



**PROPOSICIÓN DE ALTERNATIVAS PARA CAMBIO DE SISTEMA DE “BAÑOS SECOS” EN PROYECTO MINERO MONA MINAS S.A.**

Andrea Valentina Pinilla Montero

Trabajo de investigación para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesor

Yesica María Gómez Jaramillo, estudiante maestría en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Medellín

2022

---

Cita	(Pinilla, 2022)
<b>Referencia</b>	Pinilla Montero, A. (2022). <i>PROPOSICIÓN DE ALTERNATIVAS PARA CAMBIO DE SISTEMA DE “BAÑOS SECOS” EN PROYECTO MINERO MONA MINAS SA</i> . [Ingeniería Ambiental]. Universidad de Antioquia, Medellín UdeA.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



Departamento Gestión Ambiental Mona Minas S.A, Asesora interna de prácticas: Yesica María Gómez Jaramillo



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Tabla de contenido**

Resumen	5
Abstract	6
Introducción	7
1. Objetivos	9
1.1 Objetivo general	9
1.2 Objetivos específicos	9
2. Marco teórico	10
3. Metodología	15
4. Resultados y análisis	16
6. Conclusiones y recomendaciones	34
Bibliografía	36
Anexos	37

---

### **Lista de figuras**

Figura 1 - Sanitario Seco.....	11
Figura 2. Estructura Sanitario Seco.....	16
Figura 3. Esquema nuevo diseño tanques de almacenamiento .....	32

### **Lista de tablas**

Tabla 1 - Contenido nutritivo de las excretas humanas .....	13
Tabla 2. Especificaciones Sanitario Seco.....	16
Tabla 3. Características tanques de almacenamiento de sólidos.....	17
Tabla 3. Mantenimiento baños secos, semestre 2022-1 .....	20
Tabla 4. Estimación dispositivos necesarios para cubrir demanda de empleados .....	22
Tabla 5. Contrataciones por semestre .....	23
Tabla 6. Propiedades de diferentes materiales de secado.....	23

## **Resumen**

Los sanitarios secos se consideran una solución que permite el acceso a programas de saneamiento en regiones usualmente alejadas de zonas urbanas, con el objetivo de ahorrar el recurso hídrico mediante un uso racional de este, y disminuir la contaminación del agua y suelo. En el presente trabajo se presentan cinco diferentes alternativas con el objetivo de mejorar y optimizar el sistema de baños secos utilizado actualmente en el proyecto minero Mona Minas, ubicado en el municipio de Segovia (Antioquia). Dichas alternativas fueron concertadas a partir del diagnóstico del sistema existente de los sanitarios secos dispuestos en el área del proyecto e investigación en bases de datos, tales como SciELO y Google Académico. Las soluciones presentadas tienen relevancia en el proceso interno de manejo de los residuos sólidos orgánicos, puesto que es el elemento más susceptible para generar impactos en el medio. Además, se busca encontrar nuevos métodos de manejo y disposición, con un enfoque concordante con los requerimientos ambientales planteados por la autoridad y con las necesidades y particularidades del proyecto.

*Palabras clave:* Sanitario, seco, compostaje, residuos.

### **Abstract**

Dry toilets are considered a solution that allows access to sanitation programs in regions usually far from urban areas, with the aim of saving water resources through its rational use and reducing water and soil contamination. In this paper, five different alternatives are presented with the aim of improving the dry toilet system currently used in the Mona Minas mining project, located in the municipality of Segovia (Antioquia). These alternatives were arranged through the diagnosis of the existing system of dry toilets arranged in the project area, likewise, based on research in databases, such as SciELO and Google Scholar. The solutions presented are relevant for the internal process of organic solid waste management, since it is the most susceptible element to generate impacts in the environment. In addition, it seeks to find new management and disposal methods, with an approach consistent with the environmental requirements established by the authority and with the needs and particularities of the project.

*Keywords:* toilets, dry, composting, waste

### **Introducción**

MONA MINAS S.A. es un proyecto minero, cuyo propósito es la explotación económica de una mina de oro en veta. Está localizado en la vereda El Aporreado, en el municipio de Segovia - Antioquia, contando con un área de tres (3) hectáreas y ochocientos setenta y cinco (875) metros cuadrados. Según reportes entregados por MONA MINAS SA, la empresa cuenta con 203 empleados para la ejecución de labores mineras en el proyecto actualmente (mayo 2022).

En el otorgamiento de la licencia ambiental para la operación del proyecto minero, no se contempló el permiso de vertimiento para el agua residual doméstica, considerando que no se tiene campamento, por ende, se utilizarían baños portátiles. Como cumplimiento de responsabilidades generadas en los planes de manejo ambiental presentados ante la autoridad ambiental correspondiente, la empresa modificó los baños portátiles por baños secos con descarga de agua residual al suelo, los cuales se caracterizan porque no usan agua ni electricidad y no requieren instalación de tuberías, y su principal objetivo es reducir el impacto de contaminación de fuentes hídricas.

Simultáneamente, se considera utilizar la materia orgánica resultante del uso de estos dispositivos para la elaboración de fertilizantes y abono, mediante la recolección y el procesamiento del contenido de los baños secos, puesto que este es una fuente sostenible y económica que contiene nutrientes esenciales para las plantas, como fósforo (P), nitrógeno (N) o potasio (K). La orina y las heces humanas aportan entre el 70 y el 80 % del N y hasta el 60 % del P en las aguas residuales municipales urbanas (Krause, Häfner, Augustin, & M.Udert, 2021).

El sistema anterior viene presentando inconvenientes debido a la gran cantidad de personas laborando en la empresa, por consiguiente, se está haciendo necesario tener una persona encargada

para el proceso de remoción diaria de la materia orgánica sólida dispuesta después del secado, para ser transportada a la zona adecuada para el compostaje y luego ser utilizado como abono, lo que ha generado inconformidades con los trabajadores. Adicionalmente, debido a la cantidad de materia orgánica dispuesta diariamente en la zona de compostaje, se están generando malos olores, lo que puede conllevar a generar un plan de manejo para estos.

Por tales razones, es necesario implementar un cambio al sistema actual de “baños secos”, permitiendo solucionar las problemáticas anteriormente mencionadas y conservar los beneficios como la mitigación de contaminación y ahorro de uso del recurso hídrico. En consecuencia, esta propuesta tiene como objetivo encontrar alternativas viables para reemplazar el diseño del sistema actual empleado en los baños secos. Por ende, se considera necesario realizar un diagnóstico del diseño actual empleado en los baños secos dispuestos en el proyecto minero, después de esto buscar información en diferentes bases de datos para la investigación de alternativas en el diseño y tratamiento de estos dispositivos, logrando de esta manera determinar las especificaciones técnicas y materiales necesarios para obtener un sistema de diseño que soporte la capacidad del personal del proyecto y no genere problemas como malos olores o necesidad de remoción diaria de los residuos sólidos generados.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Proponer alternativas factibles para el mejoramiento o reemplazo del diseño del sistema actual de los baños secos del proyecto minero MONA MINAS S.A.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Diagnosticar el sistema actual de los baños secos utilizados en el proyecto minero, reconociendo su funcionamiento, capacidad, impactos y posibles falencias.
- Revisar información sobre baños secos ecológicos con el propósito de preseleccionar diferentes alternativas.
- Determinar las especificaciones técnicas necesarias para el mejoramiento del diseño actual de los sanitarios secos.

## 2. Marco teórico

Como su nombre lo indica, los **baños secos** son sanitarios que no usan agua en su sistema, y adicionalmente no necesitan tuberías, las **aguas residuales** que se generan es debido al lavado de manos y orín. El vaciado sin agua se logra mediante una cámara giratoria accionada con una palanca que solo requiere material granular y de la gravedad. Estos están conformados por un inodoro con tapa, tanque de almacenamiento y depósito biodegradable de 227 litros aproximadamente, además de un sistema de recirculación y rejillas de ventilación, y generalmente tienen las siguientes dimensiones 2,20 m (alto), 1,20 m (ancho) y un peso de 90 Kg (Leho, 2020). Los sanitarios secos se consideran una solución que permite el acceso a programas de saneamiento en regiones usualmente alejadas de zonas urbanas, con el objetivo de ahorrar el recurso hídrico mediante un uso racional de este, producir alimentos, disminuir la contaminación del agua y suelo, evitando de esta manera consecuencias negativas sobre la salud de los trabajadores y la comunidad aledaña del proyecto minero que pueden traer consigo el uso de sanitarios convencionales o la disposición descuidada de los residuos humanos (Colmenares & Jiménez, 2012).

Los sanitarios secos presentan las siguientes ventajas (Ver Figura 1):

- Mitigación de contaminación del suelo y del agua por descargas a fuentes hídricas.
- Separa los líquidos (orina y agua de lavado de manos) de sólidos (heces), facilitando el procesamiento y neutralización del riesgo biológico.
- Permite aprovechar los líquidos para riego de pastos y sólidos para compost.
- Ahorro en costo de transporte y disposición de agua residual.

*Figura 1 - Sanitario Seco.*



Fuente: Leho SAS, 2020

Los **residuos generados** (orina, agua residual del lavado de manos y heces) con un manejo adecuado pueden transformarse en abono orgánico y fertilizantes. Mediante un proceso de **compostaje**, donde se crean las condiciones necesarias para que los organismos descomponedores fabriquen abono, las excretas pueden aportar nitrógeno, fósforo, magnesio y potasio al suelo, ayudando a regular el metabolismo de las plantas (Krounbi, y otros, 2020). De igual manera, los nutrientes contenidos en la orina, como nitrógeno y fósforo, producen efectos similares a los fertilizantes químicos, según Colmenares y Jiménez (2012):

La diferencia de que su producción demanda menos energía, lo que los hace más económicos, además de que se trata de un proceso natural que no contamina ni afecta la salud humana; adicionalmente, mientras la orina no entre en contacto con las heces, se mantendrá libre de microbios y patógenos y es una solución pura con niveles bajos de metales pesados, por lo que su uso como nutriente constituye el cierre de un ciclo biológico natural (p. 25).

La transformación de los residuos sólidos en los tanques de almacenamiento de los sanitarios secos se puede lograr por medio de la deshidratación del residuo, generando el medio necesario para esto a través de la evaporación por la adición de **material granular**, como la arena o la cal, que se recomienda mezclar semanalmente el tanque de secado con material granular adicional, puesto que se encargan de secar la superficie de la materia orgánica sólida, evitando los malos olores y la proliferación de insectos. El tiempo de degradación de los sólidos es de 6 meses, tiempo en el que permanecen los sólidos en el tanque. Por lo tanto, luego de la degradación se pueden utilizar el material resultante, rico en nutrientes, carbón y materia fibrosa, que servirá para el mantenimiento de zonas verdes y reforestaciones en el proyecto minero.

Se debe prestar especial atención en garantizar que este material resultante sea epidemiológica y ambientalmente inofensivo y que su calidad sea adecuada en términos de baja contaminación y disponibilidad de nutrientes, debido a que, según Krause & al (2021):

El riesgo de patógenos transmisibles se encuentra dentro de los excrementos humanos, particularmente las heces; los materiales vegetales agregados durante el compostaje son de particular relevancia fitosanitaria; los residuos farmacéuticos en los excrementos y los aditivos químicos son fuentes potenciales de contaminantes; los contaminantes no biodegradables pueden causar contaminación y lesiones; y los riesgos hortícolas implican principalmente el potencial de emisión de amoníaco y, en algunos casos, los efectos de la salinidad de la orina. Estos riesgos se pueden reducir significativamente (i) educando a los usuarios sobre el funcionamiento adecuado de los baños secos y las consecuencias de agregar desechos inadecuados, (ii) facilitando el uso adecuado con contenedores de basura generales e instrucciones claras y, lo que es más importante, (iii) usando procesos modernos

de desinfección y limpieza y pruebas de sustancias nocivas bajo la guía de las leyes y regulaciones locales, asegurando fertilizantes seguros y de alta calidad (p. 1107).

*Tabla 1 - Contenido nutritivo de las excretas humanas*

<b>Excreta</b>	<b>Nitrógeno</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Potasio</b>
Orina	5 kg/l	0,4 kg/l	0,9 kg/l
Heces fecales	0,1 kg/l	0,2 kg/l	0,2 kg/l

Fuente: Colmenares, A & Jiménez, E. 2012

Según AIB International (2010), el baño seco debe satisfacer mediante su diseño las siguientes características:

- **Móvil:** Debe poder trasladarse fácilmente, implicando que no se ancle de manera permanente al terreno donde se instale. Adicionalmente, debe ser liviano y ocupar el menor volumen posible, para tener un traslado sencillo y rápido.
- **Adaptable a diferentes condiciones climáticas:** El diseño debe incluir materiales que permitan emplear el dispositivo en diferentes climas (frío o caliente), así como en temporadas de lluvias y sequías. Por lo tanto, se implica el uso de material impermeable en la fabricación de sus partes externas, pero evitando el aumento de la temperatura interna al instalarse en áreas de altas temperaturas.
- **Fácil mantenimiento:** La descarga de los desechos debe ser una tarea fácil de realizar, sin necesidad de utilizar herramientas o conocimientos especializados, garantizando al mismo tiempo condiciones de higiene y seguridad biológica.
- **Buena ventilación:** El diseño del sistema debe permitir la fácil evacuación de malos olores, por lo que se debe asegurar la circulación del aire.

- Económico: Los cobros de fabricación y mantenimiento deben ser con la menor inversión posible, pero garantizando resultados óptimos.
- Resistente al peso: Su diseño y material deben resistir el peso normal de cualquier persona adulta.

### **3. Metodología**

- 1.** Para el diagnóstico del diseño actual empleado en los baños secos dispuestos en el proyecto minero de interés, se procedió a estudiar los materiales y funcionamiento del equipo utilizado la capacidad de uso esperada en comparación con la capacidad obtenida en los meses de funcionamiento, se identificaron los impactos en el medio por su utilización, sus procesos de mantenimiento, transporte y costos. Para lograr este diagnóstico se utilizó información brindada por parte de la empresa Leho SAS y obtenida en visitas de campo o reportes entregados por los trabajadores del proyecto.
- 2.** Para la búsqueda de información se investigó en diferentes bases de datos de publicaciones científicas de diferentes países, utilizando buscadores académicos como SciELO y Google Académico y páginas web de empresas dedicadas al diseño y/o construcción de estos dispositivos, con el propósito de encontrar diferentes alternativas en el diseño y tratamiento de los baños secos, asimismo, las modificaciones más recientes que se le han realizado a estos y los resultados obtenidos en su funcionamiento.
- 3.** A partir de la investigación previa, se determinaron las especificaciones técnicas y materiales necesarios para lograr obtener un sistema de diseño que soporte la capacidad del personal del proyecto y no genere problemas como malos olores o necesidad de remoción diaria de los residuos sólidos generados. Se deben mantener los beneficios principales, tales como, la mitigación de contaminación del suelo y del agua, aprovechamiento de nutrientes para abono y compost, ahorro en costos y transporte. Después de esto, se pretendió ilustrar las nuevas especificaciones en el diseño de los baños secos por medio de las herramientas proporcionadas por el software de dibujo AutoCAD.

#### 4. Resultados y análisis

##### 1. Diagnóstico diseño actual:

Como se mencionó anteriormente, el proyecto minero Mona Minas S.A. dispone dentro de sus instalaciones dos baños o inodoros secos, apostados con el objetivo de reducir el consumo del recurso hídrico y la generación de vertimientos líquidos contaminantes asociados con aguas negras.

El sanitario seco utilizado en el proyecto minero cuenta con las siguientes características (Ver Figura 2 y Tabla 2) según Leho SAS (2020):

**Componentes:** Asiento en fibra de vidrio, mecanismo interno de separación en acero inoxidable, contenedor de sólidos (35 usos), contenedor de material de cobertura (tierra para 40 usos), dispensador mecánico de material de cobertura.

**Complementos:** Plataforma de base para instalación en superficies irregulares, filtro mineral para orina (uno para cada dos sanitarios) y cernidor de material (uno para cada dos sanitarios).

*Figura 2. Estructura Sanitario Seco*



*Tabla 2. Especificaciones Sanitario Seco*

Dimensiones	Uso
Alto 100 cms	Estimado 12 años en interiores
Ancho 40 cms	
Profundidad 65 cms	
Peso 30 kgs	

Fuente: Leho S.A.S., 2020

Se considera que este dispositivo puede disminuir a cero los litros de agua contaminados, de los casi 22.000 litros anuales que una sola persona produce usando un sanitario tradicional. Además, al separar en su sistema el material orgánico sólido del líquido, se facilita la neutralización del riesgo biológico, reduciendo la contaminación de las aguas y los suelos, y así mismo, facilita la conversión de estos residuos en bioinsumos, permitiendo recuperar el ciclo natural de minerales (Leho, 2020).

Sumado a esto, se tienen instalados 6 tanques de almacenamiento de sólidos de 250 litros cada uno, para un total de 1500 litros de almacenamiento, estos tienen una capacidad de almacenamiento total de 50 meses junto con el material granular. Se establecieron 12 meses, como el tiempo de almacenamiento de la mezcla de las heces fecales con el material granular en los tanques destinados para tal fin, lapso durante el cual se espera que la materia orgánica continúe su proceso de degradación anaerobia y pueda ser utilizada como insumo para la compostera, cuyo producto servirá para el mantenimiento de zonas verdes y reforestaciones. Por tanto, se utilizará el contenido solamente del tanque que ya haya cumplido dicho tiempo. Las características de los tanques de almacenamiento se presentan en la Tabla 3.

*Tabla 3. Características tanques de almacenamiento de sólidos*

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Aporte per cápita	g/hab.día	270
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,2
	g/l	1200

Aporte per cápita	l/hab.día	0,23
Trabajadores	#	203
Aporte diario	%	2,5
	l/día	1
Diámetro del tanque	m	1,07
Alto del tanque	m	0,55
Volumen del tanque de almacenamiento	l	250
Tiempo total de almacenamiento en 1 tanque	Día	250
	Mes	8,3

Fuente: Mona Minas S.A, 2022

Sin embargo, se registran inconvenientes relacionados tanto con el uso de estos como con los procesos de remoción y disposición final de los residuos para compostaje captados por el sistema sanitario. A continuación, se presenta una lista que expone el carácter de las dificultades encontradas, estableciendo una relación entre este y la causa o causas de las mismas:

- **Capacidad de almacenamiento en baño insuficiente:** Se recomienda que los residuos sólidos captados por cada equipo sanitario permanezcan dentro del tanque de este un tiempo aproximado de 45 días, lapso durante el cual se desarrollan las reacciones químicas que transforman la materia orgánica para el posterior proceso de compostaje. No obstante, en el proyecto en cuestión, el proceso de remoción de los excrementos recolectados se realiza en promedio cada 27 días (Ver Anexo 1), por lo que el material no alcanza a

---

procesarse de manera completa para cumplir con los requerimientos del método compostable.

Lo anterior se debe a que, de los 203 trabajadores de la obra, aproximadamente 100 hacen uso de los dos dispositivos disponibles (personal de la mina y campamento), cuya capacidad de almacenamiento es insuficiente para captar durante el tiempo establecido las deposiciones de dicha cantidad de personal. Además, se ha evidenciado que no todos los colaboradores presentes hacen uso de los mismos, pues comentan que sienten incomodidad en el uso de estos. Por consiguiente, también se considera importante implementar jornadas de educación para promover el uso correcto de los baños secos en el proyecto.

- **Disminución de la productividad de los trabajadores del proyecto:** Tanto la remoción y traslado a la zona de compostaje del material orgánico como el mantenimiento de los baños secos, son actividades cuya responsabilidad recae sobre el personal de obra de la mina. Por tanto, y debido a la falta de capacidad de almacenamiento, ambos procedimientos deben realizarse con una periodicidad mayor a la recomendada, afectando así el tiempo que cada trabajador dedica a sus actividades principales, que tienen que dejar a un lado cuando es necesario encargarse del sistema sanitario.
- **Tiempo extenso de recorrido de los trabajadores de la mina hasta los baños secos:** Ambos elementos del sistema sanitario se encuentran ubicados fuera de la mina, a una distancia aproximada de 250 – 300 m de la bocamina, por lo que, para hacer uso de estos, el personal debe salir del interior del yacimiento.

➤ **Procedimiento de producción de compost no definido y tratamiento nulo final de los residuos orgánicos**

En el primer semestre del año actual, se realizó periódicamente el mantenimiento preventivo a los sanitarios secos instalados en el proyecto minero, donde se evidenció la necesidad de la lubricación de elementos móviles del dispositivo tales como, los resortes de mecanismo de dispersión interna y resorte de accionador de arena. Así mismo, se constató la realización de actividades de retiro de residuos sólidos y líquidos de los contenedores en un promedio de cada 27 días (Ver Anexo 1).

*Tabla 4. Mantenimiento baños secos, semestre 2022-1*

Número de revisiones	Número de mantenimientos	% Mínimo de llenado del tanque	% Máximo de llenado del tanque
31	30	19	100

Fuente: Mona Minas S.A, 2022

Por otro lado, y con el fin de cumplir los requerimientos ambientales y sanitarios exigidos por la autoridad, se determinan los aspectos ambientales susceptibles tanto de generar como de recibir impactos, además del establecimiento de posibles medidas para evitar, manejar, corregir y compensar los posibles efectos.

Como primer aspecto identificado se registra la posible generación de **olores ofensivos**, ya sea en los baños secos o en alguno de los seis tanques de almacenamiento de materia orgánica sólida. Estos olores pueden ocasionarse si se presenta un manejo incorrecto de los residuos, relacionado principalmente con la falta o el mal uso del agente granular o lecho orgánico. En los baños secos instalados en el proyecto el lecho usado para neutralizar los malos olores y equilibrar el proceso de compostaje, es la arena, cuyas propiedades granulométricas evitan la agregación del material fecal y la acumulación de humedad.

Además, es fundamental considerar que el proceso de compostaje que se da en los tanques de almacenamiento es un proceso de digestión anaerobia, es decir, que se da en ausencia de oxígeno y en el que los microorganismos presentes se encargan de degradar los compuestos orgánicos complejos que se encuentran en los residuos. Este tipo de biodigestión ralentiza el proceso general del compostaje, pues no cuenta con el O<sub>2</sub> como catalizador de las reacciones químicas, por lo que la putrefacción de la materia orgánica se da de forma más lenta dando lugar a una posible generación de olores ofensivos. Por lo tanto, es de vital importancia realizar un correcto estudio de los posibles agentes secos que se pueden aplicar, teniendo en cuenta condiciones medioambientales de temperatura y humedad, además del pH promedio del material fecal a procesar.

Otro riesgo ambiental por considerar es la **acumulación de gases tóxicos** expedidos por las heces captadas, entre los que se registran principalmente el metano (CH<sub>4</sub>) y algunos óxidos nitrosos. Estos gases pueden tener afectaciones sobre la salud de las personas a las que se exponen y son contaminantes atmosféricos categorizados como Gases de Efecto Invernadero. Por ende, antes de la remoción y traslado de los residuos captados en los sanitarios, es necesario abrir los registros que permitan la salida de los gases con el fin de reducir el riesgo de exposición del personal a estos.

Finalmente, se debe llevar a cabo un monitoreo constante del estado de los seis tanques de almacenamiento, con el objetivo de garantizar que no hayan rotos o fisuras en estos por los que se puedan presentar **fugas de los lixiviados derivados del compost**. A manera de contexto, los lixiviados son líquidos que se producen como resultado de la descomposición de la materia orgánica y que poseen diversas composiciones químicas dependiendo del material parental. En el

caso de que estos residuos se infiltren al suelo, pueden contaminarlo y llegar incluso hasta yacimientos de aguas subterráneas, degradando su calidad.

## 2. Principales aspectos de mejora encontrados en investigación bases de datos:

La cámara de almacenamiento debe tener la capacidad para contener el material orgánico generado durante como máximo 45 días por un grupo compuesto de 4 a 6 personas, reduciendo de esta manera los costos de manipulación, tiempos de recogida y traslados. Debe tenerse en cuenta que una persona produce un promedio de 27 litros de excretas mensuales (Krause, Häfner, Augustin, & M.Udert, 2021).

Teniendo en consideración la información anterior, para suplir con la demanda de los 100 usuarios de los dispositivos, se debería contar con un mínimo de **12 equipos**, puesto que, la capacidad de cada uno de estos de almacenamiento es de 227 litros, y con el supuesto de que cada persona produce un promedio de 27 litros de excretas mensuales.

*Tabla 5. Estimación dispositivos necesarios para cubrir demanda de empleados*

Empleados	Excretas mensuales (L)	Dispositivos necesarios	Tiempo límite de días para remoción de residuos sólidos (Por dispositivo)
100	2700	12	45

En la **Tabla 6**, se presenta el número de personas contratadas para labores mineras por semestre entre el año 2020 y 2022, obteniendo de esta manera un promedio de 62 personas contratadas semestralmente. Esta información se debe tener en cuenta para la estimación de la capacidad que debe tener cada dispositivo instalado, para cumplir con los objetivos de su utilización durante el período de vida útil, estimado en 12 años según la empresa fabricante Leho S.A.S.

*Tabla 6. Contrataciones por semestre*

<b>Empleados por semestre</b>				
<b>2020-I</b>	<b>2020-II</b>	<b>2021-I</b>	<b>2021-II</b>	<b>2022-I</b>
44	44	44	79	100

*Fuente: Mona Minas, 2022*

En cuanto a materiales de secado, se ha evidenciado que las excretas necesitan mezclarse con otros elementos que alimenten a los microorganismos para que estos las transformen, por lo que es necesario, cubrir con material de secado los residuos cada vez que se haga uso del sanitario. También, se hace con el objetivo de obtener una mezcla rica en carbono que ayude a evitar la expansión de malos olores. Se ha encontrado que los materiales más ricos en carbono son el aserrín y cal, aportando de esta manera en la mejora del proceso de descomposición. El aserrín se caracteriza por ser un elemento de fácil acceso, tiene gran capacidad de absorción, es rico en carbono y ayuda a balancear la acidez. Así mismo, la cal es un alcalinizante puro que al agregar a la tierra contribuye a bajar el nivel de acidez y balancear el pH, adicionalmente, tiene la capacidad de contener malos olores (Castillo, 2002).

*Tabla 7. Propiedades de diferentes materiales de secado*

<b>Material</b>	<b>% Nitrógeno</b>	<b>Proporción C/N</b>	<b>Material</b>	<b>% Nitrógeno</b>	<b>Proporción C/N</b>
Algas	1,9	19	Madera dura	0,09	560
<b>Aserrín</b>	0,11	511	Madera suave	0,09	641

<b>Aserrín putrefacto</b>	0,25	200-500	<b>Paja</b>	0,7	80
Cartón	0,3	121	Pasto	2,4	12-19
Cáscara de arroz	1,05	48	Productos vegetales	2,7	19
<b>Corteza suave</b>	0,14	496			
Frutas	1,4	40			

Fuente: Castillo, 2002

En la Tabla 7, se listan algunas de las opciones para agregar en el sistema del baño seco, la mayoría son materiales orgánicos, se debe tener en cuenta los tiempos de descomposición de estos y las condiciones necesarias para lograrlo, por ejemplo, las variaciones de temperaturas. Un buen balance C/N (Unidad de Nitrógeno por cada unidad de Carbono) contribuye a la disminución de la acidez.

El aserrín, aserrín putrefacto, corteza suave y paja se consideran como materiales óptimos para cubrir las excretas por sus propiedades de descomposición, se piensa utilizar una mezcla de estos en reemplazo de la arena.

Siguiendo con los materiales de construcción, es relevante el empleo de materiales livianos y de resistencia intermedia, puesto que no se necesita que soporte fuerzas extremas. El dispositivo debe mantener su forma bajo condiciones normales del entorno y uso, facilidad de limpieza y

movilidad. Por consiguiente, se continúa optando por la fibra de vidrio como una buena opción para la fabricación del sanitario, esta se caracteriza por tener altos niveles de resistencia mecánica, resistencia al ataque de productos químicos disolventes, a la radiación solar, al ataque de microorganismos y es inoxidable. También, presenta un espesor menor a materiales convencionales, por ejemplo, la cerámica. Así mismo, el proceso de fabricación de la fibra de vidrio es menos complejo que el de la cerámica, permitiendo de esta manera ahorrar en costos de fabricación (Colmenares & Jiménez, 2012).

En la revisión bibliográfica, se encontraron tres modelos usuales de baños secos: deshidratación, compostero e incineración. A continuación, se brinda una breve explicación de los sistemas adecuados para el proyecto minero, según (Villa, 2016):

- Sistema sanitario basado en deshidratación: Este sistema funciona por deshidratación, es decir, todo el contenido que cae en la cámara de tratamiento se deshidrata para obtener un material resultante libre de patógenos, olores y listo para su reutilización. Este modelo de sanitario separa desde el origen la orina y las heces para agilizar el proceso de deshidratación además que la orina cuenta con la mayor parte de nutrientes y generalmente está libre de patógenos, así que evitando su contacto con las heces puede utilizarse directamente como fertilizante. El proceso de deshidratación se logra con calor, ventilación y la adición de un material secante, y al reducir la humedad del contenido a menos del 35% lo más pronto posible se acelera la eliminación de patógenos.
- Sistemas sanitarios basados en la descomposición (Composta): La composta es un proceso biológico sujeto a condiciones controladas en el que las bacterias, gusanos y

otro tipo de organismos descomponen las sustancias orgánicas para producir humus; un medio rico y estable donde las raíces se consolidan fácilmente. En un sanitario compostero se deposita la excreta humana y otros materiales orgánicos (restos de verduras, paja, turba, aserrín y cascaras de coco) en una cámara de tratamientos donde los microorganismos del suelo se encargan de descomponer los sólidos, como sucede finalmente en un ambiente natural con todos los materiales orgánicos. Para lograr condiciones óptimas para la composta, se debe controlar la temperatura, la circulación de aire y otros factores. El humus que se produce en el proceso es un excelente acondicionador de suelos, libre de patógenos humanos, pero esto depende de lograr las condiciones adecuadas y que el material se almacene durante el tiempo necesario en el digestor. De producirse mal olor, puede extraerse por medio de sistema de ventilación que lo lleve hacia fuera y por encima del techo.

Se descarta el sistema de incineración puesto que los costos de los equipos utilizados para este sistema, su construcción y mantenimiento son un poco elevados ya que deben ser resistentes al fuego, además, si se utiliza de forma incorrecta puede ser peligroso y causar impactos negativos en el medio.

### **3. Determinación de alternativas para mejorar los procesos relacionados con el sistema sanitario:**

Ahora, tras la determinación de la metodología de compostaje de los residuos y de la periodicidad de la remoción del material y de los mantenimientos sobre los baños secos, se presentan varias alternativas para mejorar los procesos relacionados con el sistema sanitario, teniendo en cuenta las problemáticas identificadas y los aspectos ambientales relacionados:

#### ***Alternativa 1: Instalación de otro baño seco***

Como primera alternativa para dar respuesta a los requerimientos determinados, se presenta la posibilidad de la instalación de un equipo sanitario más, con el fin de aumentar la capacidad de almacenamiento en cada uno y, por tanto, reducir la periodicidad de la remoción y mantenimiento. Además, si este equipo extra se instala al interior de la mina, el tiempo que requiere el personal para hacer uso de este sistema se reduce de forma notoria, aumentando así la productividad.

Por otro lado, se posibilita de esta manera el almacenamiento de los residuos en el tanque de cada baño el tiempo requerido de 45 días, mejorando así el posterior proceso de compost que se lleva a cabo en los tanques de disposición final.

#### ***Alternativa 2: Mezcla de materiales secantes***

La siguiente propuesta planteada consiste en cambiar el material secante o lecho orgánico que se usa actualmente en los baños (arena), por una mezcla de aserrín, aserrín putrefacto, corteza suave y paja, elementos cuya relación Carbono – Nitrógeno es alta, posibilitando una reducción en la acidez de los residuos, es decir, incrementa el pH de la mezcla.

Este proceso químico favorece el manejo del material fecal pues, al controlar el PH, se mejora la degradación y posterior formación del compost al proveer un entorno de descomposición óptimo

para los microorganismos presentes durante todo el proceso. Lo anterior, beneficia la producción final de compost, pues al cambiar el material secante, es posible que la calidad de los residuos que son almacenados durante aproximadamente 30 días en el tanque de cada sanitario mejore, disminuyendo así la necesidad de que estos sean mantenidos allí durante 15 días más.

Además, este control del PH es fundamental teniendo en cuenta las condiciones de humedad y temperatura promedio de la zona de influencia del proyecto: la humedad relativa media anual es de 85%, máxima de 86% y mínima de 84% y la temperatura oscila entre 24,7°C y 25,3°C, con un promedio de 25,09°C. Bajo este escenario, las reacciones químicas de descomposición pueden verse ralentizadas, debido a que a mayor temperatura, mayor reactividad y, por tanto, mayor variación en el potencial de hidrógeno de la mezcla.

Finalmente, al adicionar aserrín, aserrín putrefacto, corteza suave y paja, se mejora la compactación de los residuos sólidos, aumentando su densidad y, por tanto, disminuyendo su volumen, permitiendo así un mayor almacenamiento dentro de los tanques de cada sanitario.

### ***Alternativa 3: producción de abono añadiendo suelo sano***

Actualmente, el proceso de compostaje de los residuos sólidos obtenidos de los baños secos se realiza, como se mencionó, en seis tanques de almacenamiento en los que la materia orgánica se deposita y guarda durante un período de 12 meses. Sin embargo, a este material no se le está realizando ningún otro procesamiento, además de la adición de lecho secante, para acelerar la producción de compost y/o mejorar su calidad. Por lo tanto, esta alternativa se enfoca en el tratamiento de los residuos en su lugar de disposición final, con el fin de que optimizar el proceso en materia de rendimiento y aptitud.

Para esto, se propone adicionar suelo sano a los seis tanques de almacenamiento después de cada nueva descarga de material, pues la capa de suelo contiene micro y macroorganismos capaces de transformar las heces en un abono altamente nutritivo y, sobre todo, inofensivo para la salud.

Este tratamiento funciona como catalizador de las reacciones químicas necesarias para la producción de compost, además de mejorar la calidad del mismo estabilizando el PH, controlando la humedad y añadiendo estructura al material. Ahora, teniendo en cuenta las propiedades catalizadoras del suelo sano, se determina que, aplicando este proceso, es posible obtener un abono apto para las actividades de reforestación que considera el proyecto en un período de seis meses, es decir, la mitad del tiempo que se tenía planeado, liberando de manera más constante la capacidad de los tanques.

Finalmente, vale la pena resaltar que esta propuesta se enfoca no solo en responder a la demanda de almacenamiento de los residuos, sino que busca darle continuidad y seguimiento al proceso de compostaje, que actualmente se limita a la descarga del material mezclado con lecho orgánico en cada uno de los tanques disponibles.

***Alternativa 4: producción de abono mediante estabilización ácido-láctica de las excretas***

Tal y como la propuesta anterior, esta alternativa tiene su enfoque en el tratamiento de los residuos sólidos orgánicos obtenidos de los baños secos, con el fin de acelerar el proceso de compostaje y mejorar su calidad final. Para equilibrar los componentes químicos, físicos y microbiológicos de las excretas humanas, previamente mezcladas con material secante, se comienza añadiendo agua destilada en una relación masa:volumen de 5:1 (cinco unidades de masa de heces por una unidad de volumen de agua destilada), buscando preparar el material para el posterior proceso de fermentación ácido-láctica (Mindreau, Juscamaita, & Williams, 2016).

Dicha fermentación comienza al adicionar un cultivo láctico, es decir, una colonia de bacterias productoras de lactato, ácido que favorece la descomposición del material orgánico y elimina microorganismos generadores de malos olores y enfermedades. Además, este compuesto genera una caída en el PH que actúa como catalizador de las reacciones químicas, acelerando la producción de compost a un periodo de seis meses.

***Alternativa 5: Diseño de tanques de almacenamiento del material sólido orgánico para mejorar el proceso de compostaje conectados con los baños secos mediante un tubo succionador***

Actualmente, los tanques de almacenamiento final del material fecal sólido tienen una capacidad de 250 L y su armazón es de material plástico. Sin embargo, dentro de los mismos no existe ningún tipo de división que permita clasificar las heces según la etapa de descomposición o compostaje en la que se encuentren. Lo anterior significa que, hoy día, se están mezclando sólidos en diferentes estados de fermentación, afectando así el proceso general de todo el residuo almacenado. Por otro lado, ninguno de los seis depósitos destinados para esta tarea cuenta con ducto de salida de gases tóxicos ni ducto recolector de lixiviados.

Teniendo en cuenta esto, se plantea un diseño distinto para estos tanques que responda a las verdaderas necesidades de un proceso de compostaje óptimo, eficaz y efectivo, que permita la obtención final más rápida de un producto de alta calidad y, sobre todo, de uso seguro.

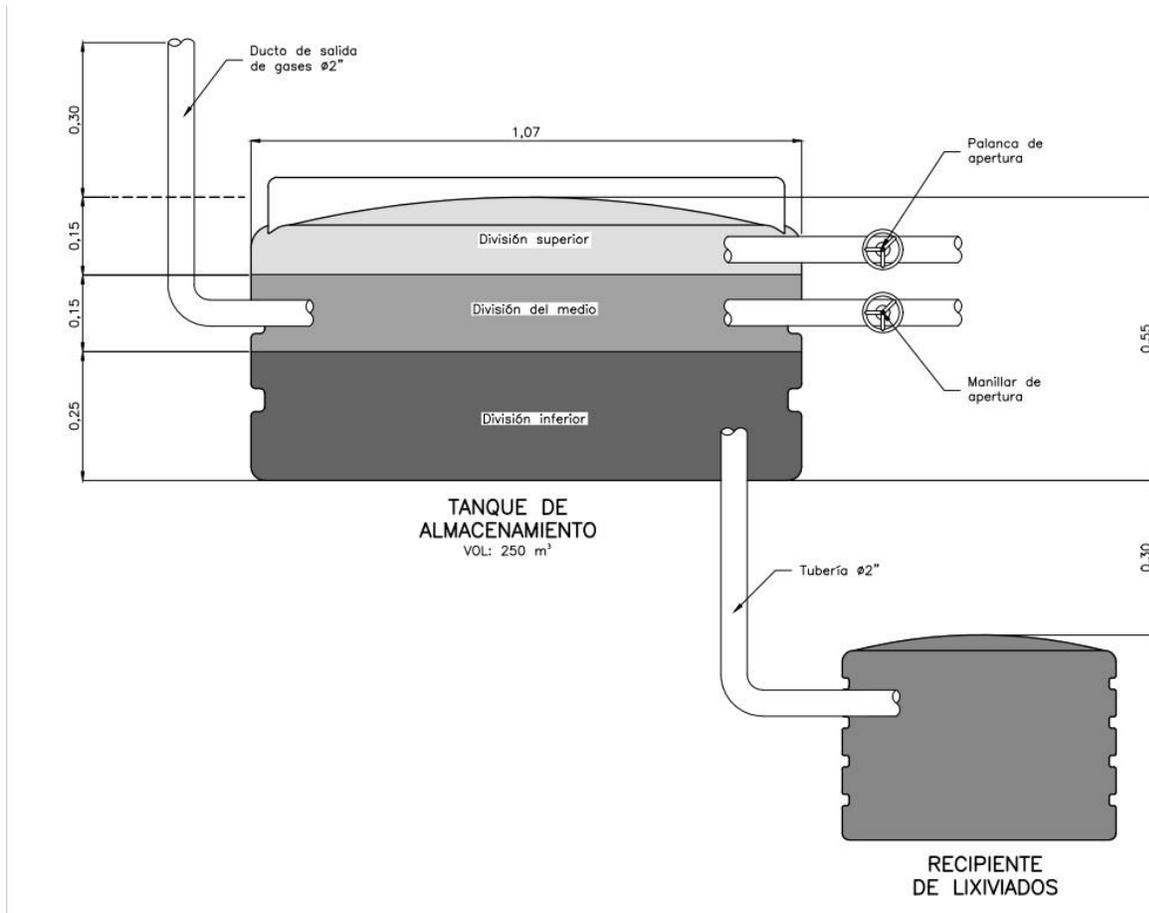
Inicialmente, se considera que el armazón de cada depósito tenga una forma cúbica y sea de aluminio, pues este es un metal liviano y de fácil lavado. Dentro de cada tanque se plantean tres divisiones verticales distintas: la inferior almacenará el material cuyo avance de descomposición se encuentre casi completo; en la del medio, el material orgánico estará sometido aún a procesos

químicos de fermentación, como la estabilización ácido-láctica; finalmente, en la división superior, se encontrará el material agregado recientemente y el cual será mezclado con suelo sano. En la parte exterior del tanque, habrá manillares que permitan la apertura de compuertas entre cada división para que el material pueda pasar de una a otra cuando esté listo. Además, para cada espacio de depósito se instalarán palancas de volteo, es decir, de mezcla, permitiendo así la adsorción e integración de todos los componentes. El volteo del material se realizará cada que a este se le adicione un estabilizante, ya sea suelo sano o un cultivo bacteriano biodigestor, y dependiendo de las condiciones de pH y temperatura de la mezcla (se sugiere que una vez a la semana se midan estos parámetros para determinar las condiciones en las que avanza el proceso). Si el registro de temperatura es alto y/o si el pH no es neutro, se procederá nuevamente a realizar el volteo de los residuos y, de ser necesario, a adicionar más agente estabilizante.

Finalmente, se tendrá un ducto de salida de gases tóxicos conectado a las tres divisiones y un tubo acoplado a otro recipiente en el que se dé la recolección de los lixiviados generados durante cada etapa del proceso de compostaje.

A continuación, se presenta un esquema del diseño anteriormente descrito en la Figura 3. En el Anexo 2, se presenta el diseño modelado en 3D realizado por medio de la herramienta de dibujo AutoCAD.

*Figura 3. Esquema nuevo diseño tanques de almacenamiento*



Además, y con el fin de que los trabajadores de la obra no sean los responsables de remover y depositar en los tanques los residuos sólidos recogidos en cada baño, se plantea que cada dispositivo sanitario se conecte, mediante una tubería, a los tanques anteriormente descritos, permitiendo así que los desechos sean almacenados directamente en los depósitos composteros.

Para lograr esto se sugieren dos alternativas:

1. Ubicar los baños en una zona de cota mayor, de manera que los sólidos caigan a los tanques por gravedad. En este caso, la tubería tendría que mantenerse constantemente lubricada para facilitar el transporte de los residuos.

2. Instalar un sistema sencillo de transporte neumático de sólidos, en el que una bomba de aire comprimido impulsa el sólido a lo largo de la tubería aplicando cambios de presión dentro de la misma. La bomba puede cumplir funciones de aspiración y sobrepresión, dependiendo de las necesidades particulares de transporte.

Finalmente, cabe resaltar que esta alternativa 5 es una solución integral en la que se busca dar solución a los inconvenientes relacionados con la pérdida de productividad de los obreros, quienes tienen dentro de sus responsabilidades la remoción y transporte de los residuos sólidos a los tanques, y mejorar el proceso general de compostaje y su calidad final.

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

En el desarrollo del presente trabajo se registraron diferentes inconvenientes tanto con el uso como con los procesos de remoción y disposición final de los residuos generados en los sanitarios secos dispuestos en las instalaciones del proyecto minero Mona Minas. Dichas dificultades se resumen en capacidad de almacenamiento en baño insuficiente, disminución de la productividad de los trabajadores del proyecto, tiempo extenso de recorrido de los trabajadores de la mina hasta los baños secos, procedimiento de producción de compost no definido y tratamiento nulo final de los residuos orgánicos.

Por consiguiente, como aspirante al título de ingeniera ambiental, se presentaron cinco opciones para mejorar y optimizar el proceso interno de manejo de los residuos sólidos orgánicos que se producen en la zona de obra, manteniendo un enfoque que permita aprovechar los insumos que ya se tienen y exponiendo nuevos métodos de manejo y disposición, con un enfoque concordante con los requerimientos ambientales planteados por la autoridad y con las necesidades y particularidades del proyecto.

Principalmente, se propone cambiar el material secante que se utiliza actualmente en los sanitarios (arena), por una mezcla de aserrín, aserrín putrefacto, corteza suave y paja, elementos cuya relación Carbono – Nitrógeno es alta, posibilitando una reducción en la acidez de los residuos, es decir, incrementa el pH de la mezcla, facilitando de esta manera el manejo de las excretas para su degradación y posterior formación del compost. Asimismo, se encontró el gran beneficio de añadir suelo sano en los tanques de almacenamiento de residuos sólidos orgánicos, ya que, la capa de suelo contiene micro y macroorganismos capaces de transformar las heces en un abono altamente nutritivo e inofensivo para la salud y el ecosistema. Otra ventaja, es el recorte del tiempo estimado

para la obtención de abono a la mitad, puesto que principalmente se estableció un tiempo de 12 meses, y con esta técnica se reduce a 6 meses. Por otro lado, para equilibrar los componentes químicos, físicos y microbiológicos de las excretas humanas en los tanques de almacenamiento, se recomienda su tratamiento mediante estabilización ácido-láctica, lo que genera una aceleración en la producción de compost.

Finalmente, se presenta un nuevo diseño para los tanques de almacenamiento de residuos sólidos, se plantea de manera que estos tanques respondan a las verdaderas necesidades de un proceso de compostaje óptimo, eficaz y efectivo, permitiendo la obtención final más rápida de un producto de alta calidad y seguro.

La realización de este trabajo genera expectativas positivas en cuanto al propósito de encontrar alternativas que solucionen los inconvenientes presentados por la utilización y manejo de los sanitarios secos, y de igual manera, afirma las ventajas de estos dispositivos para evitar la contaminación del recurso hídrico y suelo.

---

### Bibliografía

- Castillo, L. (2002). *Sanitario seco ecológico: Manual de diseño, construcción, uso y mantenimiento*. México.
- Colmenares, A. F., & Jiménez, E. E. (2012). *SANITARIO SECO ECOLÓGICO COMO SISTEMA ALTERNATIVO DE SANEAMIENTO BÁSICO MÓVIL*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia.
- International, A. (2010). *Diseño y mantenimiento sanitario*. Manhattan: Pearson Education.
- Krause, A., Häfner, F., Augustin, F., & M.Udert, K. (2021). Qualitative Risk Analysis for Contents of Dry Toilets Used to Produce Novel Recycling Fertilizers. *Circular Economy and Sustainability volume*, 1107–1146.
- Krounbi, L., Enders, A., Anderton, C., Engelhard, M., Hestrin, R., Torres, D., . . . Lehmann, J. (2020). Sequential Ammonia and Carbon Dioxide Adsorption on Pyrolyzed Biomass to Recover Waste Stream Nutrients . *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7121-7131.
- Leho, S. (2020). *Proyecto SECCO*. Obtenido de <https://ecoinventos.com/secco-sanitario-seco-eco-amigable/>
- Mindreau, E., Juscamaita, J., & Williams, M. (2016). ESTABILIZACIÓN DE HECES HUMANAS PROVENIENTES DE BAÑOS SECOS POR UN PROCESO DE FERMENTACIÓN ÁCIDO LÁCTICA. *Ecología Aplicada*, 143-150.
- S.A, M. M. (2018). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN AURÍFERA MONA MINAS*. Segovia.
- Villa, M. F. (2016). *Baños secos: Gestión y aprovechamiento de residuos*. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Anexos**

**Anexo 1. Mantenimiento baños secos, semestre 2022-1**

		<b>DEPARTAMENTO DE GESTIÓN AMBIENTAL MONA MINAS S.A</b>			
<b>Fecha</b>	<b>Estado del sistema</b>	<b>Mantenimiento</b>	<b>% Llenado del tanque seco</b>	<b>Agrego arena</b>	<b>Observaciones</b>
5/01/2022	Bueno	No	22	Si	
10/01/2022	Bueno	Si	41	Si	
17/01/2022	Bueno	Si	61	Si	
21/01/2022	Bueno	Si	79	Si	Lubricación puntos móviles mecanismo interno
24/01/2022	Bueno	Si	100	Si	Lubricación de resortes de mecanismo de dispersión. Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento.
2/02/2022	Bueno	Si	19	Si	
7/02/2022	Bueno	Si	41	No	
14/02/2022	Bueno	Si	62	Si	
21/02/2022	Malo	Si	82	No	El resorte de accionador de arena no funciona, se procede a cambiarlo

28/02/2022	Bueno	Si	100	Si	Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento.
4/03/2022	Bueno	Si	20	Si	
9/03/2022	Bueno	Si	39	Si	Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento
14/03/2022	Bueno	Si	59	Si	
16/03/2022	Bueno	Si	77	No	
22/03/2022	Bueno	Si	88	Si	
28/03/2022	Bueno	Si	100	No	Lubricación puntos móviles mecanismo interno. Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento.
6/04/2022	Bueno	Si	22	No	Lubricación de resortes de mecanismo de dispersión
12/04/2022	Bueno	Si	41	Si	
15/04/2022	Bueno	Si	62	Si	
19/04/2022	Bueno	Si	80	Si	

26/04/2022	Bueno	Si	100	No	Lubricación puntos móviles mecanismo interno. Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento
5/05/2022	Bueno	Si	22	Si	Lubricación de resortes de mecanismo de dispersión
11/05/2022	Bueno	Si	41	Si	
14/05/2022	Bueno	Si	61	Si	Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento.
18/05/2022	Bueno	Si	79	Si	
25/05/2022	Bueno	Si	100	Si	Lubricación puntos móviles mecanismo interno. Se retira contenedores de residuos sólidos y se llevan a tanques de procesamiento.
3/06/2022	Bueno	Si	19	Si	
8/06/2022	Bueno	Si	27	Si	

---

15/06/2022	Bueno	Si	56	Si	
21/06/2022	Bueno	Si	78	No	Lubricación de resortes de mecanismo de dispersión
28/06/2022	Bueno	Si	100	No	Se retira filtro de orina y contenedores de residuos sólidos, y se llevan a tanques de procesamiento

**Anexo 2.** Diseño tanques de almacenamiento residuos sólidos orgánicos.

