



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**ESCUELA DE
POSGRADOS**

ESCUELA DE POSGRADOS

Maestría en Gestión Integral de Residuos Sólidos

**Beneficios técnicos, económicos y ambientales de la
planta de preprocesamiento de residuos sólidos.**

Título de cuarto nivel a obtener:

Maestría en Gestión Integral de Residuos Sólidos

Autor:

Santiago Israel Román Mendoza

Directora del Trabajo:

Belén Arévalo Durazno

Cuenca, Ecuador 2026

DEDICATORIA

Para María Inés y Martina, son el motor de mi vida.

A mi padre Francisco, que la vida nos siga viendo triunfar juntos.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi agradecimiento al personal técnico, administrativo y operativo de TRIGOLDEC S.A., empresa operadora de la planta de clasificación de residuos del cantón Samborondón; al equipo técnico de GEOCYCLE, entidad promotora del proyecto de valorización de residuos y propietaria de la planta de procesamiento; y al personal del Departamento de Desechos Sólidos y Ambiental del GAD Municipal de Samborondón, como unidad responsable de la gestión de residuos sólidos y del componente ambiental del cantón, por la apertura institucional, el apoyo técnico y la colaboración brindada durante el desarrollo de este proyecto de tesis.

RESUMEN

La investigación analizó los beneficios técnicos, económicos y ambientales de la planta de preprocesamiento de residuos sólidos instalada en el relleno sanitario de Samborondón en 2025. Se evaluó su desempeño mediante registros operativos, trazabilidad del material valorizable, análisis de densidad, costos y emisiones evitadas. Los resultados mostraron una valorización global del 40,6 %, una recepción efectiva de 7.036,74 toneladas en coprocesamiento y una reducción del volumen ocupado por el residuo rechazado respecto al volumen del residuo recién llegado a disposición final. Se concluye que el sistema generó beneficios medibles y que su replicabilidad depende de condiciones técnicas, logísticas e institucionales equivalentes.

PALABRAS CLAVE

preprocesamiento de residuos; coprocesamiento; valorización; relleno sanitario; densidad aparente; costos evitados; emisiones evitadas

ABSTRACT

The research analyzed the technical, economic, and environmental benefits of the solid waste preprocessing plant installed at the Samborondón landfill in 2025. Its performance was evaluated using operational records, traceability of recoverable materials, density analysis, avoided costs, and avoided emissions. The results showed an overall recovery rate of 40.6%, an effective reception of 7,036.74 tons for co-processing, and a reduction in the volume occupied by plant-rejected material compared to landfill newly arrived waste. The study concludes that the system generated measurable benefits and that its replicability depends on equivalent technical, logistical, and institutional conditions.

KEYWORDS

waste preprocessing; co-processing; waste valorization; sanitary landfill; bulk density; avoided costs; avoided emissions

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Planteamiento de la problemática	12
1.2. Justificación e importancia del estudio	13
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Gestión Integral de residuos y jerarquía de residuos	14
2.2. Coprocesamiento en industria cementera: definiciones, fundamentos y criterios	15
Definición y alcance del coprocesamiento	15
Fundamento técnico: recuperación energética y reciclaje mineral en el horno.....	15
El rol del preprocesamiento: condición para un coprocesamiento seguro y estable....	16
Criterios de selección y control de calidad del AFR	16
2.3. Preprocesamiento para coprocesamiento: clasificación, trituración y	
acondicionamiento	16
Concepto y propósito del preprocesamiento.....	16
Operaciones unitarias típicas en preprocesamiento	17
Proceso de preprocesamiento aplicado en Samborondón: descripción técnica del	
sistema	17
Control de calidad del material valorizable: criterios y liberación de lotes.....	17
Generación de rechazo, objetos no deseables y su relación con la eficiencia del	
sistema	17

2.4.	Indicadores de desempeño para plantas de preprocesamiento vinculadas a relleno sanitario.....	18
	Enfoque general de medición del desempeño.....	18
	Indicadores de capacidad y eficiencia operativa.....	18
	Indicadores de rendimiento del preprocesamiento (valorización y rechazo).....	18
	Indicadores de trazabilidad y conciliación de pesajes	19
	Indicadores asociados al rechazo retornado al relleno sanitario (densidad y volumen ganado)	19
	Indicadores de estacionalidad y variables explicativas.....	20
2.5.	Variables críticas del caso: humedad, densidad, trazabilidad de pesajes y logística.....	20
	Humedad y estacionalidad del residuo	20
2.6.	Rechazo y fracción orgánica: implicaciones operativas, económicas y ambientales.....	21
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	21
3.1.	Área de estudio.....	21
	3.1.1. Relleno sanitario: operación general, logística interna y aprovechamiento complementario.....	21
	3.1.2. Planta de preprocesamiento: flujo del proceso, equipos y puntos de control	22
3.2.	<i>Fuentes de información, periodo de análisis y unidad de observación</i>	26
3.3.	Variables e indicadores del estudio	26
	Indicadores técnicos aplicados en el análisis	26
	<i>Variables económicas</i>	28
	Indicadores ambientales aplicados en el análisis	29
	Variables críticas y explicativas para la interpretación del sistema	29
3.4.	<i>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</i>	30
	Análisis documental (reportes, registros, tickets).....	30
	Registros operativos (mensuales/semanales; bitácoras)	31
	Observación directa (apoyo a interpretación).	31
3.5.	Procedimientos de medición específicos	31
	Conciliación de datos: salida teórica vs recepción en Holcim (Dato Geocycle)	31
	Determinación de densidad aparente	31

Método 1: Determinación de densidad con registro de peso por palada de excavadora	32
Método 2: Determinación de densidad con volquetas (volumen de tolva conocido + masa por viaje)	33
Método 3: Determinación de densidad por muestreo en campo (Método volumétrico directo).....	34
Criterio de uso y comparación de resultados	36
Estimación de fracción orgánica del rechazo (método simple por fracciones).....	36
3.6. <i>Tratamiento y análisis de datos</i>	36
Sistematización en hojas de cálculo	36
Estadística descriptiva	36
Análisis comparativo de variables operativas y logísticas	37
Cálculos del estudio (eficiencia, rendimientos, tendencias, volumen ganado, costos evitados, estimación ambiental)	37
3.7. <i>Control de calidad y validación de la información (valores atípicos, cortes temporales, consistencia)</i>	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1. Caracterización cuantitativa del rendimiento del preprocesamiento	38
4.2. Porcentaje de residuos valorizados y tasa de rechazo	41
4.3. Tendencias operativas por período y efecto de la estacionalidad.....	42
4.4. Capacidad instalada vs. capacidad utilizada	43
4.5. Trazabilidad: comparación entre salida teórica y recepción en Holcim	45
4.6. Densidad aparente del rechazo y comportamiento físico del material procesado.....	47
4.7. Beneficios económicos	49
4.8. Beneficios ambientales	51
4.8.1. Reducción de residuos a disposición final y efecto sobre el relleno sanitario	51
4.8.2. Estimación de emisiones evitadas según la metodología definida	51
4.9. Replicabilidad del modelo en otros cantones.....	52
5. CONCLUSIONES.....	54
6. RECOMENDACIONES	55
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
8. ANEXOS.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de componentes en planta preclasificadora.....	23
Figura 2. Diagrama de flujo de preprocesamiento RSU Samborondón.	25
Figura 3. Tecnología de pesaje a bordo en excavadora aplicada a residuos.....	32
Figura 4. Pesaje a bordo con residuos en proceso de carga para procesamiento.	33
Figura 5. Volqueta cargada con residuos en báscula de relleno sanitario Samborondón. ...	34
Figura 6. Volqueta cargada con residuos en báscula de relleno sanitario Samborondón. ...	34
Figura 7. Determinación de densidad por muestreo en campo.....	35
Figura 8. Método volumétrico directo en residuos RS Samborondón.	35
Figura 9. Resumen anual de procesamiento de residuos en planta	39
Figura 10. Rendimiento Mensual de procesamiento de residuos de planta.....	40
Figura 11. Comparación mensual entre el porcentaje de aprovechamiento y la tasa de rechazo de la planta de preprocesamiento durante 2025.	42
Figura 12. Carga mensual procesada por la planta de preprocesamiento.....	43
Figura 13. Comparación entre procesamiento observado y capacidad nominal.....	45
Figura 14. Comparación mensual entre salida de planta y recepción en Holcim durante 2025.	47
Figura 15. Comparación de densidades por método de medición.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen anual de operación de la planta de preprocesamiento.....	38
Tabla 2. Rendimiento mensual de la planta de preprocesamiento durante 2025.....	39
Tabla 3. Comparación mensual entre aprovechamiento y rechazo de la planta de preprocesamiento durante 2025.....	41
Tabla 4. Relación entre material procesado, aprovechamiento y tiempo efectivo de operación durante 2025.....	44
Tabla 5. Comparación mensual entre salida de planta y dato Geocycle.....	46
Tabla 6. Comparación de densidades obtenidas por distintos métodos.....	48
Tabla 7. Estimación del beneficio económico por costo evitado.....	50
Tabla 8. Resumen del material valorizado y emisiones de CO ₂ eq evitadas durante 2025...	52

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Consolidado mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.....	58
ANEXO 2. Consolidado semanal de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.....	59
ANEXO 3. Extracto de consolidado diario de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.....	60
ANEXO 4. Resumen mensual y anual de volquetas principales, pesos, dimensiones y densidades estimadas (2025).....	61
ANEXO 5. Densidad de residuos en diferentes estados con sistema EXC 320 NG, relleno sanitario del cantón Samborondón.	62
ANEXO 6. Muestreo de densidad aparente y caracterización del rechazo.....	63
ANEXO 7. Consolidado de densidades y composición de campo.	64
ANEXO 8. Extracto de consolidado de recepción de material Geocycle/Holcim y emisiones evitadas durante 2025.....	65

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos en el Ecuador afronta el gran reto de disminuir la proporción de residuos que llegan a los sitios de disposición final y dar un paso hacia adelante a modelos de economía circular. En este marco, el cantón Samborondón constituye un caso de estudio relevante por la implementación de un sistema de preprocesamiento de residuos dentro del relleno sanitario, orientado a la valorización de fracciones no reciclables mediante coprocesamiento.

El cantón Samborondón se ubica en la provincia del Guayas y forma parte del área de influencia metropolitana de Guayaquil. En su organización político-administrativa, el cantón incorpora la parroquia rural Tarifa y la parroquia urbana La Puntilla; esta última presenta una dinámica territorial marcada por la expansión urbana y el crecimiento de actividades residenciales y de servicios, además de mantener una base productiva vinculada a actividades agropecuarias tradicionales (Gobierno Provincial del Guayas, s. f.).

De acuerdo con los resultados oficiales del VIII Censo de Población y VII de Vivienda 2022, Samborondón registra 98.540 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2023). Este crecimiento y transformación territorial incrementan la demanda de servicios municipales y, de manera particular, la presión sobre los sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos, reforzando la necesidad de evaluar soluciones operativas que disminuyan la cantidad de residuos enviados a disposición final y mejoren el desempeño del sistema.

Asimismo, el contexto climático de la región constituye un factor determinante en la gestión de residuos, especialmente por su influencia en cuanto a la humedad del residuo y, por ende, sobre el desempeño operativo de procesos de tratamiento y preprocesamiento. En términos generales, se reconoce un régimen estacional con época lluviosa y época seca, con periodos de transición (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2014). De manera específica para la región Litoral, el INAMHI señala que marzo es el mes que climatológicamente presenta las mayores precipitaciones en amplias zonas de la región (INAMHI, 2014). Esta estacionalidad es de importancia para el presente estudio, ya que la variación de humedad puede disminuir el desempeño del preprocesamiento, la generación de rechazo y la continuidad del flujo valorizable a lo largo del año.

Bajo estas circunstancias, la planta procesadora de residuos, instalada en el relleno sanitario de Samborondón, integra el concepto de circularidad e innovación mediante un proceso de clasificación de residuos que posteriormente serán valorizados en coprocesamiento en el horno cementero de la empresa Holcim. El preprocesamiento pasa a ser un componente crítico del desempeño del sistema, ya que indica el porcentaje realmente valorizado y el volumen que finalmente retorna a disposición final.

La función principal de la planta es separar la fracción susceptible a valorización para coprocesamiento de la fracción no apta para el mismo; esta es considerada como rechazo y es retornada al relleno sanitario. Este último tiene características diferentes a las del residuo

fresco (recién descargado en celdas), el cual será analizado para determinar su comportamiento general en la disposición final del sitio.

La operación de la planta depende de la calidad del residuo, de la logística del sistema y de su capacidad instalada.

Aunque la planta de preprocesamiento se encuentra actualmente en funcionamiento, es factible integrar una metodología y evaluación integral que permita dimensionar la afectación e impacto que tendrá sobre la operación del relleno sanitario del cantón Samborondón. Por tanto, la presente investigación tiene como fin evaluar posibles aportes de la planta clasificadora desde una perspectiva técnica, económica y ambiental, a fin de poder determinar su contribución real al aprovechamiento de residuos y su valorización y a la optimización y mejora del sitio de disposición final. El estudio describirá la operación y medirá su aporte mediante indicadores verificables, para poder identificar factores críticos y establecer posibles mejoras en el esquema de preprocesamiento.

Asimismo, la evaluación del modelo permitirá identificar fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora útiles para mejorar la gestión del relleno sanitario y para la toma de decisiones técnicas y públicas. Además, los resultados obtenidos podrán servir de referencia para replicar este modelo o modelos similares en otros lugares del país.

1.1. Planteamiento de la problemática

El constante aumento de los residuos sólidos en el Ecuador evidencia los problemas que se tienen al momento de gestionarlos, específicamente por falta de sitios de disposición final adecuada, como lo son los rellenos sanitarios. En este sentido, la disposición final continúa siendo un eslabón crítico, ya que la capacidad de los rellenos es finita y su reemplazo implica nuevos requerimientos de suelo, inversión y control ambiental. En efecto, “tienen un tiempo de vida útil y deben ser reemplazados cada cierto lapso” (Morán, 2020, párr. 8).

En Samborondón, la implementación de una planta de preprocesamiento de residuos dentro del relleno sanitario introduce una alternativa operativa para reducir la fracción que llega a disposición final y, al mismo tiempo, valorizar parte del flujo mediante coprocesamiento. Sin embargo, el desafío no se limita a contar con la infraestructura, sino a demostrar —con datos verificables— el desempeño real del sistema y sus beneficios directos sobre la operación del relleno.

A pesar de que el cantón Samborondón tiene un relleno sanitario propiamente operado y ha puesto en marcha sistemas de pretratamiento de residuos para coprocesamiento, no existen estudios específicos que determinen y evalúen los beneficios para la disposición final enmarcados en el desempeño operativo de dicha planta, su eficiencia, cantidad de volumen tratado y residuos evitados. En consecuencia, la ausencia de un análisis técnico integral impide la optimización del proceso, sustentación de decisiones operativas (horarios, logística, control de humedad, mantenimiento) y la justificación de la replicabilidad del modelo. Por tanto, se reconoce que “El objetivo del procesamiento es disminuir la cantidad de residuos sólidos enviados al Relleno Sanitario para ampliar así su vida útil.” (EMAC EP, s. f.).

En este marco, la problemática central radica en cuantificar y analizar el rendimiento y la eficiencia del preprocesamiento en condiciones reales de operación; la consistencia del flujo de residuos valorizables enviado a coprocesamiento (a partir de registros de recepción en báscula Holcim); y el comportamiento del material de rechazo retornado al relleno, esto, considerando que su estado triturado y su mayor densidad aparente podrían representar un beneficio operativo relacionado con el aprovechamiento de espacio (volumen ganado). Además, debido a las condiciones climáticas del lugar, resulta necesario analizar el efecto de la humedad sobre el rendimiento en el proceso y sus corrientes.

1.2. Justificación e importancia del estudio

La presente investigación busca evaluar integralmente aquellos beneficios que la planta clasificadora aporta sobre relleno sanitario del cantón Samborondón, considerando parámetros técnicos, económicos y ambientales. Esta evaluación es relevante porque permite pasar de una apreciación cualitativa a una medición sustentada en indicadores operativos y resultados verificables, útiles para la gestión del relleno sanitario y para la planificación de mejoras.

El análisis del primer año de operación permite identificar aquellas variaciones que se asocian al comportamiento del residuo, rutinas de mantenimiento, logística y jornadas de trabajo.

Por tanto, la investigación tiene un alcance aplicado con valor estratégico para la toma de decisiones públicas y técnicas. Desde esa perspectiva, el caso Samborondón puede aportar parámetros mínimos y criterios de desempeño que orienten futuras inversiones o modelos de contratación para valorización de residuos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar los beneficios técnicos, económicos y ambientales de la planta clasificadora de residuos que inciden directamente sobre el relleno sanitario donde está ubicada.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el rendimiento del preprocesamiento (trituración, clasificación y separación) y su contribución al coprocesamiento y a la reducción del volumen dispuesto en el relleno sanitario.
- Cuantificar los costos evitados por toneladas evitadas, ingresos por coprocesamiento (en caso de haberlos) y costos por espacio ahorrado por densidad del material de rechazo.
- Estimar emisiones de CO₂ evitadas, reducción de volumen en celdas y extensión de vida útil del relleno sanitario.
- Analizar y comparar la capacidad instalada de la planta versus capacidad utilizada,
- Definir indicadores generales operativos que permitan evaluar los posibles beneficios técnicos, económicos y ambientales.
- Emitir recomendaciones específicas para optimizar el rendimiento de la planta.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Gestión Integral de residuos y jerarquía de residuos

La gestión integral de residuos sólidos (GIRS) se entiende como el conjunto de políticas, instituciones, instrumentos y operaciones que abarcan todas las fases del residuo, desde su generación hasta el tratamiento y la disposición final, con el propósito de prevenir y controlar la contaminación y proteger la salud y el ambiente. En el marco normativo ecuatoriano, esta visión integral se recoge en la regulación ambiental nacional que establece la gestión a lo largo del ciclo completo del residuo y define obligaciones y competencias para los actores que intervienen en cualquiera de sus fases (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

Dentro de la GIRS, un principio rector ampliamente aceptado es la jerarquía de residuos, que ordena las alternativas de manejo según su preferencia ambiental y de eficiencia de recursos. En términos generales, la jerarquía prioriza acciones para evitar la generación y reducir en la fuente, seguido por reutilización, reciclaje y otras formas de valorización/recuperación, dejando la disposición final como última opción. Este enfoque es consistente con el marco europeo, donde la jerarquía se establece como un “orden de prioridad” para la prevención y gestión de residuos y se incorpora como pilar de política pública (European Parliament and the Council of the European Union, 2008).

En Ecuador, la normativa ambiental también reconoce la necesidad de promover la jerarquización. En particular, se establece como objetivo principal la aplicación de la jerarquización de residuos/desechos, junto con la incorporación de tecnologías que reduzcan impactos negativos, y que la eliminación o disposición final sea el último recurso dentro de un manejo ambientalmente racional (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015). A nivel de política pública, el Reglamento del Código Orgánico del Ambiente contempla el Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos No Peligrosos como un instrumento de la Autoridad Ambiental Nacional, en coherencia con el principio de jerarquización y con la orientación hacia la reducción, reutilización, reciclaje y otras formas de aprovechamiento antes de la disposición final.

Aplicar la jerarquía de residuos no implica únicamente elegir tecnologías, sino organizar el sistema para que el flujo de residuos se gestione de manera diferenciada según su potencial de valorización y su riesgo. En la práctica, esto exige integrar componentes como: prevención y reducción en la fuente; (recolección y transporte eficientes); segregación y aprovechamiento de reciclables; tratamiento y valorización de fracciones no reciclables mediante rutas alternativas; y disposición final técnicamente controlada para lo no valorizable. Esta secuencia es clave, porque una gestión centrada exclusivamente en disposición final incrementa costos, presión sobre el suelo disponible y conflictos socioambientales, mientras que una gestión basada en jerarquía promueve eficiencia de recursos y reduce impactos acumulativos.

En este punto, la valorización, ya sea material o energética, cobra relevancia como instrumento para desplazar la disposición final. En la jerarquía, las opciones de recuperación/valorización se ubican por encima de la eliminación y la disposición final, al permitir reducir el volumen dispuesto y sustituir recursos (combustibles o materias primas)

dentro de sistemas productivos. En el marco europeo, por ejemplo, la “recuperación” (incluida la recuperación energética) forma parte de los conceptos fundamentales del régimen de residuos y se vincula a la mejora de la eficiencia de recursos y reducción de impactos (European Commission, s. f.). En Ecuador, la política pública y el marco regulatorio también impulsan la adopción de tecnologías y enfoques que permitan disminuir la presión sobre los rellenos sanitarios, en coherencia con el principio de jerarquización (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015).

Por tanto, la jerarquización de los residuos debe ser entendida como una guía para poder tomar decisiones en condiciones reales, considerando varios factores importantes como el clima, infraestructura disponible, capacidad institucional, disponibilidad económica y las características propias del residuo.

2.2. Coprocesamiento en industria cementera: definiciones, fundamentos y criterios

Definición y alcance del coprocesamiento

El coprocesamiento en hornos cementeros es una alternativa de gestión para determinados residuos clasificados, que permite la recuperación energética, sustituyendo los combustibles convencionales, y, además, el aprovechamiento de fracciones minerales en el proceso de elaboración de clinker, dentro de un proceso industrial ya existente. Se implementa mediante el uso de combustibles alternativos y materias primas alternativas, seleccionados y acondicionados para ser compatibles con el proceso productivo, continuidad operativa y control ambiental.

La guía técnica de GIZ-LafargeHolcim (2020)¹ define los AFR (Alternative Fuels and Raw Materials) como el conjunto de combustibles alternativos (AF²) y materias primas alternativas (AR³) derivados de residuos o subproductos que pueden reemplazar parcialmente combustibles fósiles y materias primas naturales en la fabricación de clinker. Los combustibles alternativos son aquellos que aportan energía recuperable (poder calorífico), mientras que las materias primas alternativas son aquellas que aportan minerales útiles sustituyendo parcialmente recursos naturales extraídos por medio de la minería.

Fundamento técnico: recuperación energética y reciclaje mineral en el horno

El fundamento del coprocesamiento se sustenta en que el proceso de clinkerización permite integrar, bajo control, componentes orgánicos y minerales presentes en el residuo. La fracción orgánica se aprovecha como energía térmica, reduciendo el consumo de combustibles tradicionales, mientras que la fracción mineral puede incorporarse al clinker como sustituto parcial de materias primas. La guía de GIZ-LafargeHolcim (2020) establece que el contenido

¹ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GmbH): Agencia Alemana de Cooperación Internacional.

² Alternative fuels.

³ Alternative raw materials.

mineral del residuo es recuperado en el clinker, mientras que el contenido orgánico puede recuperarse como energía térmica.

Desde la perspectiva del desempeño del coprocesamiento, Baidya y Ghosh (2016) destacan la relación entre la tasa de sustitución térmica (TSR) y la reducción de consumo de combustibles fósiles y materias primas convencionales, así como con la disminución de impactos ambientales relacionados con su extracción y uso.

El rol del preprocesamiento: condición para un coprocesamiento seguro y estable

La mayoría de los residuos no pueden coprocesarse directamente por la forma en que se generan o recolectan, debido a su heterogeneidad, presencia de humedad, tamaño de partícula y contaminantes. Por ello, el preprocesamiento es una alternativa práctica para convertir un flujo heterogéneo de material en un combustible compatible con la operación del horno.

En términos generales, el preprocesamiento comprende operaciones como separación, trituración, tamizado, remoción de metales, homogeneización y, cuando corresponde, secado o biotratamiento que sirven para elevar la calidad del combustible derivado de residuos (RDF).

Criterios de selección y control de calidad del AFR

La selección y el control de calidad de AFR buscan asegurar que el material ingresado al proceso no comprometa la estabilidad operativa ni el desempeño ambiental de la planta cementera. La guía de GIZ-LafargeHolcim (2020) establece que la aceptación debe considerar requisitos legales, ambientales, operativos, de salud y seguridad, además del aseguramiento de calidad del AFR y el monitoreo de emisiones.

Entre las propiedades relevantes se incluyen poder calorífico, humedad, contenido de cenizas, cloro y azufre, granulometría, metales pesados y otros compuestos que puedan generar riesgos de corrosión, incrustaciones o alteraciones en el proceso, así como afectaciones en emisiones. Es necesario un control sistemático por la relación directa de estas propiedades de residuo y la estabilidad del coprocesamiento.

El documento técnico GEO-072-23 (Geocycle, 2023) establece criterios específicos para la liberación del material valorizable, incluyendo umbrales de poder calorífico, humedad, cloruros y granulometría, así como control de radiación y límites para oligoelementos. Estos criterios permiten tratar el rendimiento del sistema como resultado del cumplimiento de especificaciones, no únicamente de la cantidad procesada.

2.3. Preprocesamiento para coprocesamiento: clasificación, trituración y acondicionamiento

Concepto y propósito del preprocesamiento

El preprocesamiento es el conjunto de operaciones mecánicas controladas con el propósito de transformar un residuo heterogéneo en un material más homogéneo, manejable y compatible con los parámetros de coprocesamiento. En términos de operación, su propósito

es aumentar la calidad del combustible derivado de residuos (RDF/SRF), estabilizar sus propiedades y reducir el porcentaje de fracciones no compatibles con el horno cementero.

Operaciones unitarias típicas en preprocesamiento

Las configuraciones de preprocesamiento varían según la calidad del residuo, el objetivo del combustible alternativo y las condiciones propias del lugar; sin embargo, existen operaciones recurrentes:

- recepción e inspección o segregación inicial;
- trituración o apertura de bolsas y reducción de tamaño;
- separación de metales;
- separación por tamaño y/o densidad;
- homogeneización y control de calidad;
- reducción del contenido de humedad (cuando aplique).

La guía de GIZ-LafargeHolcim (2020) resalta que la selección e instalación de los equipos debe concebirse por las características del residuo y los parámetros del sistema de coprocesamiento del lugar donde se realiza el proceso.

Proceso de preprocesamiento aplicado en Samborondón: descripción técnica del sistema

La planta instalada en Samborondón combina procesos de reducción de tamaño de partículas de los residuos, separación de materiales impropios, separación de elementos metálicos y varias formas de clasificación física, con el objetivo de acondicionarlos y que sean aptos para valorización. La configuración específica del sistema en análisis se describe en el capítulo de materiales y métodos.

Control de calidad del material valorizable: criterios y liberación de lotes

El control de calidad es un componente esencial del preprocesamiento, ya que determina si el material producido cumple con las condiciones necesarias para ser enviado a coprocesamiento. Los criterios técnicos para la estación y las directrices especializadas coinciden en que aceptar el material no depende únicamente de la cantidad procesada, sino del cumplimiento de especificaciones que aseguren su compatibilidad con el proceso del cemento.

Generación de rechazo, objetos no deseables y su relación con la eficiencia del sistema

En sistemas de preprocesamiento orientados a coprocesamiento, se genera inevitablemente una fracción no valorizable y se identifican materiales que deben excluirse del proceso por razones de seguridad, compatibilidad operativa o control de calidad. La guía de GIZ-LafargeHolcim (2020) señala que el desempeño del preprocesamiento y la calidad del combustible derivado dependen de la composición del residuo, de su variabilidad y de la eficiencia de las etapas de separación, destacando que la presencia de fracción orgánica

húmeda, finos y materiales indeseados puede reducir la aptitud del RDF y aumentar el rechazo.

Adicionalmente, dentro del flujo operativo se distinguen los impropios, que se entienden como aquellos elementos que pueden generar afectaciones directas al sistema de trituración y separación o introducir riesgos en la operación. Su presencia incrementa la probabilidad de paradas no programadas, mantenimientos correctivos y pérdidas en el rendimiento.

2.4. Indicadores de desempeño para plantas de preprocesamiento vinculadas a relleno sanitario

Enfoque general de medición del desempeño

La evaluación del desempeño de una planta de preprocesamiento establecida en un relleno sanitario necesita indicadores que permitan medir la eficiencia operativa, la capacidad real de transformación, la proporción de material valorizable, la generación de rechazo y la trazabilidad del flujo de material que efectivamente llega a coprocesamiento.

Para coprocesamiento, la medición del desempeño debe integrar variables de proceso respecto a la calidad, cantidad y estabilidad del material valorizable, así como variables de operación que incluyan continuidad, logística, capacidad y paradas de planta.

Indicadores de capacidad y eficiencia operativa

Capacidad instalada (CI). Es la capacidad nominal del sistema reportada por diseño o fabricante, expresada en toneladas por hora (t/h). En el caso de Samborondón, el documento técnico institucional establece una capacidad instalada de 30 t/h.

Capacidad utilizada (CU). Es la capacidad efectiva alcanzada en operación, y se calcula como el volumen procesado dividido por las horas efectivas de operación en el periodo de análisis. Su cálculo general se expresa como:

$$CU \text{ (t/h)} = \frac{\text{Masa alimentada al proceso (t)}}{\text{Horas efectivas de operación (h)}}$$

Eficiencia operativa (EO). Permite comparar el uso real frente a la capacidad nominal y se expresa como:

$$EO \text{ (\%)} = \left(\frac{CU}{CI} \right) \times 100$$

Este indicador permite comparar la capacidad nominal del sistema con su desempeño real en operación.

Indicadores de rendimiento del preprocesamiento (valorización y rechazo)

En plantas de coprocesamiento, un resultado central es la proporción de residuo que se transforma en material valorizable (producto) y la proporción que retorna como rechazo al relleno sanitario.

Tasa de valorización (TV). Mide la fracción del residuo alimentado que se convierte en material valorizable. Se expresa como:

$$TV (\%) = \left(\frac{\text{Masa valorizable (t)}}{\text{Masa alimentada (t)}} \right) \times 100$$

Tasa de rechazo (TR). Mide la fracción del residuo alimentado que no es valorizable y retorna a disposición final. Se expresa como:

$$TR (\%) = \left(\frac{\text{Masa de rechazo (t)}}{\text{Masa alimentada (t)}} \right) \times 100$$

Estas tasas deben interpretarse tomando en cuenta la variabilidad del residuo y las condiciones de operación del sistema.

Indicadores de trazabilidad y conciliación de pesajes

Dado que el desempeño del sistema se verifica a través de registros de operación y con registros de recepción en horno, es importante incorporar indicadores de trazabilidad que permitan comparar el flujo “teórico” con el flujo “oficial” recibido.

Salida teórica de material valorizable (ST). Se obtiene por balance de masa simple entre alimentación y rechazo:

$$ST (t) = \text{Masa alimentada (t)} - \text{Masa rechazo (t)}$$

Recepción oficial en coprocesamiento (RO). Corresponde a la masa registrada en báscula del receptor industrial (Holcim), respaldada por certificados o reportes oficiales.

Diferencia de trazabilidad (DT). Cuantifica la diferencia entre la salida teórica y la recepción oficial:

$$DT (t) = RO (t) - ST (t)$$

$$DT (\%) = \left(\frac{DT (t)}{ST (t)} \right) \times 100$$

Estos indicadores permiten detectar diferencias entre la salida teórica y la recepción oficial del material, y dan contraste al control de calidad de datos del sistema.

Indicadores asociados al rechazo retornado al relleno sanitario (densidad y volumen ganado)

En el sistema en análisis donde el rechazo retorna al relleno sanitario con cambios físicos, triturado y con mayor densidad aparente, resulta relevante medir su contribución operativa en términos de aprovechamiento de espacio.

- **Densidad aparente del material (ρ).** Se define como la relación entre masa y volumen (t/m^3):

$$\rho \text{ (t/m}^3\text{)} = \frac{\text{Masa (t)}}{\text{Volumen (m}^3\text{)}}$$

- **Volumen ocupado (V).** Para una masa determinada, el volumen se estima como:

$$V \text{ (m}^3\text{)} = \frac{\text{Masa (t)}}{\rho \text{ (t/m}^3\text{)}}$$

- **Volumen ganado (VG) por densificación.** Es la diferencia del volumen ocupado entre el residuo descargado en plataforma del relleno sanitario y el rechazo triturado/densificado, para una misma masa:

$$VG \text{ (m}^3\text{)} = \frac{M}{\rho_{\text{ref}}} - \frac{M}{\rho_{\text{rechazo}}}$$

Este indicador permite expresar el efecto de la densificación del rechazo en términos de aprovechamiento de espacio en el relleno sanitario.

Indicadores de estacionalidad y variables explicativas

Las características climáticas de la zona influyen en la humedad del residuo y, por tanto, en la eficiencia del preprocesamiento y la calidad del material valorizable.

En estudios de desempeño, es recomendable analizar las tendencias mensuales y comparaciones entre variables operativas tales como: alimentación, rechazo, valorización, horas efectivas, paradas, además de las variables de contenido de humedad (época lluviosa-seca), con el fin de identificar patrones de comportamiento y factores críticos que expliquen variaciones del rendimiento.

En la presente investigación, los indicadores se aplican con base a registros operativos, reportes de planta y recepción oficial en planta cementera.

2.5. Variables críticas del caso: humedad, densidad, trazabilidad de pesajes y logística

Humedad y estacionalidad del residuo

La humedad del residuo constituye una variable crítica en plantas de preprocesamiento ya que modifica el comportamiento físico del material, influye en la eficiencia de separación y condiciona la calidad del combustible derivado de residuos (RDF/SRF) destinado a coprocesamiento. En el caso de Samborondón, la estacionalidad climática se refleja en variaciones del contenido de humedad del residuo alimentado a la planta. Este cambio incide en dos aspectos centrales del desempeño: la relación entre fracción valorizable y fracción de rechazo y diferencias entre el peso registrado en báscula del relleno sanitario y la recepción oficial en planta cementera (según la estación). Por este motivo, el factor de humedad se consideró como una variable explicativa para interpretar diferencias en el rendimiento de la planta, particularmente en época lluviosa.

2.6. Rechazo y fracción orgánica: implicaciones operativas, económicas y ambientales

El rechazo en una planta de preprocesamiento vinculada a un relleno sanitario corresponde a la fracción del residuo alimentado que no se deriva a coprocesamiento. Dicha fracción no pasa los procesos mecánicos establecidos en las diferentes etapas de la planta dadas por el incumplimiento de criterios de aceptación del material valorizable.

Desde el punto de vista operativo, el rechazo influye de manera directa en la continuidad del proceso y en la eficiencia del sistema establecido. Un rechazo elevado implica mayores requerimientos de logística interna para su evacuación hacia las celdas del relleno sanitario, incrementa el recorrido de las volquetas, el uso de maquinaria (proceso de carga, acarreo, conformación y compactación) y la gestión del frente de disposición.

En términos económicos, el rechazo genera costos directos e indirectos. Los costos directos se relacionan con la movilización y disposición del rechazo: transporte interno, horas de maquinaria, operación de celda, compactación y cobertura.

Desde el enfoque ambiental, el rechazo mantiene una relación directa con los impactos del relleno sanitario. Una fracción de rechazo con alto contenido orgánico tiende a presentar mayor potencial de generar lixiviados y emisiones asociadas a la biodegradación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

3.1.1. Relleno sanitario: operación general, logística interna y aprovechamiento complementario

El área de estudio corresponde al sistema de disposición final del cantón Samborondón, Provincia del Guayas, específicamente en el relleno sanitario donde se llevó a cabo su operación, que incluye la recepción, manejo y disposición de los residuos sólidos urbanos del cantón (RSU). El sitio se localiza en las coordenadas 1.937296° S, 79.742125° O. La operación del relleno comprende las actividades típicas de un complejo de estas características; ingresan los vehículos recolectores al punto y descargan los residuos para posteriormente ser conformados, compactados y cubiertos con material pétreo (arcilla) mediante maquinaria y logística interna de transporte. En el mismo sitio se realiza la operación de la planta preprocesadora de residuos, por lo que el relleno sanitario no solo es un sitio de disposición final típico, sino un complejo operativo de valorización de residuos.

Adicionalmente, en el relleno sanitario se desarrolla un proyecto de abonos orgánicos a partir de residuos sólidos clasificados en sitio. En este proceso, se separan fracciones y se realiza un tratamiento biológico para obtener compost de alta calidad con numerosos usos. Este proyecto complementa el flujo de valorización del relleno y contribuye a la disminución de la fracción orgánica destinada a la disposición final.

Una de las características más importantes aplicadas en la logística interna fue la designación de un espacio (dentro de la plataforma operativa del relleno) de manejo donde se implementó una fase preliminar de control y separación de impropios. En esta etapa, alrededor de 40

recicladores, apoyados por el municipio (antiguos recicladores del botadero municipal), fueron empleados y se les asigna un espacio para recuperar material reciclable de los vehículos recolectores que llegan del sector de La Puntilla (fraccionalmente más propensos al reciclaje vs cabecera cantonal). Esta implementación en el diseño de operación y suministro de material para la planta contribuye para que el proceso se lleve a cabo de manera que no interfiera con el trabajo de los recicladores y así no afectar el ritmo de alimentación de la planta.

3.1.2. Planta de preprocesamiento: flujo del proceso, equipos y puntos de control

La planta de preprocesamiento está ubicada dentro de los predios del relleno sanitario y su objetivo es la separación y preparación de los residuos que recibe para ser posteriormente valorizados en coprocesamiento. Además, genera un volumen de residuos “rechazados” que regresan a las celdas del relleno. El proceso se desenvuelve en un esquema continuo movido por bandas transportadoras que incluye puntos de revisión y control destinados a proteger los equipos, sus componentes y entregar la mejor calidad de material posible para coprocesamiento.

Sobre esta base técnica, la operación real se ha acoplado a las características específicas del relleno sanitario y a la coexistencia con un componente social de reciclaje formalizado. El proceso operativo inicia en la plataforma del relleno sanitario, donde se desarrolla una etapa previa de manejo del material antes de alimentar o abastecer la planta. En este punto operan aproximadamente 40 recicladores cobijados por el municipio (ex recicladores del botadero municipal) a quienes se les ha asignado un espacio formalizado para aprovechar materiales valorizables. Esta organización territorial y social motivó el diseño de un esquema de abastecimiento que no interfiera con el trabajo de los recicladores ni con la operación de la planta.

En la práctica, el residuo destinado a preprocesamiento se moviliza desde esta plataforma mediante maquinaria, específicamente una excavadora que carga el material hacia volquetas de 14 m³, para luego transportarlo al punto de descarga de la planta y conformar los lotes de alimentación. Aunque este esquema incrementa la necesidad de maquinaria y transporte interno, también introduce un primer filtro operativo de remoción de elementos no procesables.

Posteriormente, la excavadora alimenta la planta manteniendo un ritmo operativo controlado. En el punto de descarga y alimentación de la planta se implementa un segundo filtro, con personal dedicado a separar cualquier escombros u objeto que pueda dañar o interferir con los equipos. Estos controles reducen el ingreso de impropios y mejoran la operación de la planta. Una vez que el material ingresa al punto de alimentación, este es incorporado al proceso mediante un flujo continuo movido por bandas transportadoras. El funcionamiento interno de la planta se conforma por: alimentación, trituración o apertura de bolsas, separación magnética, clasificación por tamaño de partículas mediante una criba de rodillos vibratorios,

separación neumática o densimétrica (aire presurizado), transporte por bandas y descarga a las dos corrientes finales.

En la primera etapa, el material es sometido a una trituración primaria, cuya finalidad es la apertura de bolsas, reducción de tamaño del residuo y estabilización del flujo para etapas posteriores. El material triturado pasa a una banda transportadora que lo conduce hacia la siguiente parte de proceso.

A continuación, el flujo atraviesa un separador magnético que retira partículas metálicas. Esta etapa reduce la presencia de impropios metálicos en la corriente que continúa hacia clasificación y valorización, además de proteger los equipos posteriores al disminuir el riesgo de daños o sobreesfuerzos. Este material metálico separado se extrae como una corriente independiente.

Posteriormente, el residuo pasa por una criba de rodillos vibratorios, que realiza una clasificación por tamaño. Esta etapa permite regular la granulometría del flujo y mejorar la eficiencia de la separación posterior, al entregar un material con condiciones más controladas hacia la unidad final del proceso.

En la etapa siguiente se ejecuta la separación neumática/densimétrica, en la cual el residuo se divide según su comportamiento físico, principalmente densidad y respuesta aerodinámica. Como resultado, el sistema genera dos salidas: una corriente valorizable (mayor potencial de valorización), y una corriente de rechazo (mayor peso o humedad).

La corriente valorizable se conduce mediante banda hacia tolvas y/o área de acopio, donde se consolida para su proceso de carga y despacho a coprocesamiento. La corriente de rechazo se evacúa, por un sistema de doble banda, hacia dos puntos de descarga, permitiendo operar con dos volquetas (en ciclos rotativos) para su retorno a disposición final (ver Figura 1).

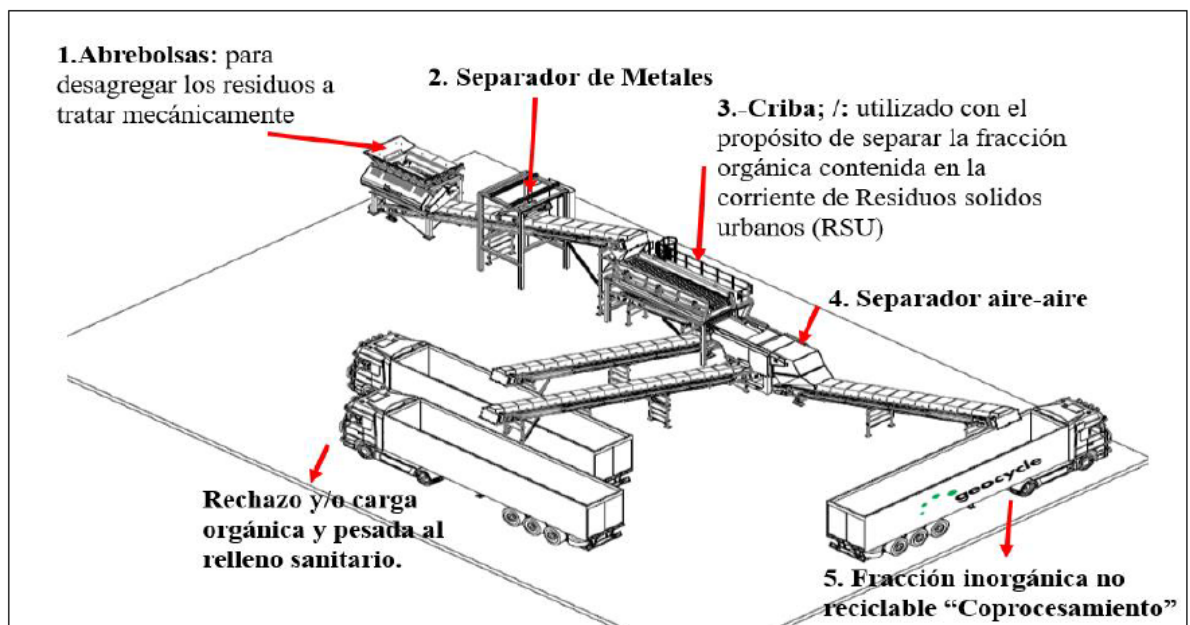


Figura 1. Esquema de componentes en planta preclasificadora.

Los tiempos operativos se han ajustado para que, mientras una volqueta realiza el ciclo de transporte y descarga, la otra permanezca en posición de recepción, manteniendo la evacuación y evitando acumulaciones o derrames de rechazo en el área de descarga.

Si agrupamos los puntos de control que se realizan en el proceso de operación, tenemos: control de elementos no susceptibles a procesamiento previo a la alimentación (filtro en celda de relleno sanitario), control adicional de no procesables en el punto de descarga/alimentación, y control de calidad del residuo valorizable para envío a coprocesamiento (ver Figura 2).

A nivel operativo la planta tiene una capacidad instalada de 30 t/h, de acuerdo con la información técnica de la Estación de Clasificación Geocycle - Samborondón (Geocycle, 2023). En la metodología establecida inicialmente, el esquema de trabajo consistía en procesar en planta 6 horas diarias (incluyendo mantenimiento y limpieza) de lunes a sábado, con el objetivo de completar dos unidades diarias de despacho. Sin embargo, durante la operación se observó que, bajo las condiciones de limpieza y mantenimiento diario requerido y transporte interno, se alcanzaba el llenado de una unidad diaria. Consecuentemente, la jornada del sábado se suprimió y las horas se redistribuyeron de lunes a viernes para incrementar el tiempo efectivo de operación. Con este ajuste se mantuvo el funcionamiento regular de la planta y se lograron llenar dos bañeras diarias sin comprometer las actividades de limpieza y mantenimiento.

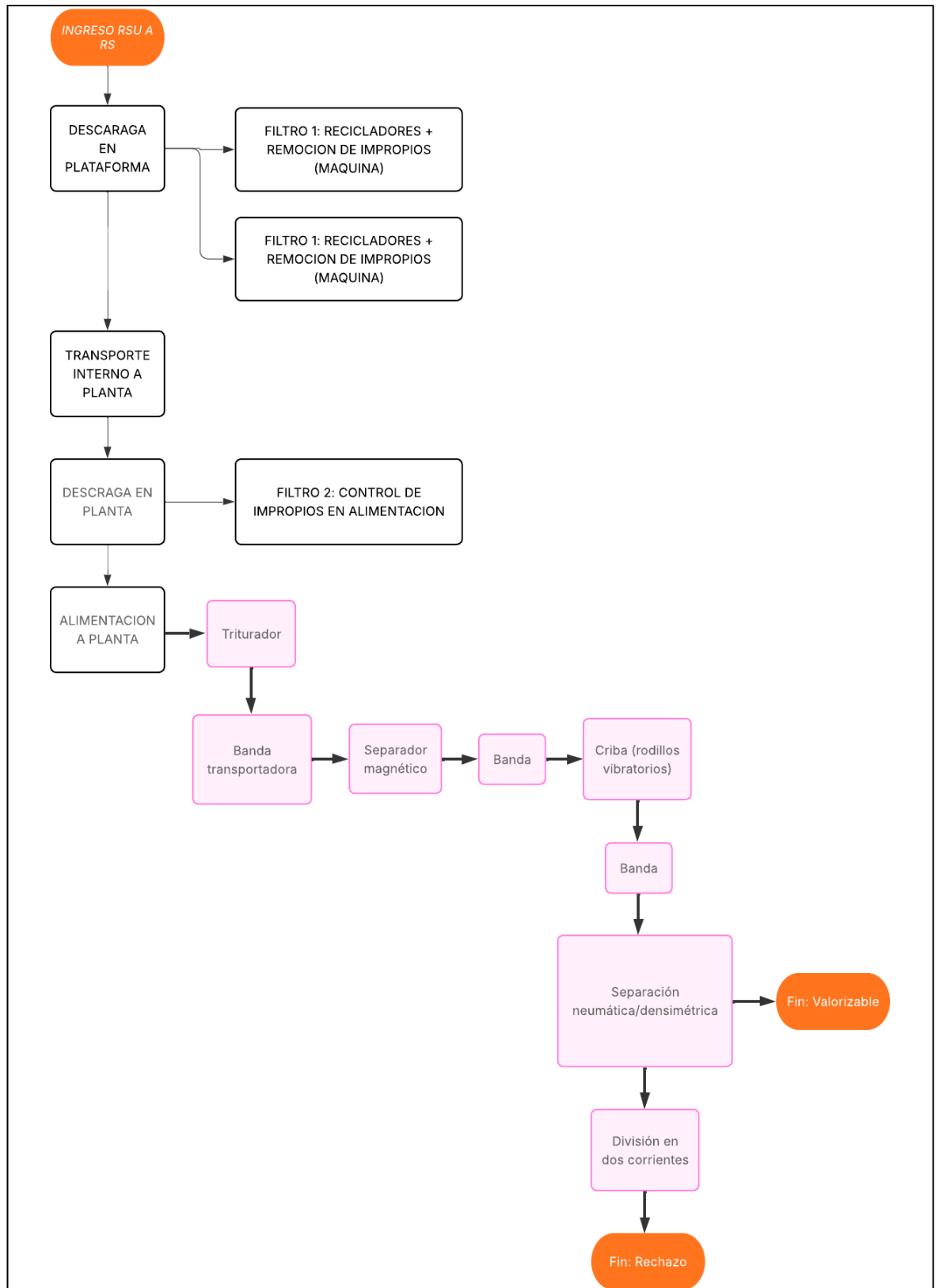


Figura 2. Diagrama de flujo de preprocesamiento RSU Samborondón.

3.2. Fuentes de información, periodo de análisis y unidad de observación

La presente investigación se desarrolló con un enfoque cuantitativo que se basó en los registros operativos obtenidos durante la operación de la planta clasificadora. El periodo de análisis correspondió al primer año de contrato de operación establecido por el GAD de Samborondón, cuyo periodo comprendió entre el 13 de enero de 2025 y el 12 de enero de 2026. La unidad de observación fue el desempeño operativo del sistema integrado entre el relleno sanitario y la planta de preprocesamiento, medido a través de volúmenes alimentados, valorizados y rechazados; trazabilidad del material destinado a coprocesamiento; y las variables operativas y logísticas.

3.3. Variables e indicadores del estudio

En este apartado se presentan las variables e indicadores utilizados para la evaluación del rendimiento técnico, económico y ambiental de la planta preprocesadora. Para cada caso se incluyeron: propósito, fórmula y definición de variables. Metodológicamente, se priorizaron los indicadores que cuentan con respaldo documental y son de aplicación directa a los resultados, mientras que otras variables se utilizaron como apoyo explicativo para interpretar el comportamiento del sistema

Indicadores técnicos aplicados en el análisis

Capacidad utilizada (CU)

Propósito: medir la capacidad real alcanzada en operación (toneladas procesadas por hora efectiva).

Fórmula:

$$CU(t/h) = \frac{M_{alim}(t)}{H_{ef}(h)}$$

Definiciones:

- $CU(t/h)$: capacidad utilizada (t/h).
- $M_{alim}(t)$: masa alimentada al proceso en el periodo (t).
- $H_{ef}(h)$: horas efectivas de operación (h), tiempo real en que la planta estuvo procesando, excluyendo paradas por limpieza, mantenimiento, logística o contingencias. Fuente: bitácoras/registro operativo.

Eficiencia operativa (EO)

Propósito: cuantificar el aprovechamiento de la capacidad instalada.

Fórmula:

$$EO(\%) = \left(\frac{CU}{CI} \right) \times 100$$

Definiciones:

- $EO(\%)$: eficiencia operativa (%).
- $CU(t/h)$: capacidad utilizada (t/h).
- $CI(t/h)$: capacidad instalada del tren de proceso (t/h). En el caso de estudio: $CI = 30$ t/h (documentación técnica).

Tasa de valorización (TV)

Propósito: cuantificar el porcentaje del residuo alimentado que se valoriza mediante coprocesamiento.

Fórmula:

$$TV(\%) = \left(\frac{M_{val}(t)}{M_{alim}(t)} \right) \times 100$$

Definiciones:

- $TV(\%)$: tasa de valorización (%).
- $M_{val}(t)$: masa valorizada (t). Fuente principal: $RO(t)$ (recepción oficial en báscula Holcim).
- $M_{alim}(t)$: masa alimentada al proceso (t).

Tasa de rechazo (TR)

Propósito: cuantificar el porcentaje del residuo alimentado que retorna como rechazo a disposición final.

Fórmula:

$$TR(\%) = \left(\frac{M_{rej}(t)}{M_{alim}(t)} \right) \times 100$$

Definiciones:

- $TR(\%)$: tasa de rechazo (%).
- $M_{rej}(t)$: masa de rechazo (t).
- $M_{alim}(t)$: masa alimentada (t).

Diferencia de trazabilidad (DT)

Propósito: conciliar la salida teórica (ST) con la recepción oficial (RO) en coprocesamiento.

Fórmulas:

$$DT(t) = RO(t) - ST(t)$$

$$DT(\%) = \left(\frac{DT(t)}{ST(t)} \right) \times 100$$

Definiciones:

- $RO(t)$: recepción oficial en coprocesamiento (t). Fuente: certificados/registro de báscula Holcim.
- $ST(t)$: salida teórica valorizable (t).
- $DT(t)$: diferencia de trazabilidad en toneladas (t).
- $DT(\%)$: diferencia de trazabilidad en porcentaje (%).

Variables logísticas y operativas

Propósito: apoyar la interpretación del desempeño real de la planta.

Se consideraron como variables explicativas: disponibilidad de maquinaria de carga y transporte, horas efectivas de operación, paradas programadas y no programadas, limpieza y mantenimiento, restricciones logísticas y variación estacional del residuo. Estas variables se usaron como factores de interpretación para explicar diferencias en capacidad utilizada, valorización, rechazo y trazabilidad.

Variables económicas

Costo evitado por disposición final

Propósito: estimar el beneficio económico asociado a la masa de residuos que no ingresó a disposición final por haber sido valorizada.

Fórmula:

$$CEDF = RO \times Cdf$$

Definiciones:

- **CEDF:** costo evitado por disposición final (USD).
- **RO:** recepción oficial en coprocesamiento (t).
- **Cdf:** costo referencial de disposición final por tonelada (USD/t).

Costo evitado por ahorro de volumen

Propósito: estimar el beneficio económico asociado a la reducción del volumen requerido para disponer el rechazo, debido a su mayor densidad aparente frente al residuo fresco.

Fórmulas:

$$V_{rf} = \frac{M}{\rho_{rf}}$$

$$V_r = \frac{M}{\rho_r}$$

$$VG = V_{rf} - V_r$$

$$CEV = VG \times C_v$$

Definiciones:

- **V_{rf}:** volumen que ocuparía la masa analizada si tuviera densidad de residuo fresco (m³).
- **V_r:** volumen ocupado por el rechazo procesado (m³).
- **VG:** volumen ganado por densificación (m³).
- **CEV:** costo evitado por ahorro de volumen (USD).

- **M**: masa del rechazo analizado (t).
- **prf**: densidad del residuo fresco (t/m^3).
- **pr**: densidad del rechazo procesado (t/m^3).
- **Cv**: costo referencial por metro cúbico de celda construida u operada (USD/m^3).

Indicadores ambientales aplicados en el análisis

CO₂eq evitado reportado (CO₂eq_{evit})

Propósito: registrar el indicador de CO₂eq evitado reportado oficialmente en los certificados de coprocesamiento, asociado a la recepción oficial RO.

Definiciones:

- CO_2eq_{evit} (kg o t): valor reportado en el certificado Geocycle/Holcim.
- $RO(t)$: masa recibida oficialmente en báscula Holcim asociada al certificado.

Estimación de CO₂eq evitado cuando no exista certificado (factor por tonelada)

Propósito: estimar CO₂eq evitado de forma consistente con los certificados disponibles, calculando un factor por tonelada a partir de certificados oficiales y aplicándolo a RO.

Fórmulas:

$$EF_i \left(\frac{\text{kg CO}_2\text{eq}}{\text{t}} \right) = \frac{CO_2eq_{evit,i}(\text{kg})}{RO_i(t)}$$

$$EF_{prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n EF_i$$

$$CO_2eq_{evit,est}(\text{kg}) = RO(t) \times EF_{prom}$$

Definiciones:

- EF_i : factor por certificado i ($\text{kg CO}_2\text{eq/t}$).
- $CO_2eq_{evit,i}$: CO₂eq evitado reportado en el certificado i (kg).
- RO_i : toneladas recibidas oficialmente en el certificado i (t).
- EF_{prom} : promedio del factor de los certificados disponibles.
- $CO_2eq_{evit,est}$: CO₂eq evitado estimado (kg).
- RO : recepción oficial del periodo a estimar (t).

Variables críticas y explicativas para la interpretación del sistema

Salida teórica valorizable (ST)

Propósito: estimar la masa valorizable teórica según registros internos (alimentación menos rechazo).

Fórmula:

$$ST(t) = M_{alim}(t) - M_{rej}(t)$$

Definiciones:

- $ST(t)$: salida teórica valorizable (t).
- $M_{alim}(t)$: masa alimentada al proceso en el periodo (t). Fuente: báscula RS (kg→t) y/o reporte de estación.
- $M_{rej}(t)$: masa de rechazo retornada al relleno sanitario en el periodo (t). Fuente: báscula RS (kg→t) y/o reporte de estación.

Densidad aparente (ρ), volumen ocupado (V) y volumen ganado (VG)

Propósito: cuantificar el efecto del rechazo triturado/densificado sobre el volumen ocupado en celdas, comparado con un material de referencia.

Fórmulas:

$$\rho(t/m^3) = \frac{M(t)}{V(m^3)}$$

$$V(m^3) = \frac{M(t)}{\rho(t/m^3)}$$

$$VG(m^3) = \frac{M}{\rho_{ref}} - \frac{M}{\rho_{rechazo}}$$

Definiciones:

- M : masa comparada (t).
- ρ_{ref} : densidad del material de referencia (t/m³).
- $\rho_{rechazo}$: densidad del rechazo triturado (t/m³).
- VG : volumen ganado por densificación (m³).

Humedad del residuo

Propósito: utilizarla como variable explicativa del rendimiento, la trazabilidad y del comportamiento físico del material.

En el estudio, la humedad se interpretó a partir de las diferencias de pesaje entre salida teórica y recepción oficial, utilizadas como criterio indirecto de apoyo para interpretar variaciones estacionales y operativas.

En consecuencia, los indicadores establecidos permitieron realizar el análisis cuantitativo de la planta, mientras que las variables críticas y explicativas se usaron para interpretar las variaciones bajo condiciones reales de operación.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**Análisis documental (reportes, registros, tickets)**

La recolección de información se sustentó principalmente en análisis documental, mediante la recopilación, revisión y organización de registros y reportes generados durante la operación

real del sistema. Se consideraron documentos verificables que evidenciaron el flujo de residuos desde el relleno sanitario hacia la planta de preprocesamiento, la generación de rechazo y la trazabilidad del material destinado a coprocesamiento. El análisis documental permitió establecer consistencia temporal, validar totales por periodo y sustentar los cálculos de indicadores técnicos, económicos y ambientales con información respaldada.

Registros operativos (mensuales/semanales; bitácoras)

Se emplearon registros operativos generados por el operador del relleno sanitario y por la planta de preprocesamiento, con periodicidad diaria, semanal y mensual. Estos registros se utilizaron para obtener los datos de masa alimentada y masa de rechazo, además, para contrastar, validar y obtener trazabilidad del material valorizable.

Observación directa (apoyo a interpretación).

La observación directa no buscó reemplazar la documentación obtenida de los diferentes actores del proceso, pero permitió corroborar las condiciones operativas del sistema y apoyar la interpretación de los resultados.

3.5. Procedimientos de medición específicos

Conciliación de datos: salida teórica vs recepción en Holcim (Dato Geocycle)

Se realiza para comparar el flujo teórico de material a ser valorizado, el cual se calcula con los datos registrados (internos) del operador de planta en sitio con el flujo recibido (oficialmente) en planta cementera Holcim. Primero, se determinó la salida teórica del sistema haciendo un balance de masa simple, usando la masa alimentada y restando de la masa de rechazo registrada en la báscula del relleno sanitario:

$$ST(t) = M_{alim}(t) - M_{rej}(t)$$

Se identificó la recepción oficial en planta cementera $RO(t)$, respaldada por registros de báscula Holcim certificados. La diferencia de trazabilidad es calculada como:

$$DT(t) = RO(t) - ST(t) \quad DT(\%) = \left(\frac{DT(t)}{ST(t)} \right) \times 100$$

Mediante este procedimiento se identificaron las diferencias sistemáticas entre lo esperado por balance y lo que se registró oficialmente. Las diferencias pueden darse por variaciones de humedad en el residuo y manejo del material entre puntos de pesaje, tiempos de almacenamiento y transporte, y/o diferencias de calibración de básculas. Para el presente análisis, la recepción oficial en báscula Holcim será usada como referencia oficial para cuantificar la valorización efectiva.

Determinación de densidad aparente

La densidad aparente es una variable de importancia significativa para cuantificar el comportamiento físico del residuo y del rechazo triturado que regresa al relleno sanitario. Permite la estimación del volumen ocupado por una masa determinada y, por consiguiente,

obtener el volumen ganado por la densificación del rechazo. Para el presente análisis se emplearon tres métodos complementarios, con el objetivo de tener resultados trazables y comparables bajo condiciones reales de operación.

La densidad aparente se define como:

$$\rho(t/m^3) = \frac{M(t)}{V(m^3)}$$

donde M es la masa del material y V el volumen asociado.

Método 1: Determinación de densidad con registro de peso por palada de excavadora

Este método (en campo) utilizó la tecnología de pesaje a bordo Cat Payload incorporada en la excavadora CAT 320 NG, usada para la operación de la planta preprocesadora, la cual registró la masa estimada de cada “palada” durante el proceso de carga. El procedimiento consistió en: cubicar o determinar el volumen de carga nominal del cucharón, registrar la masa correspondiente mediante el sistema de pesaje a bordo incorporado de la excavadora, y calcular la densidad aparente con la relación masa/volumen (Caterpillar, s. f.-a; Caterpillar, s. f.-b).

Este método permitió realizar comparaciones de diferentes densidades en varias condiciones operativas, residuo recién descargado, residuo antiguo (landfill mining⁴) y residuo rechazado en planta. Su ventaja principal es la alta disponibilidad de datos en operación y su representatividad directa del proceso real de carga del material (ver Figuras 3 y 4).



Figura 3. Tecnología de pesaje a bordo en excavadora aplicada a residuos.

⁴ El término *landfill mining* hace referencia a la excavación y procesamiento de residuos previamente dispuestos en un relleno sanitario, con el fin de recuperar materiales o recursos potencialmente aprovechables (Krook et al., 2012).



Figura 4. Pesaje a bordo con residuos en proceso de carga para procesamiento.

Método 2: Determinación de densidad con volquetas (volumen de tolva conocido + masa por viaje)

Este método está basado en analizar los viajes de volquetas que transportan el material rechazado en planta hacia la celda designada en el relleno sanitario. El volumen de la tolva se conoce con exactitud tomando sus dimensiones geométricas exactas, además de disponer de los registros diarios y pesos de cada viaje cargado. El procedimiento consiste en: (a) establecer el volumen útil de la tolva V_{tolva} en m^3 , (b) determinar la masa transportada por viaje M_{viaje} mediante registros de pesaje disponibles (báscula/registro operativo asociado), y (c) calcular densidad aparente promedio por viaje:

$$\rho_{viaje}(t/m^3) = \frac{M_{viaje}(t)}{V_{tolva}(m^3)}$$

Se calcula la densidad promedio del rechazo a partir del conjunto de viajes:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{viaje,i}$$

Debido a la gran cantidad de registros disponibles, este método es particularmente extenso y es aplicable para observar la variabilidad al evaluar las distancias entre viajes y una densidad operativa, que está directamente vinculada a la logística real en la evacuación y eliminación de residuos.



Figura 5. Volqueta cargada con residuos en báscula de relleno sanitario Samborondón.



Figura 6. Volqueta cargada con residuos en báscula de relleno sanitario Samborondón.

Método 3: Determinación de densidad por muestreo en campo (Método volumétrico directo).

Este método emplea un procedimiento simple basado en utilizar un recipiente de volumen conocido para estimar la densidad aparente mediante muestreo en campo. El procedimiento consiste en: (a) dimensionar el recipiente y conocer su volumen $V_{balde}(m^3)$, (b) llenarlo siguiendo un criterio operativo consistente (por ejemplo, sin compactación o con

compactación controlada, según el objetivo), (c) determinar la masa M_{balde} mediante una báscula, y (d) calcular densidad:

$$\rho_{balde}(\text{t/m}^3) = \frac{M_{balde}(\text{t})}{V_{balde}(\text{m}^3)}$$

Esto nos permite la verificación del orden de magnitud de la densidad para comparar los resultados del residuo rechazado (triturado) con otros tipos de residuo en diferentes estados (residuo fresco, residuo antiguo), diferenciando criterios de compactación si se requiere.



Figura 7. Determinación de densidad por muestreo en campo.



Figura 8. Método volumétrico directo en residuos RS Samborondón.

Criterio de uso y comparación de resultados

Los tres métodos descritos se ejecutaron de manera complementaria. El método de excavadora y el método de análisis de viajes de volquetas aportaron datos de densidad obtenidos del proceso de operación, mientras que el método volumétrico directo aportó datos de densidad en campo. En el capítulo de resultados se presentaron densidades por condición (residuo fresco, residuo antiguo y rechazo triturado), se evaluó la consistencia entre métodos y se adoptó una densidad de trabajo para el cálculo del volumen ganado por densificación, justificando la selección según representatividad y trazabilidad de la fuente.

Estimación de fracción orgánica del rechazo (método simple por fracciones)

La fracción orgánica de los residuos rechazados por la planta se estimó utilizando un método simple que constó en la separación y clasificación de sus fracciones y así determinar la cantidad aproximada de orgánicos. Para ello, bajo condiciones adecuadas, se tomó una muestra representativa del residuo rechazado y se clasificó en categorías principales (orgánico, plástico, textiles, papel/cartón, inerte/impropio, etc.). Se tomó la masa por cada fracción para calcular porcentajes gravimétricos. Tales estimaciones se acompañaron de información sobre la humedad de los residuos que se obtuvo indirectamente debido a la variación en la trazabilidad y la estacionalidad. El objetivo del procedimiento propuesto fue brindar datos y características sobre el comportamiento del residuo en análisis con las distintas estaciones y cuáles podrían ser los efectos operativos, económicos y ambientales en el relleno sanitario.

3.6. Tratamiento y análisis de datos

Sistematización en hojas de cálculo

Los datos se sistematizaron en hojas de cálculo, estableciendo información diaria, semanal y mensual del preprocesamiento. Los registros del relleno sanitario se convirtieron de kilogramos a toneladas para uniformidad. Se estructuraron tablas por periodo (mes y semana) con variables de alimentación, rechazo, salida teórica, recepción oficial y diferencia de trazabilidad. Se identificaron periodos sin operación (registros en cero) y meses con cierres parciales por falta de consolidación o entrega tardía de información, con el fin de evitar distorsión en tendencias.

Estadística descriptiva

Se aplicó estadística descriptiva para caracterizar el desempeño del sistema, mediante medidas como suma, promedio, mínimo, máximo, rango y variabilidad (desviación estándar y coeficiente de variación cuando correspondió). Estas medidas se aplicaron a los principales indicadores técnicos definidos en el apartado 3.3. Se incluyeron análisis por periodos (mensual/semanal) para evidenciar comportamiento y cambios temporales, especialmente en relación con estacionalidad.

Análisis comparativo de variables operativas y logísticas

Se realizó un análisis comparativo de variables operativas y logísticas para interpretar las variaciones en el rendimiento de la planta. Para ello, se consideraron parámetros como la alimentación, el rechazo, el material valorizado, las horas efectivas de operación, el clima y los imprevistos operativos y de logística.

Cálculos del estudio (eficiencia, rendimientos, tendencias, volumen ganado, costos evitados, estimación ambiental)

Se ejecutaron los cálculos de los indicadores definidos en el apartado 3.3, de acuerdo con la disponibilidad y consistencia de la información. Para el indicador de espacio se calculó la densidad aparente y el volumen ganado:

$$VG(m^3) = \frac{M}{\rho_{ref}} - \frac{M}{\rho_{rechazo}}$$

En el análisis económico se calcularon los indicadores de costo definidos en el apartado 3.3, con el fin de comparar la eficiencia del sistema. En el análisis ambiental se utilizaron los indicadores de emisiones evitadas reportadas y estimadas definidos en el apartado 3.3, según la disponibilidad documental.

3.7. Control de calidad y validación de la información (valores atípicos, cortes temporales, consistencia)

El control de calidad de la información se realizó mediante procedimientos de validación interna y conciliación entre fuentes. En primer lugar, se verificó consistencia de unidades (kg a t) y se controló que las sumatorias diarias coincidieran con consolidaciones semanales y mensuales. Se identificaron valores atípicos asociados a eventos operativos (paradas, cierres parciales, semanas con operación nula, cambios de logística) y se documentaron como parte del análisis, evitando excluirlos sin justificación técnica.

Para la trazabilidad del flujo valorizable, se adoptó como referencia la recepción oficial en báscula Holcim. La diferencia de trazabilidad DT se utilizó como mecanismo de validación para detectar diferencias recurrentes por periodo. Cuando existieron meses con datos incompletos por falta de consolidación o reporte tardío, se delimitó el alcance del análisis y se evitó extrapolar valores sin criterio explícito.

Finalmente, para variables derivadas, se validaron órdenes de magnitud mediante comparación cruzada entre métodos y mediante coherencia física de los resultados. Estos controles permitieron asegurar que los resultados reportados fueran consistentes, trazables y defendibles a nivel metodológico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización cuantitativa del rendimiento del preprocesamiento

La caracterización cuantitativa del rendimiento de la planta de preprocesamiento de residuos sólidos del relleno sanitario del cantón Samborondón se desarrolló en base a la información mensual generada durante la operación entre enero y diciembre de 2025. Esta información se complementó con reportes semanales, registros diarios de operación, informes mensuales de clasificación y certificados de recepción emitidos por Geocycle. A partir de estos documentos se revisó, de manera ordenada, la carga procesada, el rechazo generado, la salida de material valorizable, la recepción efectiva en destino, la diferencia entre ambos registros, la humedad y el rendimiento porcentual alcanzado por la planta. El análisis consideró tanto la salida de planta como la recepción efectiva para coprocesamiento (ver Anexo 1, Anexo 2 y Anexo 3).

Durante el período analizado, la planta procesó una carga total de 17.299,52 t. De ese volumen, 10.086,25 t correspondieron a rechazo y 7.213,27 t a material aprovechable enviado desde la planta. Por su parte, la recepción acumulada reportada por Geocycle fue de 7.036,74 t, lo que deja una diferencia total de 176,53 t entre lo que salió y lo que fue efectivamente recibido, equivalente al 2,45 % del total despachado. En términos generales, el rendimiento anual de la planta fue de 40,6 %, valor que representa el porcentaje del material que logró recuperarse para valorización frente al total alimentado al sistema (ver Tabla 1 y Gráfico 1).

Tabla 1. Resumen anual de operación de la planta de preprocesamiento

Indicador	Valor
Carga total (t)	17.299,518
Rechazo total (t)	10.086,251
Salida total (t)	7.213,267
Dato Geocycle (t)	7.036,742
Diferencia (t)	-176,525
Diferencia (%)	-2,45
Rendimiento global (%)	40,6

Fuente: Elaboración propia con base en el resumen mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

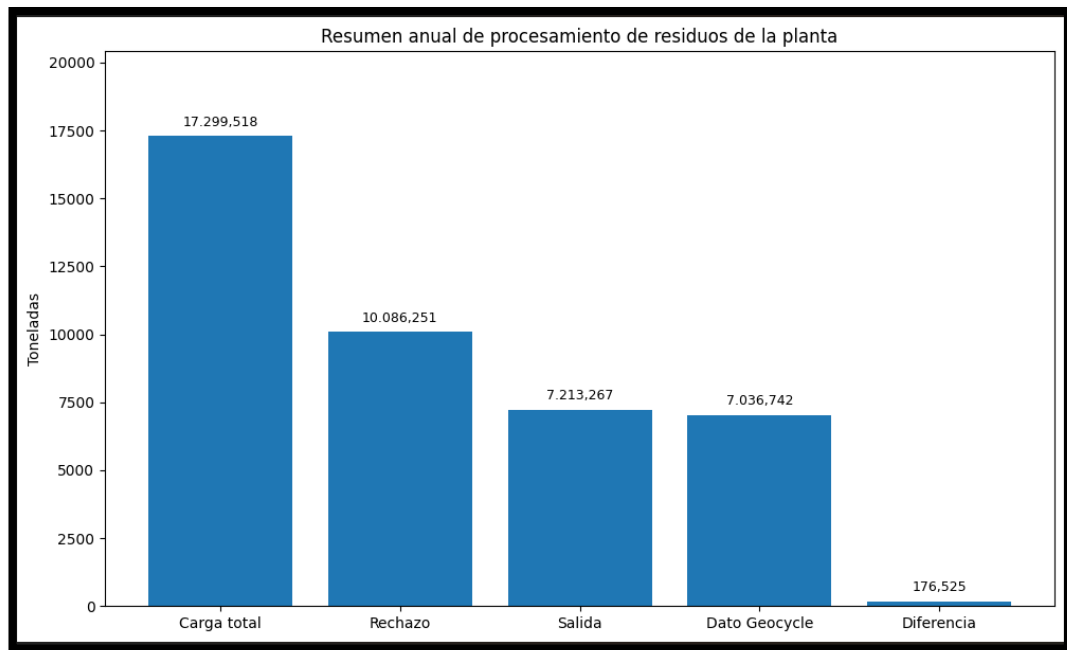


Figura 9. Resumen anual de procesamiento de residuos en planta

Si revisamos el desempeño de la planta, mes a mes, se puede observar un crecimiento positivo del rendimiento. En la etapa inicial de operación se registraron valores del 24 % en enero, 31 % en febrero y 40 % en marzo, lo que refleja un período de ajuste en el esquema de trabajo del personal. A partir de abril, la planta mostró un desempeño más estable, con rendimientos que se mantuvieron entre 40 % y 48 % durante la mayor parte del año. El valor más alto se alcanzó en julio, con 48 %, seguido de noviembre, con 47 %, mientras que agosto y octubre cerraron con 45 %. En diciembre, pese al incremento de la carga procesada, el rendimiento se mantuvo en 44 %, lo que confirma que la operación ya había alcanzado un nivel más estable respecto de los primeros meses (ver Tabla 2 y Gráfico 2).

Tabla 2. Rendimiento mensual de la planta de preprocesamiento durante 2025.

Mes	Rendimiento (%)
Enero	24
Febrero	31
Marzo	40
Abril	40

Mayo	42
Junio	42
Julio	48
Agosto	45
Septiembre	41
Octubre	45
Noviembre	47
Diciembre	44

Fuente: Elaboración propia con base en el resumen mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

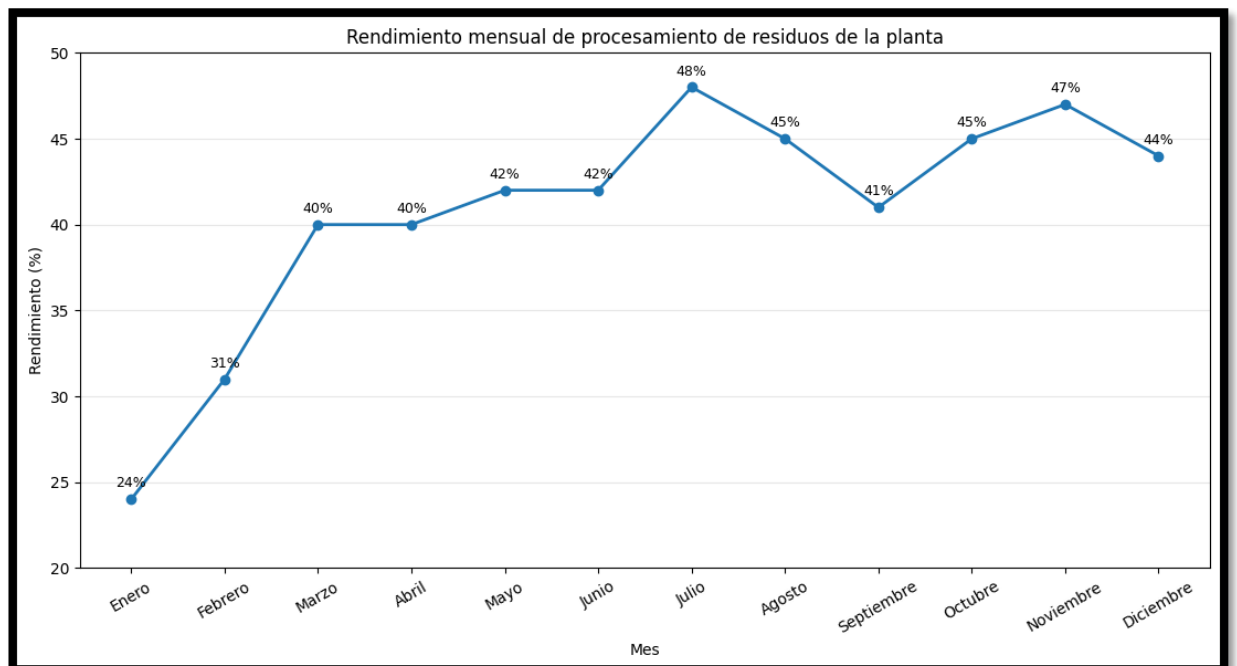


Figura 10. Rendimiento Mensual de procesamiento de residuos de planta.

4.2. Porcentaje de residuos valorizados y tasa de rechazo

Uno de los indicadores más importantes del rendimiento de la planta es la relación entre el material que se recupera con éxito para su valorización y aquel que, debido a sus características, debe regresar al relleno sanitario como rechazo del proceso.

Durante el 2025, el sistema alcanzó un rendimiento del 40,6 % de valorización y un 59,4 % de rechazo. Es decir, por cada 100 toneladas alimentadas al sistema, aproximadamente 41 toneladas lograron separarse con potencial de valorización, mientras que las 59 toneladas restantes no reunieron las condiciones necesarias para ser enviadas a coprocesamiento y, por tanto, retornaron al relleno sanitario.

Este resultado es consistente con la naturaleza del proceso implementado en Samborondón, en el que la planta separa la fracción con potencial de coprocesamiento dentro de un flujo de residuos sólidos urbanos de composición variable.

Si se observa el comportamiento mes a mes, el porcentaje de valorización muestra una mejora progresiva luego del arranque de la operación. En enero se registró un aprovechamiento de 24 % y un rechazo de 76 %; en febrero, el aprovechamiento subió a 31 % y el rechazo bajó a 69 %; mientras que en marzo la valorización alcanzó 40 % y el rechazo se redujo a 60 %. Desde abril en adelante, la planta se mantuvo más estable, con porcentajes de valorización entre 40 % y 48 %, evidenciando un mejor nivel de ajuste en la recuperación del material.

El mejor desempeño registrado fue en julio, cuando la planta alcanzó un 48 % de valorización y un 52 % de rechazo. También está el mes de noviembre, con 47 % de valorización, y agosto y octubre, con 45 %. Bajo condiciones operativas más favorables, la planta estuvo cerca de alcanzar el 50 % de efectividad (ver Gráfico 3 y Anexo 1).

Tabla 3. Comparación mensual entre aprovechamiento y rechazo de la planta de preprocesamiento durante 2025.

Mes	Aprovechamiento (%)	Rechazo (%)
Enero	24	76
Febrero	31	69
Marzo	40	60
Abril	40	60
Mayo	42	58
Junio	42	58
Julio	48	52

Agosto	45	55
Septiembre	41	59
Octubre	45	55
Noviembre	47	53
Diciembre	44	56

Fuente: Elaboración propia con base en el resumen mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

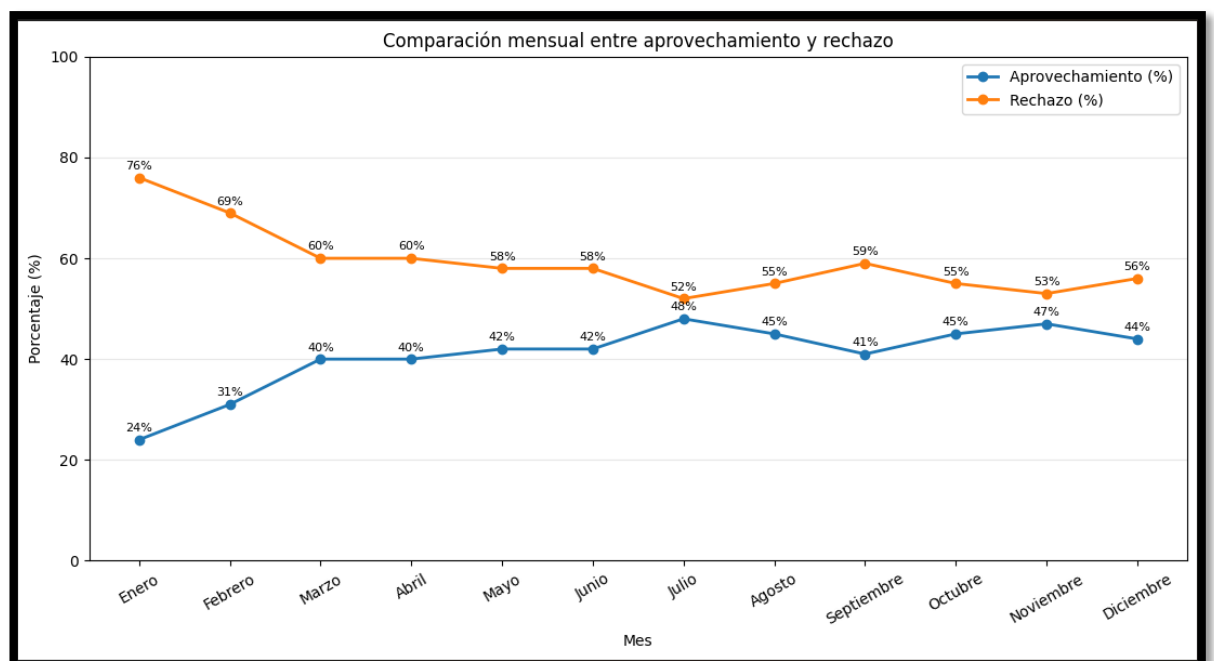


Figura 11. Comparación mensual entre el porcentaje de aprovechamiento y la tasa de rechazo de la planta de preprocesamiento durante 2025.

4.3. Tendencias operativas por período y efecto de la estacionalidad

En el análisis de los períodos de operación, las diferencias observadas se deben no solo al clima en la zona, sino también a eventos operativos específicos que influyeron directamente en el ritmo de trabajo de la planta.

Como resultado, la carga procesada mostró variaciones a lo largo del año. Los volúmenes más bajos se registraron en enero, con 607,86 t, y en abril, con 958,66 t, mientras que los más altos se alcanzaron en septiembre, con 2.223,01 t, y en diciembre con 2.029,65 t (ver gráfico 4 y Anexo 1).

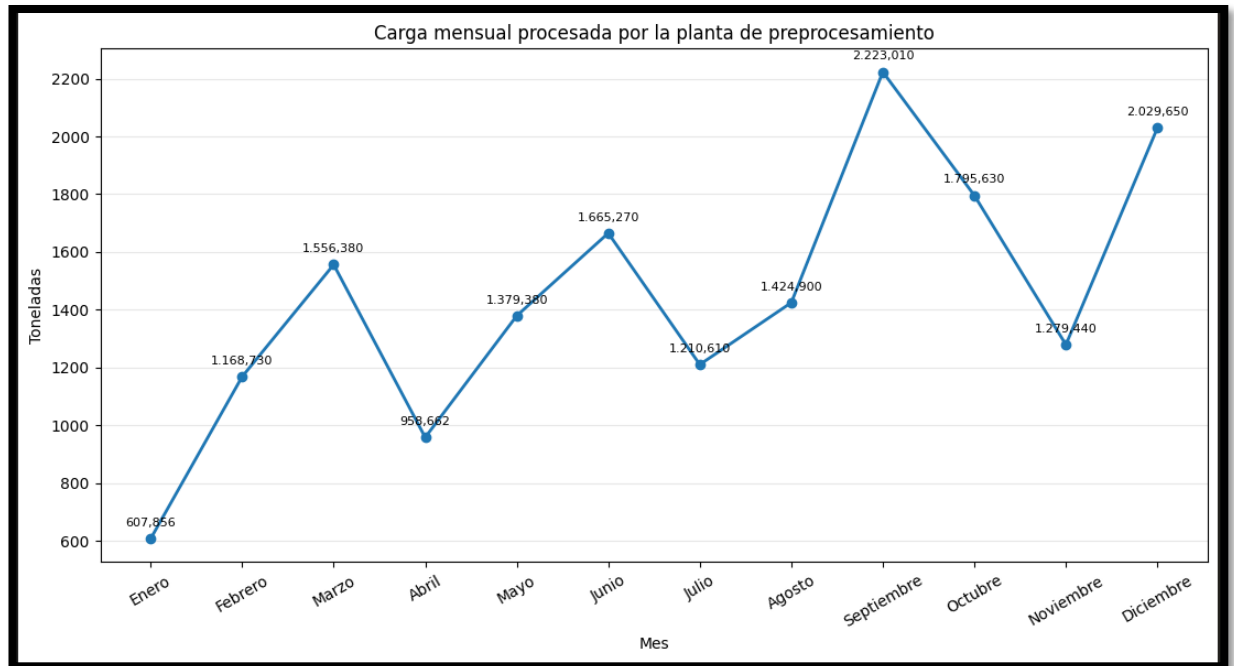


Figura 12. Carga mensual procesada por la planta de preprocesamiento.

En enero, la baja cantidad de residuos procesados se debió al inicio de operaciones y a la primera etapa de acoplamiento en la logística de carga, transporte y coordinación general de la planta. En abril, la disminución estuvo directamente relacionada con la parada programada del horno de cemento de Holcim para mantenimiento preventivo, lo que interrumpió temporalmente la recepción de material y obligó a detener el procesamiento durante varios días consecutivos (ver Anexo 3).

Durante los meses de invierno, la operación estuvo más expuesta a una mayor humedad en el residuo, lo que incidió en su manipulación, en la regularidad del proceso y en la estabilidad general de la planta. En contraste, durante el período seco la operación presentó mayor estabilidad y un comportamiento más homogéneo.

La revisión anual permite distinguir dos etapas dentro del año analizado. La primera corresponde al arranque operativo y a la época lluviosa, con menor regularidad en el procesamiento y mayores diferencias de trazabilidad. La segunda, sobre todo desde julio, muestra una operación más estable, con mejor regularidad operativa y mayor consistencia entre salida de planta y recepción final.

4.4. Capacidad instalada vs. capacidad utilizada

El análisis de la capacidad instalada frente a la capacidad utilizada permite identificar si el rendimiento de la planta coincidió con la capacidad nominal instalada reportada por el sistema.

Tabla 4. Relación entre material procesado, aprovechamiento y tiempo efectivo de operación durante 2025.

Mes	Toneladas procesadas	Aprovechamiento (t)	Aprovechamiento (%)	Tiempo de operación (h)
Enero	608	146	24	22,06
Febrero	1.169	300	27	30,13
Marzo	1.556	567	38	38,50
Abril	974	320	36	23,24
Mayo	1.364	546	41	43,19
Junio	1.665	691	42	52,22
Julio	1.211	589	49	31,58
Agosto	1.425	647	45	33,55
Septiembre	2.223	914	41	56,44
Octubre	1.796	813	45	42,63
Noviembre	1.310	603	46	30,54
Diciembre	2.030	902	44	48,77
Total año	17.330	7.037	41	452,85

Fuente: Elaboración propia con base en el consolidado anual de toneladas procesadas, aprovechamiento, tiempo efectivo de operación y análisis de calidad del residuo.

Durante 2025 la planta procesó 17.330 t de residuos en 452,85 horas efectivas reales de funcionamiento, entendidas como el número exacto de horas en las que la planta estuvo encendida. El procesamiento promedio anual calculado fue de 38,27 t/h, valor que resulta aproximadamente el 27,6 % superior a la capacidad nominal referencial de 30 t/h. Esta diferencia responde a una relación anual consolidada pero no refleja por sí sola el comportamiento operativo del sistema en cada condición de trabajo.

En la práctica, la operación observada en campo muestra que la planta tarda normalmente alrededor de 2 horas en procesar entre 55 y 60 t de residuo para llenar una bañera, lo que equivale a un rendimiento efectivo de aproximadamente 27,5 a 30,0 t/h por ciclo. Sin embargo, también se registraron jornadas en las que esa misma carga pudo procesarse en aproximadamente 1,5 horas, lo que equivale a un rango de 36,7 a 40,0 t/h.

La diferencia entre la capacidad nominal y los rendimientos observados puede explicarse, en buena parte, por la naturaleza del residuo procesado. Cuando el material presenta alta humedad o elevado contenido orgánico, la velocidad de alimentación al Terminator (o abre bolsas) debe reducirse de manera considerable para evitar atascos, acumulación de materia en los componentes de la planta, es decir, afectaciones a la continuidad operativa en general.

En esas condiciones, el procesamiento por hora disminuye, aunque la planta permanezca encendida. En cambio, durante períodos más secos, cuando el residuo llega con menor humedad y mejor comportamiento físico, la alimentación puede sostenerse a mayor ritmo y el rendimiento horario puede incluso superar el valor nominal de referencia.

La información mensual confirma esa variabilidad. Los mayores tiempos efectivos de operación se registraron en septiembre (56,44 h) y junio (52,22 h), mientras que los menores correspondieron a enero (22,06 h) y abril (23,24 h). A su vez, el material procesado osciló entre 608 t en enero y 2.223 t en septiembre. Febrero (45,28%), marzo (36,79%) y abril (35,54%), que muestran la mayor humedad, tienen los porcentajes de utilización más bajos (reducción en la tasa de alimentación) (ver Gráfico 6).

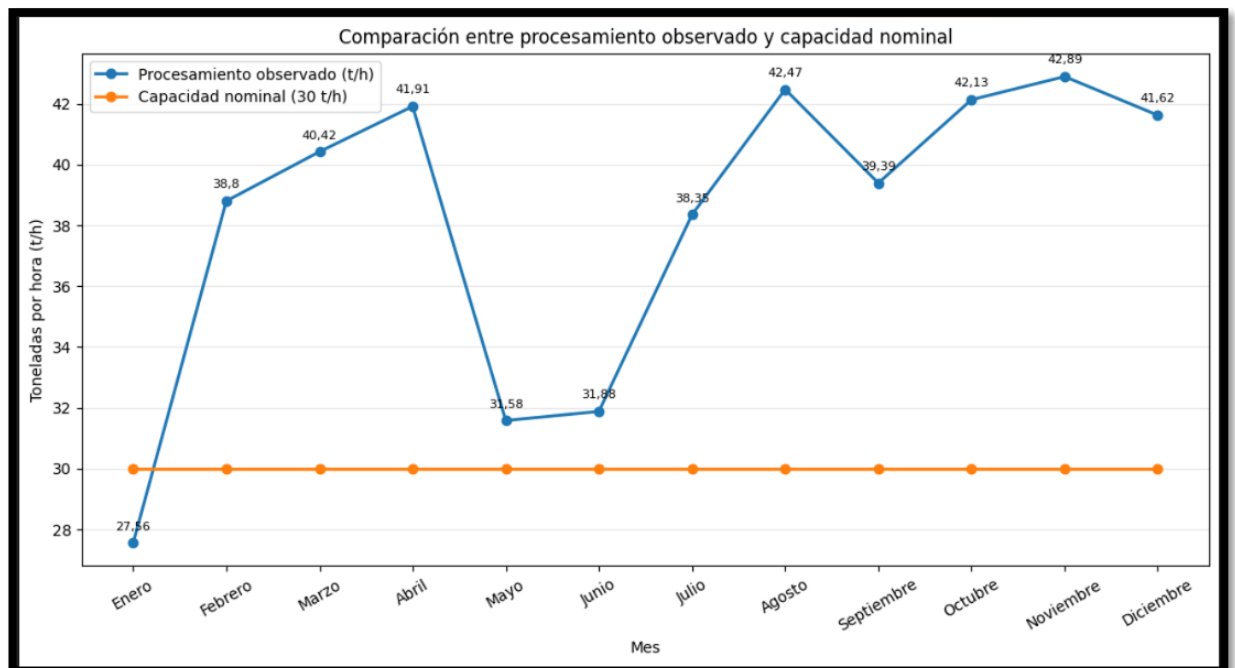


Figura 13. Comparación entre procesamiento observado y capacidad nominal.

4.5. Trazabilidad: comparación entre salida teórica y recepción en Holcim

La comparación entre la producción de la planta y la recepción reportada por Geocycle/Holcim permitió evaluar la consistencia del flujo recuperable durante el período de estudio. Para 2025, la planta generó una producción total de 7.213,267 toneladas, mientras que lo recibido en Holcim fue de 7.036,742 toneladas, lo que representa una diferencia de 176,525 t, equivalente al 2,45 % del total despachado (ver Tabla 4 y Anexo 1). En general, este resultado muestra una concordancia aceptable entre el material que salió de la planta y el recibido para coprocesamiento.

A nivel mensual, la trazabilidad no presentó un comportamiento uniforme. Los mayores desfases negativos se registraron en febrero (-61,500 t; -17,0 %), marzo (-49,270 t; -8,0 %), abril (-59,840 t; -15,8 %) y mayo (-35,900 t; -6,2 %). En contraste, durante el segundo semestre el comportamiento fue más estable y, en varios meses, la diferencia resultó

ligeramente positiva, como ocurrió en julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre (ver Tabla 4, Gráfico 5 y Anexo 1). Esta evolución muestra que la trazabilidad mejoró conforme la operación alcanzó mayor regularidad.

La revisión semanal refuerza esa misma tendencia. Durante las primeras semanas del año predominan diferencias negativas entre salida y recepción, con valores particularmente altos en las semanas 4 (-19 %), 7 (-22 %) y 16 (-26 %). Posteriormente, desde la transición hacia el período seco, las diferencias se reducen y en buena parte de las semanas se mantienen cercanas a cero o ligeramente positivas, lo que evidencia una mayor consistencia del material valorizable despachado hacia Holcim (ver Gráfico 5 y Anexo 2).

Los registros diarios ayudan a interpretar estas variaciones. En febrero se reportó una falla eléctrica general; en marzo constan los efectos del feriado de Carnaval y sus jornadas de recuperación; en abril se registró una paralización programada; y en otros períodos se observan eventos como mantenimiento, falta de transporte de Geocycle y ajustes de operación por cercanía a la meta contractual. Estos antecedentes permiten entender que la diferencia entre salida y recepción respondió a condiciones reales de operación del sistema (ver Anexo 3).

Tabla 5. Comparación mensual entre salida de planta y dato Geocycle.

Mes	Salida (t)	Dato Geocycle (t)	Diferencia (t)	Diferencia (%)
Enero	143,546	145,660	2,114	1,5
Febrero	361,820	300,320	-61,500	-17,0
Marzo	615,870	566,600	-49,270	-8,0
Abril	379,762	319,922	-59,840	-15,8
Mayo	581,660	545,760	-35,900	-6,2
Junio	695,420	690,770	-4,650	-0,7
Julio	586,520	588,560	2,040	0,3
Agosto	639,450	647,120	7,670	1,2
Septiembre	907,060	914,280	7,220	0,8
Octubre	803,379	812,750	9,371	1,2
Noviembre	600,110	602,670	2,560	0,4
Diciembre	898,670	902,330	3,660	0,4

Total	7.213,267	7.036,742	-176,525	-2,45
--------------	------------------	------------------	-----------------	--------------

Fuente: Elaboración propia con base en el resumen mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

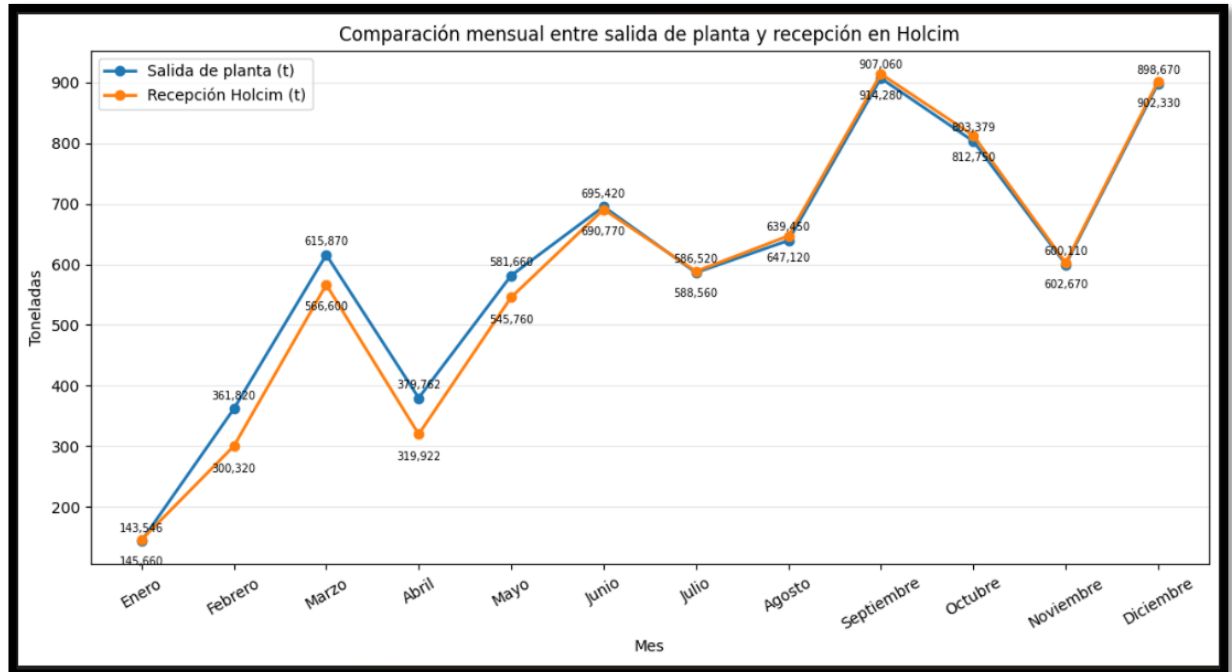


Figura 14. Comparación mensual entre salida de planta y recepción en Holcim durante 2025.

4.6. Densidad aparente del rechazo y comportamiento físico del material procesado

La densidad aparente del material procesado es un indicador que se usa para poder interpretar su comportamiento físico dentro del relleno sanitario, ya que muestra la capacidad de asentamiento y ocupación volumétrica. Para este análisis se utilizaron tres procedimientos: determinación indirecta de densidad mediante análisis de carga de material en volquetas, medición mediante sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG y muestreo directo de campo sobre una submuestra de rechazo de planta.

La determinación indirecta de densidad mediante análisis de carga de material en volquetas se obtuvo a partir de la relación entre el tonelaje neto movilizado y el volumen geométrico de las tolvas empleadas a lo largo del año de operación. Las densidades promedio anuales de este material se ubicaron entre 0,428 t/m³ y 0,528 t/m³, mientras que a escala mensual los valores estuvieron entre las 0,323 t/m³ y 0,616 t/m³. Esta variación muestra que la densidad del material transportado no fue uniforme durante el año y estuvo influida por las condiciones operativas de cada mes (ver Anexo 4).

El segundo procedimiento correspondió al sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG, utilizado para comparar residuos en diferentes estados. Este método mostró valores claramente diferenciados. La basura nueva, entendida como el residuo recién

dispuesto y descargado directamente de los vehículos recolectores, presentó densidades promedio de 0,42 t/m³ en invierno y 0,38 t/m³ en verano. La basura antigua, es decir, residuos ubicados en celdas ya terminadas, alcanzó 0,75 t/m³ en invierno y 0,70 t/m³ en verano. En el caso del rechazo de planta, la densidad promedio fue de 0,69 t/m³ en invierno y 0,65 t/m³ en verano (ver Anexo 5).

La tercera aproximación fue el muestreo directo de una submuestra de rechazo. En este caso se utilizó un recipiente cilíndrico con diámetro interno de 0,310 m, una altura compactada de muestra de 0,225 m y un volumen ocupado de 0,01698 m³. Con un peso neto adoptado de 5,10 kg, la densidad aparente calculada del rechazo fue de 300,31 kg/m³, equivalente a 0,300 t/m³ (ver Anexo 6). La caracterización gravimétrica de esa misma submuestra mostró una composición heterogénea, con predominio de orgánico (27,77 %), seguido de fundas (15,20 %), papel (14,26 %), cartón (13,32 %), plástico (10,69 %), tela (9,76 %) y látex (9,01 %) (ver Anexo 6).

Como referencia complementaria, el consolidado de caracterización de campo reporta una densidad ponderada domiciliaria de 122,34 kg/m³ y una densidad ponderada no domiciliaria de 258,34 kg/m³ (ver Anexo 7). Estos valores son inferiores a la densidad operativa observada para el rechazo mediante excavadora, lo que confirma que la densidad del residuo depende no solo de su composición, sino también del grado de manipulación, trituración, carga y acomodo mecánico al que ha sido sometido.

La comparación entre métodos permite distinguir dos escalas de análisis. Por un lado, el muestreo de campo y la caracterización gravimétrica permiten entender la composición y el comportamiento físico del material a pequeña escala. Por otro lado, el sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG y la determinación indirecta de densidad mediante análisis de carga de material en volquetas representan de mejor manera la densidad del material bajo condiciones reales de operación, es decir, cuando ya ha sido manipulado, cargado, transportado y acomodado.

Las densidades obtenidas por excavadora para el rechazo de planta y la basura antigua se ubican por encima de los valores de campo y de la basura nueva, mientras que las densidades determinadas indirectamente mediante volquetas ocupan una posición intermedia. Esta distribución muestra que los residuos procesados (rechazo) exhiben un comportamiento físico diferente al de los residuos frescos (ver Tabla 7 y Gráfico 7).

Tabla 6. Comparación de densidades obtenidas por distintos métodos.

Método	Material evaluado	Resultado principal
Determinación indirecta mediante análisis de carga de material en volquetas	Material movilizado en operación	0,428 a 0,528 t/m ³ promedio anual

Método	Material evaluado	Resultado principal
Sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG	Basura nueva	0,42 t/m ³ en invierno; 0,38 t/m ³ en verano
Sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG	Rechazo de planta	0,69 t/m ³ en invierno; 0,65 t/m ³ en verano
Sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG	Basura antigua	0,75 t/m ³ en invierno; 0,70 t/m ³ en verano
Muestreo de campo	Submuestra de rechazo de planta	300,31 kg/m ³
Campo ponderado	Residuo domiciliario caracterizado	122,34 kg/m ³
Campo ponderado	Residuo no domiciliario caracterizado	258,34 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia con base en Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6 y Anexo 7.

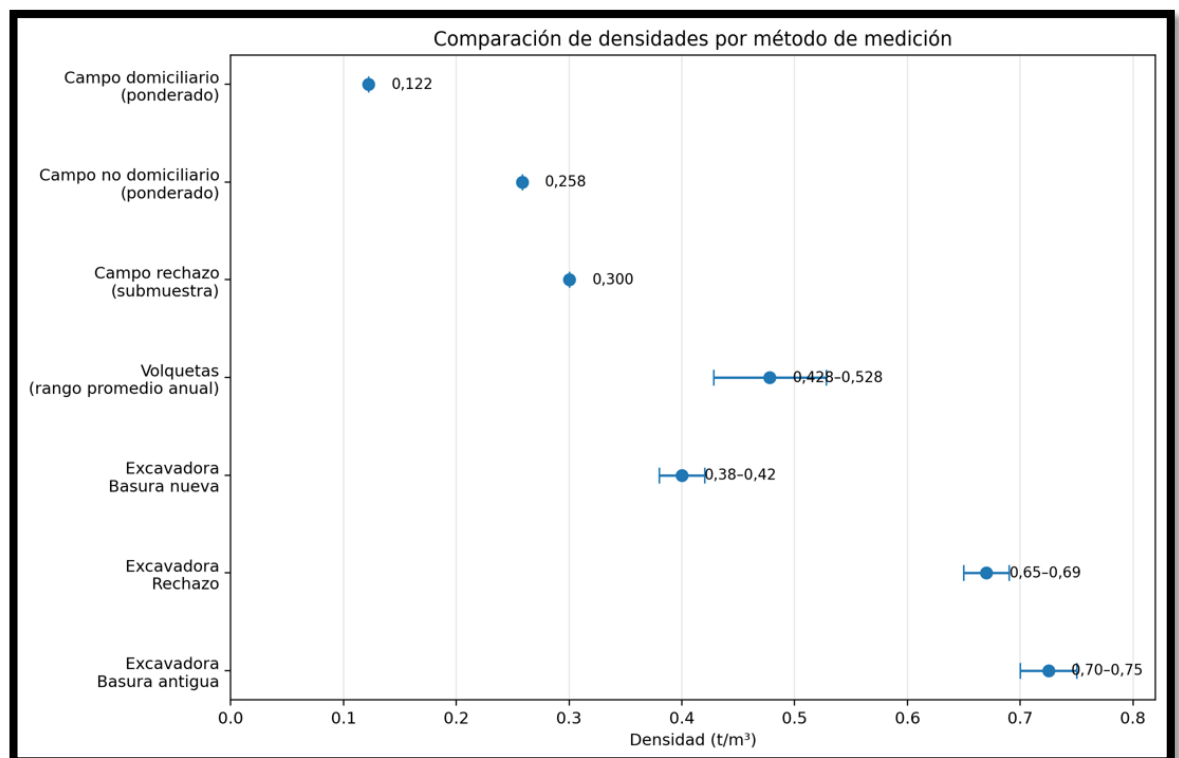


Figura 15. Comparación de densidades por método de medición.

4.7. Beneficios económicos

El beneficio económico cuantificado en este estudio se evaluó como un costo evitado en términos de dos factores: la masa de residuos que se evitó que ingresara a la disposición final

al ser enviada para coprocesamiento, y la reducción en el volumen requerido para la disposición del rechazo (mayor densidad en comparación con los residuos frescos).

Para el primer componente, se tomó la recepción efectiva reportada por Geocycle/Holcim durante el período de estudio, 7.036,742 toneladas. Con un costo referencial de disposición final de 20 USD/tonelada, el material efectivamente desviado al relleno representó un costo evitado de 140.734,84 USD durante 2025. Este valor expresa económicamente el efecto directo de la reducción en la masa enviada a disposición final.

El otro factor es el ahorro a través de la reducción del volumen de residuos, específicamente del material rechazado por la planta. Esto fue de 10.086,251 toneladas en 2025. Los datos recopilados utilizando el sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG demostraron que la densidad promedio de la basura recién dispuesta era de 0,40 t/m³, mientras que los residuos de la planta tenían una densidad de 0,67 t/m³. Si esas 10.086,251 toneladas hubieran estado en el relleno en las mismas condiciones que la nueva basura, habrían ocupado aproximadamente 25.215,63 m³; sin embargo, cuando se devuelven como residuos procesados, su ocupación estimada se reduce a 15.054,11 m³. La diferencia entre ambos escenarios equivale a un ahorro aproximado de 10.161,52 m³ de volumen.

Si se adopta como referencia un costo de 8 USD/m³ de celda construida u operada, el ahorro económico asociado a ese menor requerimiento de volumen asciende a 81.292,16 USD. Este valor no representa un ingreso directo, sino un costo evitado vinculado al uso más eficiente del espacio disponible en el relleno sanitario, producto de la mayor densidad del rechazo frente al residuo fresco.

Bajo estos dos componentes, el beneficio económico estimado del sistema durante 2025 alcanza un valor aproximado de 222.027,00 USD, integrado por 140.734,84 USD por disposición final evitada y 81.292,16 USD por ahorro de volumen. Esta estimación se sustenta en información operativa disponible y en supuestos económicos de referencia obtenidos para el análisis, por lo que debe interpretarse como una aproximación técnica del beneficio económico directo del sistema, y no como una evaluación financiera integral de la planta.

El valor anual asociado a la operación del relleno sanitario considerado para el análisis fue de aproximadamente 839.500 USD. En ese marco, el beneficio económico estimado del sistema representa una fracción relevante del costo anual de operación del sitio, al reducir tanto la masa destinada a disposición final como el volumen efectivamente requerido para su manejo.

Tabla 7. Estimación del beneficio económico por costo evitado.

Concepto	Valor
Material efectivamente recibido en Geocycle/Holcim (t)	7.036,742
Costo referencial de disposición final (USD/t)	20,00

Costo evitado por disposición final (USD)	140.734,84
Rechazo generado por la planta (t)	10.086,251
Densidad promedio de basura nueva (t/m ³)	0,40
Densidad promedio del rechazo (t/m ³)	0,67
Volumen estimado si el rechazo tuviera densidad de basura nueva (m ³)	25.215,63
Volumen estimado del rechazo procesado (m ³)	15.054,11
Ahorro estimado de volumen (m ³)	10.161,52
Costo referencial de celda construida/operada (USD/m ³)	8,00
Costo evitado por ahorro de volumen (USD)	81.292,16
Beneficio económico estimado total (USD)	222.027,00

Fuente: Elaboración propia con base en la recepción efectiva de material reportada por Geocycle/Holcim, en la generación anual de rechazo, en las densidades obtenidas mediante excavadora y en los supuestos económicos definidos para la investigación.

4.8. Beneficios ambientales

4.8.1. Reducción de residuos a disposición final y efecto sobre el relleno sanitario

Durante el año 2025, la planta registró una salida de 7.213,267 t, de las cuales 7.036,742 t fueron recibidas por Holcim para coprocesamiento. Esto confirma que el sistema logró evitar una fracción significativa de residuo que habría sido destinada a disposición final dentro del relleno sanitario (Tabla 5 y Anexo 1).

4.8.2. Estimación de emisiones evitadas según la metodología definida

La estimación de emisiones evitadas se realizó en base a los certificados de coprocesamiento emitidos por Geocycle/Holcim, en los que se reporta tanto el peso recibido desde planta como las emisiones de CO₂eq evitadas. La revisión de los certificados mostró que el factor aplicado por Geocycle se mantuvo constante, siendo de 1.184,68 kg CO₂eq/ton de residuo recibido. Dentro de la información recibida se evidenció ausencia o inconsistencia en los meses de enero y marzo, por lo que se completó mediante la aplicación de ese factor promedio y multiplicado por las toneladas reportadas en el consolidado mensual del operador.

Con este criterio, la valorización efectivamente recibida en Holcim durante 2025 generó una estimación total de 8.330,94 t CO₂eq evitados (ver Tabla 5). Este resultado confirma que el sistema redujo el material enviado a disposición final y produjo un beneficio ambiental medible en términos de mitigación de emisiones.

Tabla 8. Resumen del material valorizado y emisiones de CO₂eq evitadas durante 2025.

Mes	Recepción Holcim (t)	CO ₂ eq evitado (kg)	Observaciones
Enero	145,660	172.560,21	Estimado con factor promedio; no consta certificado.
Febrero	300,400	355.878,87	Certificado GEO-GADSBO-2025-002
Marzo	566,600	671.238,59	Estimado con factor promedio; no consta certificado visible en esta conversación
Abril	319,900	378.980,20	Certificado GEO-GADSBO-2025-004
Mayo	545,800	646.600,16	Certificado GEO-GADSBO-2025-005
Junio	691,000	818.580,62	Certificado GEO-GADSBO-2025-006
Julio	560,180	663.635,89	Certificado GEO-GADSBO-2025-007
Agosto	670,670	794.533,92	Certificado GEO-GADSBO-2025-008
Septiembre	914,280	1.083.132,25	Certificado GEO-GADSBO-2025-009
Octubre	812,750	962.851,35	Certificado GEO-GADSBO-2025-010
Noviembre	602,670	713.973,08	Certificado GEO-GADSBO-2025-0011
Diciembre	902,330	1.068.975,28	Certificado GEO-GADSBO-2025-0012
Total	7.032,240	8.330.940,41	Certificados disponibles + estimación en meses sin certificado recibido.

Fuente: Elaboración propia con base en certificados de coprocesamiento Geocycle/Holcim y en el resumen mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

4.9. Replicabilidad del modelo en otros cantones

La experiencia de Samborondón ilustra cómo el modelo de preprocesamiento de residuos con salida a coprocesamiento es replicable en otros cantones con condiciones técnicas, operativas, logísticas e institucionales mínimas. La replicabilidad del modelo depende no solo de la instalación de una planta con características similares, sino de contar con un sistema integrado que permita sostener el flujo de material, su acondicionamiento y su recepción final dentro de una cadena operativa continua.

Desde el punto de vista técnico, la primera condición para replicar el modelo es la existencia de una masa suficiente de residuos que justifique la operación del sistema. En cantones con volúmenes muy bajos de generación, la instalación de una planta de este tipo podría resultar sobredimensionada o económicamente poco eficiente. En cambio, en territorios con una

generación diaria capaz de sostener una alimentación regular, el modelo puede constituir una alternativa real para reducir los residuos que van a disposición final.

Una segunda condición es la caracterización del residuo. La experiencia de Samborondón muestra que el comportamiento del sistema está directamente influido por la composición del material de entrada, especialmente por su humedad, contenido orgánico y variabilidad estacional. Por ello, antes de replicar el modelo en otro cantón, resulta necesario conocer con suficiente precisión la calidad del residuo disponible, su comportamiento físico y la proporción probable de material apto para valorización. Sin esta base, la expectativa de desempeño de la planta podría sobredimensionarse.

También es indispensable contar con una salida técnicamente viable para el material recuperado. En el caso analizado, el coprocesamiento con Geocycle/Holcim permitió dar continuidad al sistema y convertir la valorización en una alternativa real de gestión. En otros cantones, la replicabilidad del modelo requeriría asegurar previamente un destino final para la fracción aprovechable, ya sea mediante coprocesamiento u otro mecanismo de valorización que garantice recepción estable, trazabilidad y cumplimiento de especificaciones técnicas.

A ello se suma un factor logístico clave: la distancia entre la planta de preprocesamiento y la cementera receptora. En el caso de Samborondón, la viabilidad del modelo también estuvo asociada a que el material valorizable pudo ser movilizado hasta la planta de Holcim dentro de una lógica operativa asumida por Geocycle. En otros cantones, cuando la distancia hacia la cementera sea considerable, los costos logísticos pueden incrementarse de manera importante. Si ese sobrecosto no es asumido por el gestor receptor o por el propio cantón, el modelo puede dejar de ser económicamente viable e incluso ser descartado para este tipo de proyectos. Por tanto, la cercanía o la factibilidad real de transporte hacia el punto de valorización constituye una condición determinante para la replicabilidad.

Desde el punto de vista logístico, el modelo exige coordinación entre recuperación del residuo, alimentación de la planta, carga del material valorizable, retiro del rechazo y transporte a las celdas correspondientes. Esto quiere decir que su réplica no depende únicamente del equipo principal, sino de la disponibilidad de maquinaria auxiliar, volquetas, personal operativo, organización del frente de trabajo y capacidad de respuesta ante paradas o restricciones temporales.

Otro punto importante es la estabilidad institucional y contractual. La operación observada en Samborondón demuestra que un sistema de este tipo requiere continuidad en la gestión, claridad en la responsabilidad operativa y articulación entre el operador del relleno, el gestor del material valorizable y la entidad municipal. En cantones donde no exista esa articulación,

la planta podría operar de forma intermitente o sin lograr consolidar un flujo estable de material recuperado.

La replicabilidad también debe tomar en cuenta las condiciones físicas del sitio de disposición final. La experiencia analizada muestra que el preprocesamiento no solo incide en la valorización de una parte del residuo, sino también en el comportamiento del rechazo que retorna al relleno. En este contexto, el caso de Samborondón puede entenderse como una referencia aplicable principalmente a cantones que cuenten con generación suficiente de residuos, disposición final controlada, maquinaria de apoyo, posibilidad de caracterizar el material, condiciones logísticas adecuadas y un destino asegurado para la fracción valorizable.

En consecuencia, la replicabilidad del sistema no debe plantearse como una copia exacta de la experiencia de Samborondón, sino como un modelo transferible bajo condiciones equivalentes de infraestructura, operación, logística, control de calidad del residuo, viabilidad de transporte y articulación institucional.

5. CONCLUSIONES

Durante 2025, la planta procesó 17.299,52 toneladas de residuos, con una producción de residuos valorizables de 7.213,27 toneladas, pesadas en sitio, y una recepción efectiva en Geocycle/Holcim por 7.036,74 toneladas, alcanzando un rendimiento global del 40,6 %.

La capacidad nominal instalada de la planta es 30 t/h mientras que su promedio anual registrado fue de 38,27 t/h. En campo se observaron ciclos operativos entre 27,5 y 30,0 t/h y entre 36,7 y 40,0 t/h. Esto confirma que el rendimiento del sistema fue variable y estuvo influenciado por factores operativos reales.

La trazabilidad entre la producción de la planta y la recepción de Holcim mostró una consistencia aceptable, con una diferencia acumulada de 176,53 t, equivalente al 2,45 % del total despachado. Por tanto, se concluye que incluso dentro de los registros certificados existen pequeñas variaciones entre documentos consolidados.

El análisis de densidad indicó que el rechazo presenta un comportamiento físico diferente al de los residuos frescos por tener mayor densidad aparente. Los residuos frescos registraron densidades promedio de 0,42 t/m³ en invierno y 0,38 t/m³ en verano, mientras que los residuos de la planta alcanzaron 0,69 t/m³ en invierno y 0,65 t/m³ en verano. Por tanto, se puede afirmar que el rechazo ocupa aproximadamente un 40 % menos de volumen en una celda del relleno sanitario en comparación con el residuo fresco.

La planta de preprocesamiento generó beneficios económicos y ambientales cuantificables. La recuperación efectiva de 7.036,742 t representó un costo evitado de USD 140.734,84 para disposición final, mientras que el material de rechazo permitió un ahorro volumétrico estimado de 10.161,52 m³ y un costo adicional evitado de USD 81.292,16, para un total aproximado de USD 222.027,00 en 2025. En el componente ambiental, se evitaron aproximadamente 8.330,94 t de CO₂eq. Es importante mencionar que la disminución de residuos destinados a disposición final alivia la carga sobre el relleno sanitario y permite reducir costos operativos y contractuales.

La experiencia de Samborondón demuestra que este modelo es replicable, aunque no como una réplica exacta. Su viabilidad depende de contar con un volumen suficiente de residuos, una caracterización adecuada del material, una logística operativa eficiente, una disposición final controlada, y maquinaria de apoyo. Esta replicabilidad no debe entenderse como una posibilidad vinculada exclusivamente a Geocycle/Holcim, ya que existen otras iniciativas de valorización, como proyectos de pirólisis y aprovechamiento de biogás, cuya aplicación también dependerá de la capacidad institucional y técnica de cada cantón para atraer y consolidar este tipo de proyectos.

6. RECOMENDACIONES

Es recomendable mejorar el sistema documental para todos los actores involucrados en el preprocesamiento. Aunque la diferencia global observada entre el material que salió de la planta y el recibido en Holcim fue mínima y aceptable, el análisis mensual reflejó diferencias considerables que deben quedar técnicamente justificadas por cualquier factor que influya en el mismo, principalmente en la época lluviosa y en los eventos imprevistos.

Conviene establecer controles periódicos de humedad y caracterización de los residuos en sus diferentes etapas: recién dispuesto, rechazo y valorizable. Esto permitirá anticipar ajustes operativos y reducir variaciones en el desempeño del sistema.

También es importante mantener los filtros previos y el control de impropios tanto en plataforma del relleno sanitario como en el punto de descarga y alimentación de la planta, ya que por la aplicación de esta metodología se logró un funcionamiento más regular y eficiencia operativa.

Se recomienda adoptar un sistema formal y unificado de indicadores operativos para la planta que incluya, al menos, toneladas alimentadas, toneladas de rechazo, tasa de valorización, tasa de rechazo, horas efectivas de operación y diferencias de trazabilidad y densidad de rechazo. Esto permitirá dar un seguimiento al desempeño de la planta bajo un mismo criterio que permita la toma de decisiones anticipadas y respaldadas técnicamente para mejorar el proceso y su rendimiento.

Es importante profundizar en el estudio del material de rechazo para establecer su comportamiento, compactación y estabilidad a mediano plazo. De igual manera, se recomienda evaluar en futuros estudios la viabilidad de procesar masivamente los residuos previamente enterrados bajo el concepto de landfill mining, con el fin de analizar su potencial de valorización.

Para las entidades públicas interesadas en replicar este modelo, es necesario desarrollar previamente los estudios necesarios para determinar su viabilidad. Estos estudios deben incluir, como mínimo, la variación estacional de la región y la caracterización técnica del residuo generado en su territorio considerando composición, contenido de humedad y cantidad de material valorizable. Además, como información clave, debe incluir la evaluación de factibilidad logística y económica de transporte hacia el punto de valorización.

Finalmente, conviene fortalecer la articulación entre el operador del relleno sanitario, el gestor del material valorizable y el GAD municipal, ya que la experiencia del primer año de operación evidenció que esta coordinación fue determinante para estabilizar el sistema, sostener la operación y facilitar futuras mejoras de desempeño y nuevos proyectos de valorización. De igual manera, la replicabilidad del modelo no debe analizarse únicamente en función de la relación con Geocycle/Holcim, sino dentro de una estrategia más amplia de atracción de iniciativas de valorización, como proyectos de pirólisis, aprovechamiento de biogás u otros esquemas técnicamente viables para cada territorio.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baidya, R., Ghosh, S. K., & Parlikar, U. V. (2016). Co-processing of industrial waste in cement kiln – a robust system for material and energy recovery. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.041>
- Caterpillar. (s. f.-a). *320 hydraulic excavator*. Cat. Recuperado el 4 de abril de 2026, de https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/126532.html
- Caterpillar. (s. f.-b). *Cat Payload for excavators*. Cat. Recuperado el 4 de abril de 2026, de https://www.cat.com/en_US/products/new/technology/payload/payload/15969808.html
- EMAC EP. (s. f.). *Coprocesamiento de residuos inorgánicos no reciclables*. <https://emac.gob.ec/coprocesamiento-de-residuos-inorganicos-no-reciclables/>
- European Parliament and the Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. *Official Journal of the European Union*, L 312, 3–30.
- Geocycle. (2023). *Información técnica: Estación de Clasificación Geocycle - Samborondón* (Oficio Nro. GEO-072-23).
- GIZ-LafargeHolcim. (2020). *Guidelines on Pre- and Co-processing of Waste in Cement Production: Use of waste as alternative fuel and raw material*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y Holcim Technology Ltd.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). *Estimaciones y proyecciones de población de Ecuador, revisión 2024*. INEC.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2012). *Boletín mensual de predicción estacional climática. Marzo 2012* (Vol. 2, N.º 3). INAMHI.
- Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). Landfill mining: A critical review of two decades of research. *Waste Management*, 32(3), 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). *Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria* (Acuerdo No. 061). Registro Oficial, Edición Especial No. 316.
- Morán, S. (2020, 23 de junio). *Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030*. *Plan V*.

8. ANEXOS



RESUMEN MENSUAL DE OPERACIÓN PLANTA PREPROCESADORA RS SAMBORONDON

MES	CARGA RESIDUO (KG)	REHAZO RESIDUO (KG)	TOTAL SALIDA	DATO GEOCYCLE	DIFERENCIA	DIFERENCIA %	OBS.	RENDIMIENTO
ENERO	607.856	464.310	143.546	145.660	2.114	1,5%	VER DIARIO	23,6%
FEBRERO	1.168.730	806.910	361.820	300.320	-61.500	-17,0%	VER DIARIO	31,0%
MARZO	1.556.380	940.510	615.870	566.600	-49.270	-8,0%	VER DIARIO	39,6%
ABRIL	958.662	578.900	379.762	319.922	-59.840	-15,8%	VER DIARIO	39,6%
MAYO	1.379.380	797.720	581.660	545.760	-35.900	-6,2%	VER DIARIO	42,2%
JUNIO	1.665.270	969.850	695.420	690.770	-4.650	-0,7%	VER DIARIO	41,8%
JULIO	1.210.610	624.090	586.520	588.560	2.040	0,3%	VER DIARIO	48,4%
AGOSTO	1.424.900	785.450	639.450	647.120	7.670	1,2%	VER DIARIO	44,9%
SEPTIEMBRE	2.223.010	1.315.950	907.060	914.280	7.220	0,8%	VER DIARIO	40,8%
OCTUBRE	1.795.630	992.251	803.379	812.750	9.371	1,2%	VER DIARIO	44,7%
NOVIEMBRE	1.279.440	679.330	600.110	602.670	2.560	0,4%	VER DIARIO	46,9%
DICIEMBRE	2.029.650	1.130.980	898.670	902.330	3.660	0,4%	VER DIARIO	44,3%
TOTAL	17.299.518	10.086.251	7.213.267	7.036.742	-176.525	-2,45%	-	40,6%

REVISADO Y APROBADO POR:

ING. SANTIAGO ROMAN M.
DIRECTOR DE PROYECTO
PLANTA PROCESADORA SAMBORONDON

ANEXO 1. Consolidado mensual de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.



RESUMEN SEMANAL DE OPERACIÓN PLANTA PREPROCESADORA RS SAMBORONDON									
MES	SEMANA	CARGA (TON)	ECHAZO (TON)	TOTAL SALIDA RS (TON)	RECEPCION PLANTA HOLCIM (TON)	REFERENCIA TOR	DIFERENCIA EN %	ESTACION CLIMATICA	OBSERVACIONES
ENERO	1	291.460	243.410	48.050	54.470	6.420	13%	INVIERNO	SEMANA DE CALIBRACION DE BALAZA Y LOGÍSTICA DE OPERACION DE PLANTA.
	2	157.216	112.070	45.146	46.180	1.014	2%	INVIERNO	
	3	159.180	108.830	50.350	45.030	-5.320	-11%	INVIERNO	
FEBRERO	4	230.510	188.530	41.980	25.590	-16.390	-39%	INVIERNO	
	5	223.740	172.290	51.450	45.500	-5.950	-12%	INVIERNO	
	6	384.610	254.190	130.420	118.190	-12.230	-9%	INVIERNO	
MARZO	7	389.870	241.900	147.970	115.770	-32.200	-22%	INVIERNO	
	8	232.650	143.370	89.280	78.040	-11.240	-13%	INVIERNO	
	9	385.060	223.160	161.900	155.970	-5.930	-4%	INVIERNO	
ABRIL	10	411.670	261.980	149.690	139.380	-10.310	-7%	INVIERNO	
	11	527.000	312.000	215.000	193.210	-21.790	-10%	INVIERNO	
	12	1	0	1	1	0	0%	INVIERNO	
MAYO	13	1	0	1	1	0	0%	INVIERNO	
	14	325.200	198.200	127.000	111.100	-15.900	-13%	INVIERNO	
	15	410.300	254.900	155.400	136.590	-18.810	-12%	INVIERNO	
JUNIO	16	223.160	125.800	97.360	72.230	-25.130	-26%	INVIERNO	
	17	67.400	39.800	27.600	27.830	30	0%	INVIERNO	
	18	389.080	160.420	138.660	104.230	-34.430	-19%	INVIERNO	
JULIO	19	393.630	219.870	173.860	156.640	-17.220	-10%	VERANO	
	20	228.900	139.220	89.680	80.400	-9.280	-10%	VERANO	
	21	402.170	238.430	163.760	146.040	-17.720	-11%	VERANO	
AGOSTO	22	331.480	198.400	133.080	133.800	720	1%	VERANO	
	23	448.860	287.000	161.860	157.880	-3.980	-2%	VERANO	
	24	551.060	320.130	231.550	240.780	-9.770	-4%	VERANO	
SEPTIEMBRE	25	333.250	174.320	158.930	158.310	-620	-0%	VERANO	
	26	222.550	121.240	101.310	100.940	-370	-0%	VERANO	
	27	221.300	116.330	104.970	107.130	2.160	2%	VERANO	
OCTUBRE	28	332.040	166.040	166.000	168.890	2.890	2%	VERANO	
	29	218.290	109.700	108.590	107.200	-1.390	-1%	VERANO	
	30	216.630	110.780	105.850	104.410	-1.440	-1%	VERANO	
NOVIEMBRE	31	326.780	179.600	147.180	151.500	4.320	3%	VERANO	
	32	221.500	124.510	97.080	100.100	3.020	3%	VERANO	
	33	328.250	171.190	157.060	153.730	-3.330	-2%	VERANO	
DICIEMBRE	34	548.280	310.120	238.130	241.770	3.640	2%	VERANO	
	35	549.840	309.880	239.950	244.070	4.120	2%	VERANO	
	36	556.630	333.800	222.830	224.300	1.470	1%	VERANO	
ENERO	37	335.400	208.930	126.470	124.290	-2.180	-2%	VERANO	
	38	354.560	230.200	124.360	123.590	-770	-1%	VERANO	
	39	226.580	133.130	93.450	94.030	580	1%	VERANO	
FEBRERO	40	0	0	0	0	0	0%	VERANO	NO SE OPERO
	41	224.170	131.380	92.790	94.500	1.710	2%	VERANO	
	42	544.350	299.250	245.100	249.510	4.410	2%	VERANO	
MARZO	43	569.730	314.751	254.979	258.630	3.651	1%	VERANO	
	44	457.380	246.870	210.510	210.130	-380	-0%	VERANO	
	45	307.130	155.760	151.370	151.990	620	0%	VERANO	
ABRIL	46	551.080	299.740	251.340	251.670	330	0%	VERANO	
	47	0	0	0	0	0	0%	VERANO	NO SE OPERO
	48	421.230	223.830	197.400	199.010	1.610	1%	VERANO	
MAYO	49	508.850	288.740	220.110	227.780	7.670	3%	VERANO	
	50	569.490	318.720	250.770	249.180	-1.590	-1%	VERANO	
	51	426.280	240.770	185.990	184.800	-1.190	-1%	VERANO	
JUNIO	52	508.790	261.780	147.010	136.340	-10.670	-7%	INVIERNO	
	53	216.260	121.470	94.790	94.230	-560	-1%	INVIERNO	
	54	1	0	1	1	0	0%	INVIERNO	NO SE OPERO
JULIO	55	227.480	126.650	100.830	96.100,00	-4.730	-5%	INVIERNO	
	56	177.700	98.400	78.300	75.780,00	-2.520	-3%	INVIERNO	
	57	232.800	123.030	109.770	105.970,00	-3.800	-3%	INVIERNO	

REVISADO Y APROBADO POR:

ING. SANTIAGO ROMAN M.
DIRECTOR DE PROYECTO
PLANTA PROCESADORA SAMBORONDON

ANEXO 2. Consolidado semanal de operación de la planta preprocesadora RS Samborondón.

Anexo. Resumen mensual y anual de volquetas principales, pesos, dimensiones y densidades estimadas (2025)

Base elaborada a partir de reportes diarios de pesaje consolidados del operador del relleno sanitario y de la planta de preprocesamiento.

Nota metodológica. La densidad promedio estimada por volqueta y mes se calculó como la relación entre el tonelaje neto total movilizado y el volumen geométrico total de la tolva utilizado en el mismo periodo. Las volquetas de emergencia (PBM9682, TBN792 y GXM215) no se incluyeron en las tablas principales por corresponder a reemplazos ocasionales.

Tabla 1. Resumen mensual por volqueta principal

Mes	Placa	Viajes	Toneladas netas	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen (m³)	Densidad prom. (t/m³)
Enero	BBA2114	139	952,54	4,72	2,32	1,24	13,58	0,505
Febrero	BBA2114	64	416,28	4,72	2,32	1,24	13,58	0,479
Febrero	XBC1941	136	1.142,02	4,72	2,31	1,25	13,63	0,616
Marzo	BBA2114	191	837,93	4,72	2,32	1,24	13,58	0,323
Marzo	EAD973	183	1.022,74	4,73	2,32	1,25	13,72	0,407
Marzo	XBC1941	115	614,39	4,72	2,31	1,25	13,63	0,392
Abril	EAD973	142	1.172,42	4,73	2,32	1,25	13,72	0,602
Abril	XBC1941	46	362,27	4,72	2,31	1,25	13,63	0,610
Mayo	BBA2114	52	367,53	4,72	2,32	1,24	13,58	0,549
Mayo	EAD973	80	565,11	4,73	2,32	1,25	13,72	0,515
Mayo	PBM9682	147	948,36	4,02	2,31	1,23	11,42	0,565
Mayo	PKY0448	39	221,09	4,03	2,31	1,22	11,36	0,499
Junio	PBM9682	334	2.056,17	4,02	2,31	1,23	11,42	0,539
Junio	PKY0448	81	481,47	4,03	2,31	1,22	11,36	0,523
Julio	PBM9682	196	1.066,50	4,02	2,31	1,23	11,42	0,476
Julio	PKY0448	146	772,28	4,03	2,31	1,22	11,36	0,466
Agosto	PBM9682	208	924,39	4,02	2,31	1,23	11,42	0,389
Agosto	PKY0448	234	1.124,32	4,03	2,31	1,22	11,36	0,423
Septiembre	PBM9682	289	1.536,11	4,02	2,31	1,23	11,42	0,465
Septiembre	PKY0448	328	1.644,47	4,03	2,31	1,22	11,36	0,441
Octubre	PBM9682	256	1.195,35	4,02	2,31	1,23	11,42	0,409

Octubre	PKY0448	288	1.413,87	4,03	2,31	1,22	11,36	0,432
Noviembre	PBM9682	198	920,08	4,02	2,31	1,23	11,42	0,407
Noviembre	PKY0448	232	1.107,05	4,03	2,31	1,22	11,36	0,420
Diciembre	PBM9682	195	1.126,65	4,02	2,31	1,23	11,42	0,506
Diciembre	PKY0448	247	1.375,45	4,03	2,31	1,22	11,36	0,490

Tabla 2. Resumen anual por volqueta principal


Placa	Viajes totales	Toneladas netas	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen (m³)	Densidad prom. (t/m³)	Meses con registro
BBA2114	446	2.594,28	4,72	2,32	1,24	13,58	0,428	Enero, Febrero, Marzo, Mayo
EAD973	405	2.760,27	4,73	2,32	1,25	13,72	0,497	Marzo, Abril, Mayo
PBM9682	1823	9.773,61	4,02	2,31	1,23	11,42	0,469	Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre
PKY0448	1595	8.140,01	4,03	2,31	1,22	11,36	0,449	Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre, Diciembre
XBC1941	297	2.138,68	4,72	2,31	1,25	13,63	0,528	Febrero, Marzo, Abril

Fuente: Elaboración propia con base en reportes diarios de pesaje del periodo enero-diciembre 2025 y en las dimensiones internas de las volquetas principales suministradas por el operador.

ANEXO 4. Resumen mensual y anual de volquetas principales, pesos, dimensiones y densidades estimadas (2025).

DENSIDAD DE RESIDUOS EN DIFERENTES ESTADOS CON SISTEMA EXC 320 NG RELLENO SANITARIO CANTON SAMBORONDON					
TIPO	No.	DENSIDAD (t/m ³)	DENSIDAD PROMEDIO (t/m ³)	FECHA	ESTACION
RECHAZO	1	0,72	0,69	29/01/2025	INVIERNO
	2	0,69		27/02/2025	
	3	0,68		27/03/2025	
	4	0,66		22/04/2025	
	5	0,67	0,65	15/05/2025	VERANO
	6	0,65		12/06/2025	
	7	0,64		18/07/2025	
	8	0,64		21/08/2025	
	9	0,63		18/09/2025	
	10	0,65		19/10/2025	
	11	0,66		21/11/2025	
	12	0,64		22/12/2025	
BASURA NUEVA	1	0,43	0,42	29/01/2025	INVIERNO
	2	0,41		27/02/2025	
	3	0,41		27/03/2025	
	4	0,42		22/04/2025	
	5	0,39	0,38	15/05/2025	VERANO
	6	0,37		12/06/2025	
	7	0,39		18/07/2025	
	8	0,38		21/08/2025	
	9	0,37		18/09/2025	
	10	0,37		19/10/2025	
	11	0,38		21/11/2025	
	12	0,38		22/12/2025	
BASURA ANTIGUA	1	0,75	0,75	29/01/2025	INVIERNO
	2	0,73		27/02/2025	
	3	0,77		27/03/2025	
	4	0,75		22/04/2025	
	5	0,70	0,70	15/05/2025	VERANO
	6	0,68		12/06/2025	
	7	0,72		18/07/2025	
	8	0,69		21/08/2025	
	9	0,68		18/09/2025	
	10	0,68		19/10/2025	
	11	0,72		21/11/2025	
	12	0,71		22/12/2025	

Los datos presentados fueron levantados en campo a través del sistema de pesaje a bordo de la excavadora Caterpillar 320 NG, de propiedad de la empresa TRIGOLDEC S.A., lo que permitió registrar de manera directa la masa estimada del material manejado durante la operación.


Ing. Santiago Roman M.
Director de Proyecto
Op. Planta Samborondon

ANEXO 5. Densidad de residuos en diferentes estados con sistema EXC 320 NG, relleno sanitario del cantón Samborondón.

Muestreo de densidad aparente y caracterización del rechazo

El presente anexo resume el muestreo realizado para determinar la densidad aparente del rechazo generado en la operación de la planta de preprocesamiento, así como la composición gravimétrica de la submuestra analizada.

Tabla A1. Datos de campo utilizados para el cálculo de densidad del rechazo

Parámetro	Valor	Unidad / Observación
Diámetro interno del recipiente	0.310	m
Profundidad total del recipiente	0.365	m
Peso del recipiente vacío	0.90	kg
Peso total de muestra recolectada	10.70	kg
Altura compactada de la submuestra	0.225	m
Peso bruto: recipiente + submuestra	6.00	kg
Peso neto de la submuestra	5.10	kg

Cálculo de densidad aparente

Volumen ocupado por la muestra $V = \pi \cdot D^2 / 4 \cdot h$	0.01698 m ³
Masa neta considerada para el cálculo	5.10 kg
Densidad aparente del rechazo $\rho = m/V$	300.31 kg/m ³
Resultado adoptado	300.31 kg/m ³

Tabla A2. Caracterización gravimétrica de la submuestra de rechazo

Tipo de material	Peso (kg)	Participación (%)
Orgánico	1.48	27.77
Plástico	0.57	10.69
Cartón	0.71	13.32
Fundas	0.81	15.20
Látex	0.48	9.01
Papel	0.76	14.26
Tela	0.52	9.76
TOTAL	5.33	100.00

Nota técnica. La suma de la caracterización gravimétrica fue de 5.33 kg, mientras que el peso neto de la submuestra calculado por diferencia entre el peso bruto y el peso del recipiente fue de 5.10 kg. La diferencia registrada (0.23 kg) puede asociarse a redondeos de campo, variaciones de pesaje y manipulación del material durante la separación manual. Para el cálculo de densidad se adoptó el peso neto obtenido a partir del recipiente.

Conclusión. Con base en el volumen ocupado por la submuestra compactada y en el peso neto corregido, la densidad aparente del rechazo se determinó en 300.31 kg/m³.

Anexo consolidado de densidades y composición de campo

Este archivo consolida únicamente la información útil del archivo de caracterización de campo. Se incluyen: composición gravimétrica domiciliaria y no domiciliaria, registros de densidad por muestra. No se presenta aquí una densidad final del rechazo de planta; este anexo sirve como respaldo.

Indicador	Valor
Composición domiciliaria total (kg)	20,06
Composición no domiciliaria total (kg)	62,94
Muestras de densidad domiciliaria	29,00
Muestras de densidad no domiciliaria	15,00
Densidad ponderada domiciliaria (kg/m ³)	122,34
Densidad ponderada no domiciliaria (kg/m ³)	258,34

ANEXO 7. Consolidado de densidades y composición de campo.



**CERTIFICADO DE DESTRUCCIÓN POR COPROCESAMIENTO
DE RESIDUOS DOMICILIARIOS NO PELIGROSOS**

No. GEO-GADSBO-2025-002

Fecha: 20 de Marzo de 2025

Recibí: 300,4 toneladas de residuos sólidos no peligrosos clasificados

MINISTERIO DEL AMBIENTE:

Se extiende la presente como comprobante de que 300,4 toneladas de residuos sólidos no peligrosos clasificados, catalogados como desechos no peligrosos, fueron transportados por la empresa TROREC S.A, a la planta Guayaquil de Holcim Ecuador S.A., ubicada en el Km. 18 de la Vía a la Costa en donde se le dio tratamiento de Co-procesamiento de acuerdo a la Licencia ambiental No. DMA-LA-2006-003 con fecha Abril 18 de 2006, así como también la Resolución de Febrero 2014, otorgada por la Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil e inscrita en el folio del Registro de Fichas y Licencias Ambientales del Ministerio del Ambiente del Ecuador como la Licencia Ambiental No. 010.

Generador

Razón social	Número de Registro	Responsable	Teléfono	Cantidad
Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Samborondón.	No aplica	Lcdo. Edgar Muñoz	099 388 4115	145,7 toneladas

Transportista

Nombre o razón social	GEOCYCLE-ECUADOR S.A.
Numero de Licencia ambiental	N/A
Dirección y teléfono	Km. 18.5 Vía a la Costa
Nombre del conductor	Pablo Delgado

Disposición final

Fecha de recepción:	5, 7, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26 y 27 de febrero del 2025.
Recibido por:	Terencio Quinde
Rigoberto Arias Moncada Técnico de Operaciones Geocycle-Ecuador S.A.	

ANEXO 8. Extracto de consolidado de recepción de material Geocycle/Holcim y emisiones evitadas durante 2025.