste y el otro en dirección norte, a 100 m aguas abajo del límite del relleno sanitario. Los 2 pozos restantes conservarán la misma dirección que los pozos anteriores, y se situarán a 100 m de estos aguas abajo. Los mismos se construirán con una profundidad de 25 m, con el objetivo de observar si el horizonte acuífero miocénico sufre alguna afectación por el escape de contaminantes a este complejo, desde las secuencias carbonatadas del Paleógeno.

Independientemente de la variante que se aplique, se deberán realizar análisis químicos y bacteriológicos con cierta sistematicidad en la fuente de abasto de la cooperativa La Rosa, situada al noreste de la zona de vertido, pese a que la misma no se encuentra en la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Dichos análisis tendrán como fin controlar la calidad de sus aguas y registrar las posibles afectaciones que estas pueden sufrir por la ejecución de las acciones que implican la infiltración de los lixiviados al subsuelo.

CONCLUSIONES.

Como resultado de los trabajos realizados se llegan a las conclusiones siguientes:

- De acuerdo a los datos logrados en esta investigación, las secuencias de la Formación Güines constituyen un horizonte factible para la infiltración de los lixiviados.
- Si las calizas organógenas correspondientes a la Formación Chambas, presentes en la parte inferior del corte geológico, mostrarán un comportamiento hidráulico similar al descrito para las rocas miocénicas, estas constituirían el horizonte más factible para la infiltración de los lixiviados, ya que el estrato de arcilla que la cubre serviría de sello, evitando el ascenso de los lixiviados menos densos que el agua.
- Las rocas que funcionan como acuífero en el área de estudio son las calizas y calizas margosas correspondientes a las formaciones del Mioceno, principalmente las de la Formación Güines con un espesor aproximado de 21 m.
- Las secuencias miocénicas conforman un acuífero libre, cuya alimentación esta relacionada sobre todo con las precipitaciones atmosféricas.
- Las calizas y calizas margosas miocénicas presentan transmisividades medias que oscilan entre los 1 432.32 y 31 008.00 m²/día, para un valor medio general de 7 820.22 m²/día. El coeficiente de filtración de estas, varía entre 96.65 y 1 384.29 m/día, con un valor medio de 495.58 m/día y el coeficiente de almacenamiento se encuentra entre los 0.0046 y 0.350, para una media de 0.086.
- Los valores de los parámetros hidrogeológicos de las rocas miocénicas, son relativamente altos y presentan un elevado grado de variabilidad, debido a la anisotropía producida por los procesos cársicos que las afectan.
- Según el comportamiento histórico, los máximos valores de lixiviados generados en el relleno sanitario son de 59.10 mm/mes (correspondientes al mes de septiembre), los que equivalen en las 6 hectáreas que este ocupa, a un volumen total de 3 546 m³/mes, siendo entonces el caudal máximo medio a infiltrar de 1.37 L/s.

- Los gastos máximos a infiltrar por la acumulación en el relleno sanitario, de los lixiviados y aguas de precipitaciones directas sobre el área de vertido, oscilan entre 131.0 y 735.0 L/s, según una lluvia máxima del 1% de probabilidad de 350 mm, para diferentes probabilidades de ocurrencia y tiempos de evacuación.
- Las rocas de la Formación Güines son capaces de evacuar un gasto de 77.0 L/s, según un coeficiente de infiltración de 244 m/día, una carga hidrostática máxima de 3.5 m, un espesor saturado de 17.5 m y las particularidades de los pozos diseñados para la infiltración de los lixiviados y las aguas totales.
- Teniendo en cuenta las condiciones señaladas en el punto anterior, las rocas de la Formación Güines pueden evacuar un gasto específico de 22.0 L/s·m.
- El caudal mínimo a infiltrar por los pozos diseñados para estos fines es de 57.82 L/s, según un funcionamiento del 75 % de eficiencia y una carga hidrostática sobre el nivel del agua natural de 3.5 m.
- El número de pozos a construir con un gasto mínimo de 57.82 L/s, para infiltrar los gastos máximos de lixiviados y aguas totales originados por una lluvia máxima de 1% de probabilidad de 350 mm, según diferentes probabilidades de ocurrencia y tiempos de evacuación, varía entre los 3 y 13 pozos, quedando sujeto a la elección del inversionista en función de sus intereses.
- La dirección predominante del flujo de las aguas subterráneas, comprobada para el período seco de 1987-1988 (Plano 7) y para principios del período húmedo del 2004 (Plano 8) es hacia el noreste con una ligera inclinación hacia el este, convergiendo en canales de flujo con el rumbo antes mencionado y con rumbo norte también.
- La profundidad de yacencia de las aguas, según el plano de hidroisohipsas para principios del período húmedo del 2004 (01-03/06/2004), oscila entre los 1.76 y 6.20 m con un valor medio de 3.80 m, mientras que las cotas del agua varían entre 1.58 y 6.28 metros sobre el nivel medio del mar, para un valor medio de 2.95 m y un gradiente hidráulico que oscila entre 0.00119 y 0.0027.

- La calidad química de las aguas a infiltrar no cumple con los requisitos expuestos en la Norma Cubana NC-27/99 que regula el vertimiento de tales sustancias a las aguas terrestres y sus cuerpos receptores.
- Las aguas subterráneas alojadas en los horizontes acuíferos de la zona, se caracterizan por ser dulces, según la clasificación de O. A. Aliokin.
- Los iones predominantes son el hidrogenocarbonato, el calcio y el magnesio, fluctuando entre los 299.00 – 348.00, 44.00 – 88.00 y 19.00 – 79.00 mg/L respectivamente.
- De acuerdo a la clasificación de Kurlov, las aguas en el territorio varían de bicarbonatadas cálcicas magnesianas a bicarbonatadas magnésico cálcicas, estando en correspondencia con la estructura geológica del acuífero.
- Los contenidos de los iones cloro, nitrato y sulfato, son relativamente bajos y bastante homogéneos. Sus valores están por debajo de las concentraciones máximas deseables y admisibles para las aguas potables, de acuerdo a la Norma Cubana NC. 93-02 de 1985.
- La calidad química de las aguas subterráneas presentes en el área de estudio es buena, según muestras tomadas el 1ro de febrero de 1988 (período seco 1987-1988), ya que todos los valores se encuentran por debajo de las concentraciones máximas deseables y admisibles para las aguas potables, de acuerdo a la Norma Cubana NC. 93-02 de 1985.
- La constitución geológica de la zona del relleno sanitario “La Rosa” y sus áreas adyacentes es relativamente tranquila.
- Se considera que el sector de estudio ha tenido una evolución estructural y geodinámica relativamente tranquila y estable.

RECOMENDACIONES:

Como resultado de los trabajos realizados se emiten las recomendaciones siguientes:

- Según el volumen de datos logrados en el alcance de esta investigación, la infiltración de los lixiviados se debe realizar en las rocas de la Formación Güines.
- Con vista a determinar si las calizas organógenas de la Formación Chambas, resultan el horizonte más factible para la infiltración de los lixiviados y aguas pluviales que se pueden acumular en el relleno sanitario, se deberán realizar investigaciones más profundas donde se determine la continuidad espacial de estas y el estrato de arcillas y/o margas que pudiesen servir de sello. Igualmente se deberán caracterizar los parámetros hidráulicos con el objetivo de esclarecer las particularidades hidrogeológicas y estimar el caudal que las mismas pueden asumir.
- Para el vertimiento de los lixiviados al subsuelo, se deberán someter a los mismos, a un tratamiento primario que asegure que los efluentes obtenidos como resultado de tal proceso, cumplan con los requisitos expuestos en la Norma Cubana NC-27/99 que regula el vertimiento de estas sustancias a las aguas terrestres y sus cuerpos receptores.
- Perfeccionar y ejecutar los sistemas de monitoreo planificados, de modo que se puedan detectar más tempranamente y con mayor eficiencia, las posibles afectaciones que puedan sufrir las aguas subterráneas por la infiltración de los lixiviados.
- Efectuar análisis químicos y bacteriológicos con cierta sistematicidad en la fuente de abasto de la “Cooperativa La Rosa”, para controlar la calidad de sus aguas y registrar las posibles afectaciones que estas pueden sufrir, por la ejecución de las acciones que se valoran en esta investigación, pese a que dicha fuente no se encuentre en la dirección predominante del flujo subterráneo.
- Realizar estudios que permitan evaluar y caracterizar la composición de los lixiviados en el relleno sanitario “La Rosa”.

- Considerar la posibilidad de irrigar la superficie del relleno sanitario (principalmente en el período seco) con los propios lixiviados generados, posibilitando la recirculación de estos en el relleno sanitario. Esta acción bajo condiciones favorables puede posibilitar la evaporación de hasta un 30 % de las cantidades recirculadas. Por otra parte, la recirculación de los lixiviados acelera la descomposición de los residuos, al suponer un aporte tanto de humedad como de microorganismos, reduciéndose en el tiempo, los riesgos ambientales potenciales de las emisiones de gases y líquidos que estas producen. También se puede lograr una mejora en la calidad de los lixiviados y asegurar un tratamiento óptimo de los mismos.
- Realizar con cierta sistematicidad, pruebas de permeabilidad que permitan evaluar la eficiencia con que están operando los pozos de infiltración.
- Efectuar el mantenimiento de los pozos de infiltración, según las recomendaciones de Olof Anderson et al. 1997 , (Anexo 9), es decir, cuando el gasto específico de estos pozos (22.0 L/s·m) descienda un 25 % (a 16.5 L/s·m), o lo que es lo mismo, su eficiencia disminuya a un 75 %.
- Realizar el mantenimiento los pozos de infiltración a través de la combinación de los métodos de rehabilitación siguientes:
 - a) Método químico.
 - b) Método de inyección de agua a velocidad.
 - c) Método de bombeo inverso.
- Mantener en condiciones óptimas, el sistema de drenaje externo del relleno sanitario, para evitar el escurrimiento al interior de este, de aguas que aumenten sensiblemente el volumen de lixiviados que en él se genera.
- Realizar estudios detallados que permitan evaluar la posibilidad de usar los lixiviados generados, en la producción de compostas (concentrado de materia orgánica obtenido de los desechos o de los resultantes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que tratadas sirven como fertilizante o abono orgánico), de modo que los mismos sean tomados como parte de soluciones integrales para minimizar su volumen y capacidad de contaminación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ando, J., M. Kozak, Y. Ríos. 1989: "Caracterización general de la asociación ofiolítica de la zona Holguín-Moa y el papel de las ofiolitas en el desarrollo estructural de Cuba". Rev. Minería y Geología 7 (1): 35-44.
- Ansoleaga, I., 1992: "Balance de agua en un vertedero controlado". Edit. ETSLL, Bilbao, 13 pág.
- Bailey, G. M. 1968. "Role of soils and sediment in the water pollution control". F.W.R.C.A. Southeast Water Laboratory.
- Custodio, E.; Llamas, M. R. 1983. "Hidrología subterránea. Tomo I". Es. Omega. Barcelona, 1154 pág.
- De Miguel, F. C., 1999: "Hidrogeología Aplicada". Edit. Félix Valera, La Habana, 451 pág.
- Departamento Administrativo de planeación de Antioquia, 1988: "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales". Edit. Imprenta Departamental. Medellín, Colombia, 123 pág.
- Díaz, C. y M. Iturralde-Vinent. 1981: "Estratigrafía, paleontología y paleogeografía del banco carbonatado Cretácico de Sierra de Cubitas". Resúmenes Primera Jornada Científica de la Sociedad Cubana de Geología, p. 51-52.
- Fernández, M., 1999: "Gestión de los lixiviados". Secretaría Ambiental de República Dominicana. <http://www.utp.ac.pa/universal/79.htm> (5/04/2005).
- Furruzola, G.; Nuñez Cambra, K., 1997: "Estudios sobre la Geología de Cuba". Edit. IGP, Ciudad de la Habana, 527 pág.
- Gómez-Martín, M. A.; Antigüedad Auzmendi, I., 1997: "Hidrogeología de los vertederos de residuos sólidos urbanos". En: Comité Nacional Cubano para el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO: Curso Avanzado sobre

Contaminación de las Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación. Volumen 2, Pinar del Río, Cuba, 4.57.

- González, A., 1997: "Ejemplo de EIA de la contaminación de aguas subterráneas en el acuífero litoral del occidente de Huelva (España). En: Comité Nacional Cubano para el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO: Curso Avanzado sobre Contaminación de las Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación. Volumen 2, Pinar del Río, Cuba, 4.57.
- Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 1985: "Mapa de la Republica de Cuba", Escala 1:100 000. Edit I.C.G.C., Ciudad de la Habana.
- Instituto de Geología y Paleontología, 1997?: "Léxico Estratigráfico de Cuba". Edit IGP, Ciudad de la Habana, 209 pág.
- Instituto de Geología y Paleontología, Centro de Investigaciones Geológicas, 1985: "Mapa Tectónico de Cuba", Escala 1: 500 000, CIG, Ciudad de la Habana.
- Instituto de Geología y Paleontología, Academia de Ciencias de Cuba, 2000?: "Mapa Geológico de Cuba", Escala 1: 100 000, IGP, Ciudad de la Habana.
- Iturralde-Vinent, M., 1996:"Estratigrafía del arco volcánico en Cuba". En: Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba, Projeet 364. Inter. Geol. Correl. Prog., Spec. Cont. (1): 179-189.
- Iturralde-Vinent, M., 1996:"Introduction to Cuban Geology and Geophysics". En: Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba, Projeet 364. Inter. Geol. Correl. Prog., Spec. Cont. (1): 83-120.
- Iturralde-Vinent, M. (Editor), 1996:"Ofiolitas y Arcos Volcánicos de Cuba".Contribución Especial No. 1, I.G.P.C. Project 364, Miami, USA, 265 pág.
- Jaramillo, J., 1991: "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales". Edit. Organización Panamericana de la Salud, Washington, D. C., 214 pág.

- Knox, K., 1991: "Water balance methods and their application to landfill in the UK". Edit. Department of the Environment. Wastes Technical Division, London, 112 pág.
- López, A., 2002: "Tratamiento de los Lixiviados en el Relleno Sanitario La Bonanza". Municipalidad de Bonanza. http://www.cotecnica.com/ambiente_final_lixiviados.html , (10/03/2005).
- López, J., 1981: "Informe preliminar sobre factibilidad hidrogeológica del área propuesta para el criadero de cocodrilos". C.I.P.H. de Ciego de Ávila. Ciego de Ávila, (Informe interno), 22 pág.
- Martínez, E., diciembre de 1995: "Estudio Geofísico para el Abasto a Cayo Coco, Zona Santa Barbara, Ciego de Avila". Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos de Villa Clara, Santa Clara, 65 pág.
- Nieto, M. et al. 1987. "Sistemas de tratamiento de residuos sólidos urbanos: elección, ubicación y control ambiental". III Reunión Nac. Geol. Amb. y Ord. Territ. Valencia.
- Oficina Nacional de Normalización, 1985: "Higiene comunal. Agua potable. Requisitos sanitarios y muestreo (NC 93-02)". Edit NC, Ciudad de la Habana, 10 pág.
- Oficina Nacional de Normalización, 1999: "Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones (NC 27/99)". Edit NC, Ciudad de la Habana, 17 pág.
- Pérez Monteagudo, O., 1981: "Recomendaciones sobre el cálculo del módulo de drenaje". Rev. Voluntad Hidráulica, Cuba, Vol 3: 12-15
- PROTECNICA. 1989. "Estudio de impacto ambiental de un vertedero controlado residuos sólidos urbano, termino municipal de Lepe (Huelva)". Proy. y Est. Inf. Int. Para ITUSA. Huelva.

- 2001: “Relleno sanitario Santa Marta. Condiciones ambientales exigidas al proyecto”. Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente, <http://www.conoma.cl/rm/568/article-1981.html> , (10/03/2005).
- 2003: “Sistema de Tratamiento de los Residuos Sólidos del Municipio de Teherán”. O.W.R.C. <http://habitat.aq.upm.es/dubai/02/bp483.html> (5/04/2005).
- Thornthwaite, C. & Mather, J. 1957. “Instructions and tables for computing potential evopotranspiration and the water valance”. Drexel Institute of Technology, Publications in Climatology, New Jersey, vol. X, no. 3: 185-311.
- Valdivia, L. J., abril de 1991: “Informe Hidrogeológico sobre el Abasto a Cayo Coco, Zona Patria 2^{da} Etapa”, C.I.P.H., Ciego de Avila, 50 pág.
- Valero F, L., octubre del 2003: “Estudio Hidrogeológico Vertedero Morón”. E.I.P.H de Ciego de Avila, Ciego de Avila, 15 pág.