

# Rediseño del proceso de compost para la reducción de los tiempos de liberación en la compostera de la PUJ de Cali

Brayan Alberto Portilla Lasso 1<sup>a,c</sup>, Juan Eduardo Salcedo Chamorro 2<sup>a,c</sup>, Juan Sebastián Trujillo Rodríguez 3<sup>a,c</sup>, Juan Pablo Villegas Flórez 4<sup>a,c</sup>

Carlos Alberto Olarte Meneses<sup>b,c</sup>, Pontificia Universidad Javeriana de Cali<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

<sup>d</sup>Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

---

## Resumen en Español

El incremento en la producción de residuos orgánicos en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali plantea un desafío significativo para la infraestructura de compostaje existente. El presente proyecto se propone rediseñar el proceso de producción de compost, con el objetivo de manejar de manera más eficiente y sostenible el aumento previsto de desechos orgánicos. La gestión inadecuada de estos residuos no solo contradice los objetivos ecológicos de la institución, sino que también representa un costo económico adicional y una oportunidad perdida de contribuir al enriquecimiento ambiental del campus.

La relevancia de este proyecto radica en su capacidad para anticipar los desafíos futuros y asegurar la sostenibilidad a largo plazo de las operaciones de compostaje de la universidad. Al mejorar la eficiencia del proceso de compostaje, la universidad puede reducir la dependencia de los vertederos, fomentar prácticas de reciclaje orgánico y crear un modelo replicable para otras entidades interesadas en la gestión de residuos.

Utilizando la metodología Seis Sigma DMADV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar), el equipo del proyecto evaluará el proceso actual y diseñará un sistema de compostaje mejorado. Este sistema integrará controles de variables internas y tecnologías innovadoras para el tratamiento de residuos. Los resultados esperados incluyen un aumento en la eficiencia operativa y una mayor contribución a la sostenibilidad ambiental del campus. El éxito de este proyecto no solo beneficiará a la universidad, sino que también servirá de referencia para prácticas de gestión de residuos sostenibles en la región.

*Palabras claves: compostaje, residuos vegetales, abono orgánico, manejo de residuos, conservación y protección del ambiente.*

---

## Abstract (in English)

The increase in the production of organic waste on the campus of the Pontificia Universidad Javeriana de Cali poses a significant challenge to the existing composting infrastructure. This project aims to redesign the compost production process, with the aim of managing the expected increase in organic waste in a more efficient and sustainable way. The inadequate management of this waste not only contradicts the ecological objectives of the institution, but also represents an additional economic cost and a lost opportunity to contribute to the environmental enrichment of the campus.

The relevance of this project lies in its ability to anticipate future challenges and ensure the long-term sustainability of the university's composting operations. By improving the efficiency of the composting process, the university can reduce dependence on landfills, encourage organic recycling practices, and create a replicable model for other entities interested in waste management.

Using the Six Sigma DMADV (Define, Measure, Analyze, Design, Verify) methodology, the project team will evaluate the current process and design an improved composting system. This system will integrate controls of internal variables and innovative technologies for waste treatment. Expected results include an increase in operational efficiency and a greater contribution to the environmental sustainability of the campus. The success of this project will not only benefit the university, but will also serve as a reference for sustainable waste management practices in the region.

**Keywords:** composting, plant waste, organic fertilizer, waste management, conservation and protection of the environment.

---

## Tabla de Contenido

|  |    |
|--|----|
| <b>I. PROJECT CHARTER</b> .....                                  | 6  |
| <b>II. DEFINIR</b> .....   | 8  |
| A. Contexto y Justificación (¿por qué?).....                     | 8  |
| B. Grupos de interés.....  | 11 |
| C. Requerimientos.....   | 12 |
| 1) Restricciones de diseño (Factibilidad).....                   | 14 |
| 2) Especificaciones de diseño (Características).....             | 14 |
| 3) Leyes, normas y estándares (Buenas prácticas).....            | 14 |
| <b>III. MEDIR</b> .....  | 15 |
| A. Plan de recolección de datos.....                             | 15 |
| B. Exploración del mercado.....                                  | 16 |
| <b>IV. ANALIZAR</b> .....  | 29 |
| A. Análisis de Oportunidad.....                                  | 29 |
| B. Revisión de literatura.....                                   | 31 |
| C. Exploración de ideas y selección de alternativa.....          | 33 |
| D. Objetivos.....  | 35 |
| E. Plan de trabajo (PdT).....                                    | 36 |
| <b>IV. DISEÑAR</b> .....   | 36 |
| a. Desarrollo del diseño de la solución.....                     | 36 |
| b. Validación del diseño propuesto.....                          | 38 |
| <b>VI. VERIFICAR</b> .....                                       | 44 |
| a. Medición de los impactos.....                                 | 44 |
| b. Estandarización de la solución – POE’S (plan de control)..... | 55 |
| c. Conclusiones.....   | 55 |
| d. Recomendaciones.....  | 56 |
| <b>VII. GLOSARIO</b> .....                                       | 57 |
| <b>VIII. REFERENCIAS</b> .....                                   | 58 |
| <b>IX. ANEXOS</b> .....  | 60 |
| <b>I. PROJECT CHARTER</b> .....                                  | 6  |
| <b>II. DEFINIR</b> .....   | 8  |
| A. Contexto y Justificación (¿por qué?).....                     | 8  |
| B. Grupos de interés.....  | 11 |
| C. Requerimientos.....   | 12 |
| 1) Restricciones de diseño (Factibilidad).....                   | 14 |

|  |    |
|--|----|
| 2) Especificaciones de diseño (Características) .....            | 14 |
| 3) Leyes, normas y estándares (Buenas prácticas) .....           | 14 |
| <b>III. MEDIR</b> .....  | 15 |
| A. Plan de recolección de datos .....                            | 15 |
| B. Exploración del mercado .....                                 | 16 |
| <b>IV. ANALIZAR</b> .....  | 29 |
| A. Análisis de Oportunidad .....                                 | 29 |
| B. Revisión de literatura.....                                   | 31 |
| C. Exploración de ideas y selección de alternativa.....          | 33 |
| D. Objetivos.....  | 35 |
| E. Plan de trabajo (PdT).....                                    | 36 |
| <b>IV. DISEÑAR</b> .....   | 36 |
| a. Desarrollo del diseño de la solución.....                     | 36 |
| b. Validación del diseño propuesto .....                         | 38 |
| <b>VI. VERIFICAR</b> .....                                       | 44 |
| a. Medición de los impactos .....                                | 44 |
| b. Estandarización de la solución – POE’S (plan de control)..... | 55 |
| c. Conclusiones .....  | 55 |
| d. Recomendaciones.....  | 56 |
| <b>VII. GLOSARIO</b> .....                                       | 57 |
| <b>VIII. REFERENCIAS</b> .....                                   | 58 |
| <b>IX. ANEXOS</b> .....  | 60 |

## Índice de tablas






|  |    |
|--|----|
| TABLA I. DESCRIPCIÓN DE GRUPO DE INTERÉS.....  | 11 |
| TABLA II. REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS .....  | 13 |
| TABLA III. INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR.....   | 15 |
| TABLA IV. CANTIDAD RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS Y APLICADOS EN LAS 9 COMPOSTERAS DE LA PUJ DE CALI (ACUMULATIVOS) 2022-2023 .....                                | 16 |
| TABLA V. CANTIDAD (KG) DE ENTRADA DE LOS RESIDUOS GENERADOS Y APLICADOS EN LA COMPOSTERAS DE LA CANCHA DE FÚTBOL DE LA PUJ DE CALI (ACUMULATIVOS) 2022-2023..... | 17 |
| TABLA VI. TIEMPOS DE PROCESO DE PRODUCCIÓN EN LA COMPOSTERAS DE LA CANCHA DE FÚTBOL DE LA PUJ DE CALI .....  | 17 |
| TABLA VII. TRANSFORMACIONES BIOLÓGICAS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE COMPOSTAJE [9].....  | 25 |
| TABLA VIII. COMPOSICIÓN DEL COMPOST [10].....  | 26 |
| TABLA IX. VARIABLES INTERNAS Y EXTERNAS DEL COMPOSTAJE [10].....   | 26 |
| TABLA X. RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO.....   | 28 |
| TABLA XI. PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS.....  | 34 |
| TABLA XII. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS POR CRITERIOS.....  | 35 |
| TABLA XIII. EVALUACIÓN FINAL MATRIZ AHP.....   | 35 |
| TABLA XIV. PLAN DE TRABAJO.....  | 36 |
| TABLA XV. PROCESO LIBERACIÓN DEL COMPOST .....   | 39 |
| TABLA XVI. KPI'S DE LAS VARIABLES DESPUES DE LA APLICACIÓN .....   | 44 |
| TABLA XVII. COSTO MANO DE OBRA JARDINEROS MENSUAL.....   | 47 |
| TABLA XVIII. COSTO REAL DE UN JARDINERO .....  | 47 |
| TABLA XIX. COSTO DE MANTENIMIENTO.....   | 48 |
| TABLA XX. COSTO MAQUINARIA Y EQUIPOS.....  | 48 |
| TABLA XXI. TARIFA KWH.....   | 49 |
| TABLA XXII. COSTO ENERGETICO MAQUINAS TRITURADORAS .....   | 50 |
| TABLA XXIII. CALCULO GALON GASOLINA PROMEDIO .....   | 50 |
| TABLA XXIV. CALCULO CONSUMO GASOLINA MENSUAL.....  | 51 |
| TABLA XXV. OTROS COSTOS .....  | 51 |
| TABLA XXVI. ORIGEN COSTOS MANTEINIMIENTO Y CAPACITACIÓN .....  | 51 |
| TABLA XXVII. RESUMEN DE COSTOS.....  | 52 |
| TABLA XXVIII. REDUCCIÓN DE COSTO MANTENIMIENTO .....   | 52 |
| TABLA XXIX. REDUCCIÓN DE COSTO MAQUINARIA Y EQUIPOS .....  | 53 |
| TABLA XXX. COMPARATIVO COSTOS.....   | 53 |
| TABLA XXXI. PROCESO DE PRODUCCION CANCHA DE FUTBOL ACTUAL VS PROPUESTO .....   | 54 |
| TABLA XXXII. DEMANDA DE COMPOST UNIVERSIDAD .....  | 54 |
| TABLA XXXIII. BENEFICIO ECONOMICO DISEÑO .....   | 54 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Localización campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali [2] .....   | 8  |
| Figura 2. Campus Pontificia Universidad Javeriana Cali [3].....   | 9  |
| Figura 3. Estudiantes Pontificia Universidad Javeriana Cali [4] .....   | 9  |
| Figura 4. Comunidad profesoral Pontificia Universidad Javeriana Cali [4] .....  | 10 |
| Figura 5. Procesos de compostaje Pontificia Universidad Javeriana Cali.....   | 10 |
| Figura 6. Matriz Influencia/Impacto.....  | 12 |
| Figura 7. Clasificación de los residuos PUJ [6].....  | 19 |
| Figura 8. Mapa Ambiental de la PUJ Cali [7] .....   | 20 |
| Figura 9. Sistema de compostaje Pontificia Universidad Javeriana Cali .....   | 22 |
| Figura 10. Ubicación de las composteras de la Pontificia Universidad Javeriana Cali .....   | 23 |
| Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de producción de compostaje .....  | 24 |
| Figura 12. Sistema SIPOC para el proceso de producción de compostaje de la compostera de la cancha de fútbol de la PUJ Cali ..... | 27 |
| Figura 13. Diagrama QFD.....  | 30 |
| Figura 14. Plano y mediciones del rediseño de las 3 secciones de la compostera de la cancha de fútbol de la PUJ Cali.....         | 37 |
| Figura 15. Renders sobre la recolección de los residuos para la compostera de la cancha de fútbol .....                           | 40 |
| Figura 16. Renders sobre la alimentación de la compostera de la cancha de fútbol .....  | 41 |
| Figura 17. Renders sobre la alimentación de la compostera de la cancha de fútbol .....  | 41 |
| Figura 18. Plano indicativo sobre la liberación de la compostera de la cancha de fútbol .....                                     | 42 |
| Figura 19. Pilas Mixtas – Modelos de Compostaje a mediana escala por EarthGreen .....   | 56 |

## I. PROJECT CHARTER

| <b>REDISEÑO DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COMPOST EN EL CAMPUS DE LA PUJ DE CALI</b>   |   |  |  |
|---|---|--|--|
| <b>Descripción (Business case)</b>  |   | <b>Oportunidad de mejora (Opportunity for improvement)</b>   |  |
| <p>Como alternativa de disposición de los residuos orgánicos generados en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, las composteras son una tecnología apropiada para el tratamiento de estos residuos. Sin embargo, en un futuro un aumento en la generación dentro del campus de estos residuos representa un riesgo si no es manejado adecuadamente y el manejo operacional de las composteras alcanzará un límite. El presente proyecto tuvo como objetivo desarrollar una propuesta de rediseño del proceso de producción de compost en el campus de la Universidad Javeriana de Cali, en ese sentido se realizó la recopilación de información del proceso de compostaje actual y se hizo un análisis de los datos en cuanto a los tiempos de obtención del compost para evaluar alternativas de mejora para obtener en un menor tiempo de liberación de compost en la compostera.</p> |   | <p>Reducir el tiempo de liberación de producción de compost a través de rediseño de la compostera con el método seleccionado.</p>  |  |
| <b>Impacto de los actores (Stakeholder's business needs)</b>  |   |  |  |
| <b>Grupo de interés</b>   | <b>Restricciones de diseño</b>  | <b>Especificaciones de diseño</b>  | <b>Legislación y requisitos aplicables</b> |
| <b>Equipo de proyecto</b>   | Las soluciones propuestas deben ser viables dentro de los recursos actuales y futuros de la universidad y deben ser adaptadas a las proyecciones de aumento de residuos.  | Diseñar un proceso adecuado que no solo atienda las necesidades actuales, sino que también sea escalable para gestionar un incremento proyectado de residuos en el futuro.   | No aplica                                  |
| <b>Comité de Gestión Ambiental</b>  | Precisión, consistencia y actualización regular de los datos relacionados con el proceso de producción.   | Tratamiento o análisis de la producción del compost teniendo en cuenta la calidad y cantidad de residuos recolectados, incluyendo conchos de café y restos de frutas y vegetales.  | Plan de Gestión Integral de Residuos.      |
| <b>Jardineros</b>   | Proveer capacitación continua y efectiva a todo el personal, incluyendo a los nuevos integrantes, y asegurar que cuenten con las herramientas adecuadas para supervisar y mantener las composteras de manera eficiente. | 100% Calidad<br><br>100% personal capacitado<br><br>Garantizar un compost de alta calidad que cumpla con las necesidades de los jardines y asegurar que todo el personal esté adecuadamente capacitado para manejar un incremento en la generación de residuos y posibles sobrecapacidades en las composteras. | Plan de Gestión Integral de Residuos.      |
| <b>DAGMA</b>  | Garantizar un manejo adecuado y sostenible de los residuos, desde su recolección hasta la producción de compost, considerando el potencial aumento en la generación de estos.   | Garantizar un cumplimiento del 100% de todas las normativas y regulaciones, con sistemas de monitoreo y reporte que permitan verificar y demostrar este cumplimiento.  | Decreto 1713 del 2022                      |
| <b>Objetivo general (Goal statement)</b>  |   |  |  |
| Rediseñar el proceso de producción de compost en el campus de la PUJ de Cali para reducir el tiempo de liberación mediante el uso de herramientas de ingeniería de métodos con secciones controladas dentro de la compostera aumentando su disponibilidad.  |   |  |  |
| <b>Objetivos específicos (Project scope)</b>  |   |  |  |
| <p><b>OE1:</b> Evaluar el desempeño actual del proceso de producción de compostaje.</p> <p><b>OE2:</b> Medir y analizar las variables que intervienen en el proceso para comprender su comportamiento.</p> <p><b>OE3:</b> Diseñar un modelo o métodos de producción que permitan reducir los tiempos del proceso de compostaje.</p> <p><b>OE4:</b> Validar el diseño propuesto para el proceso de compostaje de la PUJ. En caso de que no sea aplicable, se establece herramientas de control para garantizar su implementación.</p>  |   |  |  |

| Plan de Trabajo ( <i>Project Plan</i> )   |                               |  |  |   |                  |
|---|-------------------------------|--|--|---|------------------|
| Objetivo                                  | Área IISE                     | Herramientas de ingeniería industrial                                      | Actividad  | Entregable  | Fecha de entrega |
| OE1                                       | Supply Chain Management       | VOC, Diagrama de Flujo e Histogramas                                       | Recopilación de información sobre el proceso de producción, como tiempos, fases, cantidades y medidas. | Archivo en Excel con los datos recolectados y diagrama de flujo.                      | 15/02/2024       |
| OE2                                       | Engineering Management        | Histogramas, Quality Function Deployment (QFD) o Casa de la Calidad, SIPOC | Identificar las variables del proceso y medirlas a través de cálculos matemáticos                      | Informe de análisis de variables con histogramas, SIPOC y QFD.                        | 20/03/2024       |
| OE3                                       | Work Design and Measurement   | Diseño de experimentos   | Desarrollar el diseño mejorado del proceso de compostaje.  | Diseño funcional del sistema de compostaje  | 20/04/2024       |
| OE4                                       | Engineering Economic Analysis | Análisis de costos y beneficios.   | Desarrollo de estimación de costos y beneficio.  | Análisis financiero de la alternativa   | 20/05/2024       |
|   | Quality Control               | Plan de control  | Desarrollar un plan de seguimiento de los ciclos de la compostera                                      | Plan de seguimiento evaluado del sistema de compostaje                                | 26/05/2024       |
| Equipo de trabajo ( <i>Team members</i> ) |                               |  |  |   |                  |
| Nombre                                    |                               |  | Rol  | Foto  |                  |
| Juan Sebastián Trujillo Rodríguez         |                               |  | Estudiante 1   |   |                  |
| Brayan Alberto Portilla Lasso             |                               |  | Estudiante 2   |  |                  |
| Juan Pablo Villegas Flórez                |                               |  | Estudiante 3   |  |                  |
| Juan Eduardo Salcedo Chamorro             |                               |  | Estudiante 4   |  |                  |
| Carlos Alberto Olarte Meneses             |                               |  | Director   |  |                  |

## II. DEFINIR

### A. Contexto y Justificación (¿por qué?)

El sistema de compostaje es un conjunto de técnicas que permiten transformar los residuos orgánicos crudos en abono, proporcionando beneficios para cultivos, plantas y árboles. Esta práctica ha crecido a nivel mundial, con una participación cada vez mayor de muchos países debido a su significativa contribución ambiental. Además, el compostaje redujo el uso de fertilizantes químicos, aumentando la fertilidad del suelo, mejorando la calidad del agua y permitiendo que las plantas absorban nutrientes sin contaminantes.

Según el artículo "Hablemos de Campo", Suecia es un referente mundial en reciclaje, ya que recicla el 99% de sus desechos y su gestión de residuos se centra en evitar la producción de basura. Por ley, los suecos separan todos los residuos reciclables en sus hogares y los depositan en contenedores especiales en sus zonas residenciales, que luego son llevados a estaciones de reciclaje. Todo se recicla, reutiliza o convierte en abono. En el caso de los residuos alimenticios, se elaboran compostas usadas para fertilizantes y biogás, que se usa como combustible para autobuses. También, Austria se destaca por reciclar y compostar el 65 % de sus residuos. Una de sus regiones, Estiria, sobresale por la concentración de empresas que se dedican al tratamiento de residuos y biomasa para producir bioenergía". [1]

Dado el éxito de estas prácticas en otros países y su eficiencia en la generación de compostaje a partir de residuos, es crucial considerar el desarrollo de un proyecto para mejorar el proceso de producción de compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Esto implica reducir los tiempos de producción para liberar más rápidamente las composteras y aumentar la productividad del proceso. Por lo tanto, es fundamental investigar las prácticas y procesos actuales en la universidad para comprender su método y explorar oportunidades de mejora que optimicen la productividad del proceso.

La Pontificia Universidad Javeriana Cali, ubicada en el sector de Pance en Cali, Valle del Cauca, Colombia, se encuentra en un entorno rural caracterizado por su rica vegetación y fauna local.

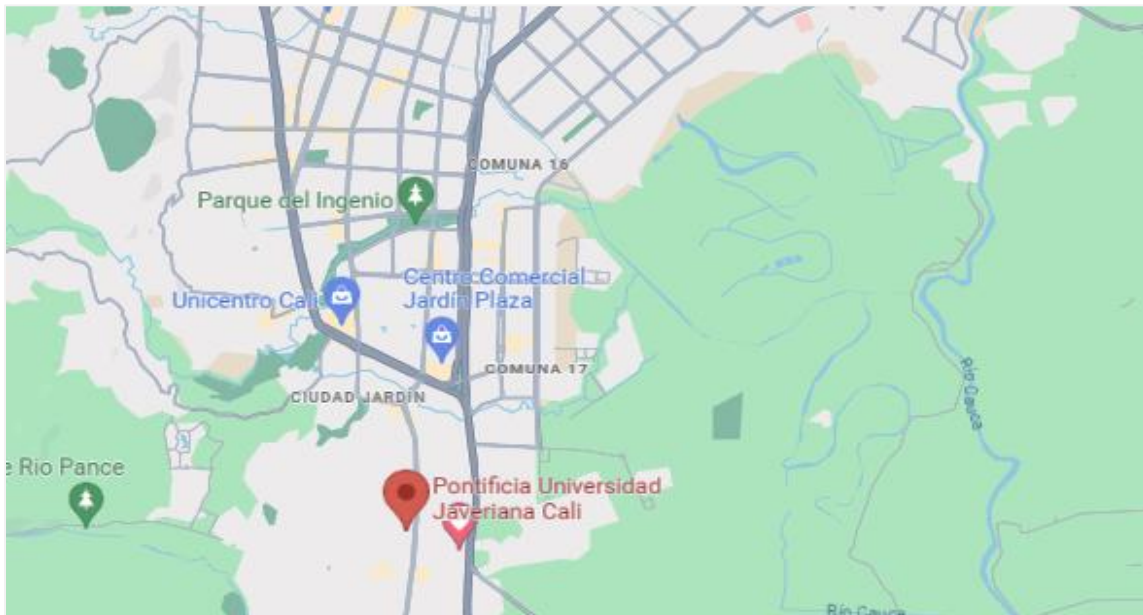


Figura 1. Localización campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali [2]

El campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali abarca un terreno de 170 095 metros cuadrados, de los cuales 85 942 metros cuadrados son áreas verdes y 66 161 metros cuadrados están construidos. Cuenta con diversas instalaciones, incluyendo aulas, restaurantes, laboratorios, biblioteca, auditorios y canchas deportivas. Además, ofrece tecnología avanzada en sus procesos, lo que permite a los estudiantes desarrollar sus habilidades prácticas y teóricas en sus respectivos campos de estudio.



Figura 2. Campus Pontificia Universidad Javeriana Cali [3]

La Pontificia Universidad Javeriana Cali se destaca por su compromiso con la excelencia académica y el desarrollo integral de sus estudiantes. En el año 2022, esta prestigiosa institución presentó las siguientes cifras:

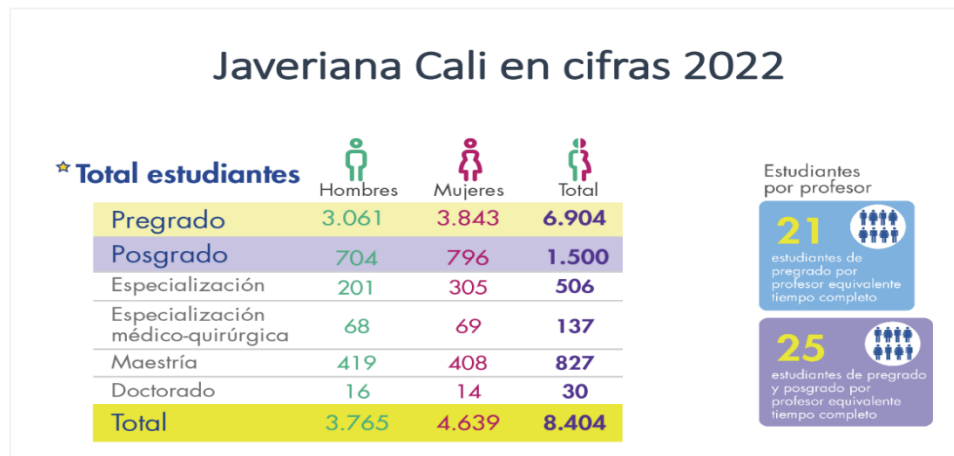


Figura 3. Estudiantes Pontificia Universidad Javeriana Cali [4]

8404 estudiantes están matriculados en carreras y programas académicos. De estos, 6904 se encuentran en programas de pregrado, distribuidos entre 3061 hombres y 3843 mujeres. En programas de posgrado, hay 1500 estudiantes, distribuidos en 506 estudiante de especialización, 137 en especialización médico-quirúrgica, 827 en maestrías y 30 en doctorados. En programas de posgrado, hay 1.500 estudiantes, de los cuales 506 están en especialización, 137 en especialización médico-quirúrgica, 827 en maestrías y 30 en doctorados. La proporción de estudiantes por profesor es de 21 en programas de pregrado y 25 en programas de pregrado y posgrado combinados.



Figura 4. Comunidad profesoral Pontificia Universidad Javeriana Cali [4]

Según datos recopilados en 2022, la comunidad académica de la Universidad Javeriana de Cali, compuesta por estudiantes y 1,282 profesores, generó aproximadamente 32 kg diarios de residuos (ver Anexo 2). Estos residuos se han reutilizado eficientemente para producir nueva materia prima en el campus universitario, como compost.

El proceso de obtención de compost en la universidad sigue un procedimiento riguroso que abarca desde el tratamiento de los residuos generados hasta la utilización del producto final. A continuación, se resume este proceso:

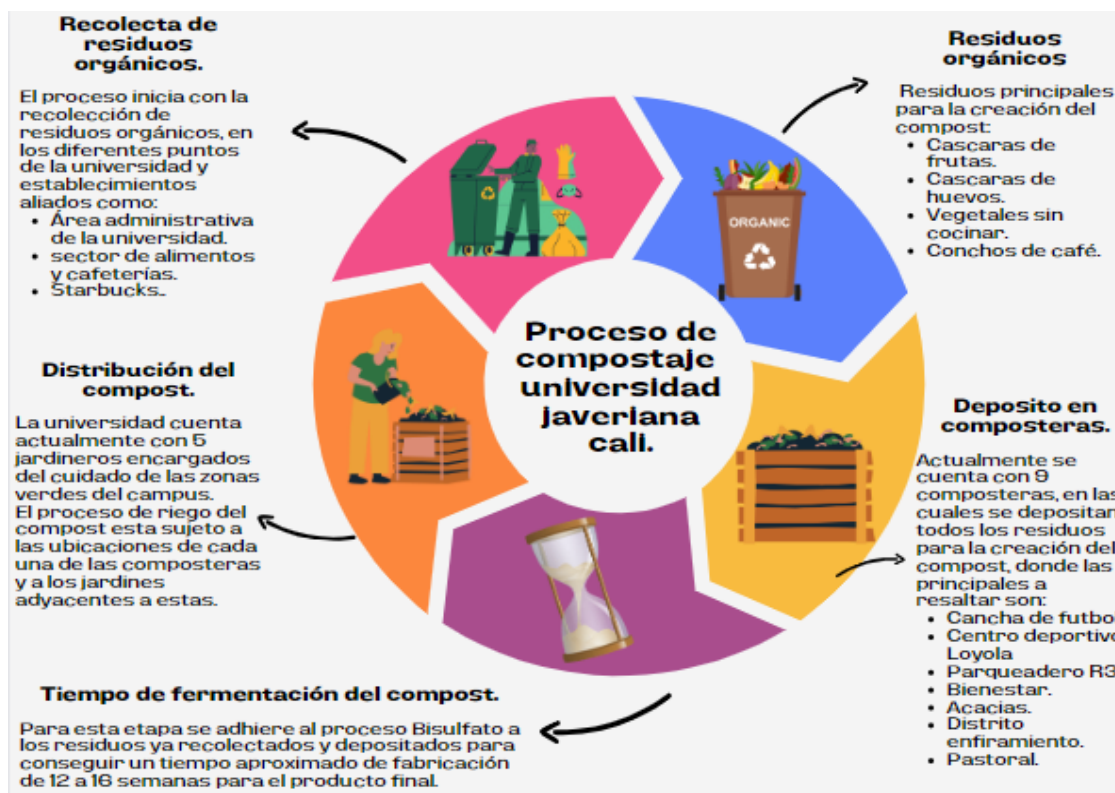


Figura 5. Procesos de compostaje Pontificia Universidad Javeriana Cali

Según el contexto actual del proceso de compostaje en la universidad, se observa un enfoque claro hacia la gestión eficiente de residuos orgánicos para reducir la huella ambiental. La institución ha implementado prácticas sostenibles en su campus, destacándose por el uso del compostaje para aprovechar estos residuos. Sin embargo, el informe de sostenibilidad del año 2020 revela un incremento significativo del 41% en la generación de residuos orgánicos internos entre 2018 y 2019 [3], tendencia que espera que continúe debido a la creciente población estudiantil. Esto plantea una preocupación, ya que las composteras actuales podrían alcanzar su capacidad máxima debido a los retrasos en la liberación del compost, un proceso que actualmente toma alrededor de 4 meses, según se detalla en la descripción del proceso de compostaje.

De no abordarse esta situación, los residuos orgánicos podrían acumularse sin aprovechar al máximo la producción de compost en la universidad. Por ello, se ha identificado una oportunidad de mejora para rediseñar el proceso actual de compostaje, con el objetivo de acelerar la liberación del compost y aumentar la eficiencia en la gestión de residuos. Al anticiparnos a este escenario y optimizar el proceso de compostaje, no solo aseguraremos la sostenibilidad y la eficiencia económica de las operaciones actuales de la universidad en relación con la disposición y el aprovechamiento de residuos, sino que también estableceremos un ejemplo para otras instituciones educativas, entidades deportivas y recreativas, así como otras organizaciones que busquen implementar o mejorar sistemas similares de gestión de residuos.

### B. Grupos de interés

La metodología implementada para identificar los grupos de interés partió de la recolección de información desde el entendimiento inicial de la recolección de residuos orgánicos hasta la producción del compost, el cual se hizo por medio de visitas y entrevistas a las personas involucradas en el proceso de compostaje como: Operarios de recolección de residuos, jardineros, DAGMA y Comité de gestión ambiental que está conformado por el jefe de la Oficina de recursos físicos y ambientales, rector, asesor, profesional, coordinador y analista de mantenimiento. Posteriormente, se realizó la priorización de estos grupos de interés aplicando la matriz de influencia-impacto, con el fin de identificar la influencia que tienen estos en la participación en el proyecto e impacto para efectuar cambios sobre el mismo. A continuación, se da a conocer los resultados de los grupos de interés y su respectiva priorización.

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE GRUPO DE INTERÉS

| Grupos de Interés                  | Descripción   |
|------------------------------------|---|
| <b>Equipo de Proyecto</b>          | Encargado del diseño del proyecto de la facultad de ingeniería industrial para aplicar las herramientas y metodologías en desarrollo de alternativas de soluciones innovadoras y eficientes para el manejo de residuos orgánicos.   |
| <b>Comité de Gestión Ambiental</b> | <p>Está encabezado por el Rector como máxima autoridad y un equipo asesor que realiza la gestión ambiental institucional, incluido a gestión adecuada de los residuos sólidos, y está compuesto por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Asesor</li> <li>- Profesional</li> <li>- Jefe</li> <li>- Coordinador de mantenimiento</li> <li>- Analista de mantenimiento</li> <li>- Analista de redes eléctricas</li> </ul> <p>Personal responsable de coordinar la estructuración, elaboración, implementación y seguimiento del PGIR (Plan de Gestión Integrada de Residuos).</p> |
| <b>Jardineros</b>                  | Es el encargado en la gestión y cuidado del manejo de los residuos empleados en las composteras, además de la distribución del compost en las áreas verdes de la universidad.   |

|              |  |
|--------------|--|
| <b>DAGMA</b> | El Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) es el organismo encargado de la gestión ambiental en Santiago de Cali y la máxima autoridad ambiental en su perímetro urbano. [4] |
|--------------|--|

La metodología para la priorización de los grupos de interés partió con base a los criterios de calificación de 1 a 10, con 1 representando el nivel más bajo y 10 como el más alto.

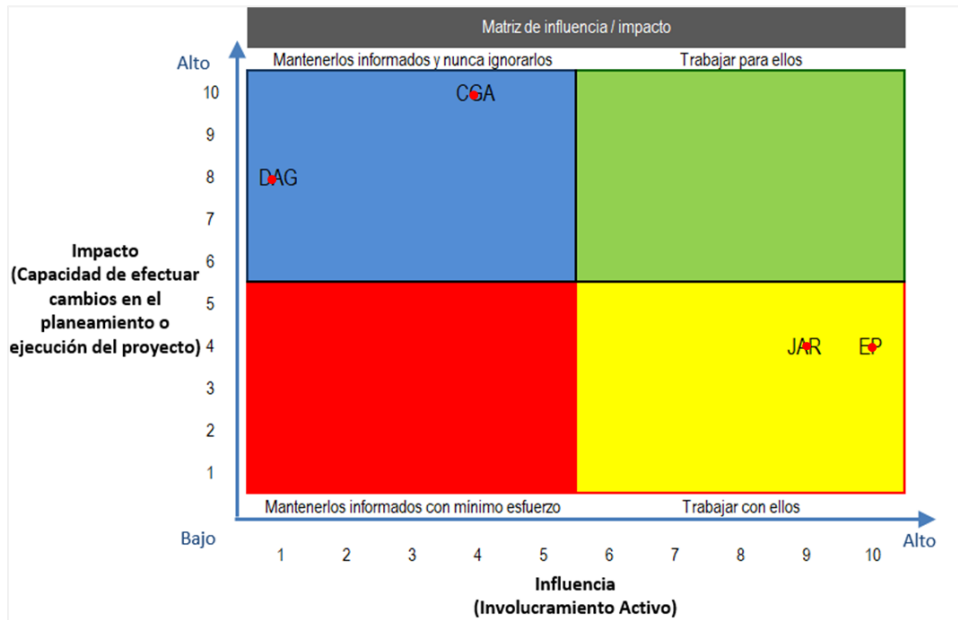


Figura 6. Matriz Influencia/Impacto

Del análisis de los resultados obtenidos, se identificó que el Jardinero (JAR) posee una alta influencia con un puntaje de 9 y un impacto moderado de 4, indicando un activo involucramiento y capacidad moderada para influir en los cambios. El Comité de Gestión Ambiental (CGA), aunque muestra una influencia relativamente baja de 4, tiene una capacidad máxima de impacto con un puntaje de 10, lo que sugiere capacidad para efectuar cambios importantes en el proyecto. El Equipo de Proyecto (EP) destaca con la máxima influencia y un impacto moderado, con puntajes de 10 y 4 respectivamente, reflejando un alto nivel de involucramiento y una significativa influencia en las decisiones del proyecto. Por otro lado, el DAGMA (DAG) tiene una influencia mínima con un puntaje de 1, pero su capacidad de impacto es alta con un valor de 8.

Aunque varios grupos de interés presentan puntajes altos en diferentes dimensiones, es el Equipo de Proyecto (EP) el que destaca por tener la máxima influencia con un puntaje de 10. Esto sugiere que el EP está altamente involucrado en todas las fases del proyecto y juega un papel crucial en su desarrollo. Además, su capacidad de impacto es moderada, lo que indica que también tienen una influencia significativa en la toma de decisiones relacionadas con cambios en el planeamiento o ejecución del proyecto. Es fundamental considerar y priorizar las opiniones y la "retroalimentación" del EP dado el alto nivel de involucramiento y su capacidad para influir en el proyecto.

### C. Requerimientos

Una vez identificado el grupo de interés, se han considerado los requisitos de los interesados necesarios para alcanzar los resultados esperados en el diseño propuesto. Por lo tanto, estos requisitos se han recopilado y se presentan en la Tabla II.

TABLA II. REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

| Grupo de Interés                   | VoC (Requisitos de Grupo de Interés)   | Restricciones de Diseño   | Especificaciones de Diseño   | Leyes, Normas y estándares                   |  |
|------------------------------------|--|---|--|--|--|
|                                    |  |   |  | Legislación y Requisitos Aplicables          | Importancia o Efecto   |
| <b>Equipo de proyecto</b>          | Identificación y evaluación de áreas críticas en el proceso de producción de compost donde se anticipe un aumento de residuos y potencial sobrecapacidad.  | Las soluciones propuestas deben ser viables dentro de los recursos actuales y futuros de la universidad y deben ser adaptadas a las proyecciones de aumento de residuos.  | Diseñar un proceso adecuado que no solo atienda las necesidades actuales, sino que también sea escalable para gestionar un incremento proyectado de residuos en el futuro.   | No aplica                                    | "Alta". Dado que el Equipo de Proyecto tiene la máxima influencia y un impacto significativo en el proyecto, su rol es crucial para el éxito del rediseño del proceso.   |
| <b>Comité de Gestión Ambiental</b> | Necesidad de recibir informes estructurados y detallados, preferiblemente en formato Excel, del área encargada de monitorear el proceso de producción ambientalmente sostenible.   | Precisión, consistencia y actualización regular de los datos relacionados con el proceso de producción.   | Tratamiento o análisis de la producción del compost teniendo en cuenta la calidad y cantidad de residuos recolectados, incluyendo conchos de café y restos de frutas y vegetales.  | Plan de Gestión Integral de Residuos - PGIRS | Desarrollo y aplicación de estrategias efectivas para la gestión integral de residuos en la Pontificia Universidad Javeriana seccional Cali, alineadas con las normas ambientales actuales y los objetivos institucionales.                                      |
| <b>Jardineros</b>                  | Necesidad de un proceso de supervisión robusto y sistemático en la compostera de cancha de fútbol para garantizar la calidad y capacidad del compost producido, especialmente ante un aumento previsto en la generación de residuos. | Proveer capacitación continua y efectiva a todo el personal, incluyendo a los nuevos integrantes, y asegurar que cuenten con las herramientas adecuadas para supervisar y mantener las composteras de manera eficiente. | 100% Calidad<br>100% personal capacitado<br>Garantizar un compost de alta calidad que cumpla con las necesidades de los jardines y asegurar que todo el personal esté adecuadamente capacitado para manejar un incremento en la generación de residuos y posibles sobrecapacidades en las composteras. | Plan de Gestión Integral de Residuos - PGIRS | Es esencial monitorear y supervisar continuamente las composteras para anticipar y manejar eficientemente cualquier sobrecapacidad que pueda surgir debido al aumento en la generación de residuos, garantizando así la producción sostenible de compost.        |
| <b>DAGMA</b>                       | Cumplimiento estricto y actualizado de todas las regulaciones y normativas ambientales relacionadas con la gestión de residuos.  | Garantizar un manejo adecuado y sostenible de los residuos, desde su recolección hasta la producción de compost, considerando el potencial aumento en la generación de estos.   | Garantizar un cumplimiento del 100% de todas las normativas y regulaciones, con sistemas de monitoreo y reporte que permitan verificar y demostrar este cumplimiento.  | Decreto 1713 del 2022                        | Promover y garantizar prácticas sostenibles y responsables en el manejo de residuos sólidos, reforzando la responsabilidad conjunta de entidades públicas y privadas, y considerando la anticipación y gestión del posible aumento en la generación de residuos. |

Este levantamiento de requerimientos (VoC) se elaboró mediante reuniones presenciales con los grupos de interés, exceptuando el DAGMA ya que es una entidad externa a la universidad y aunque no tenga una influencia directa activa, su marco normativo define los parámetros dentro de los cuales el proyecto debe operar, asegurando así su alineación con las políticas ambientales y la sostenibilidad a largo plazo.

1) *Restricciones de diseño (Factibilidad)*

Esta infraestructura tiene el potencial de ampliarse en los próximos años para atender un incremento en la generación de residuos orgánicos. Los desechos orgánicos provenientes de las cafeterías y el material vegetal recolectado de los parques y la cancha de fútbol se compactan para su transformación en abono. Este proceso se alinea con el Plan de Gestión Integrada de Residuos (PGIRS) de la Universidad, que busca aumentar el aprovechamiento de estos residuos que antes se destinaban a vertederos.

El diseño del sistema de compostaje debe ser viable en cuanto a capacidad de procesamiento para adaptarse al creciente volumen de residuos orgánicos y desde perspectivas económica, social y ecológica. Esto implica una evaluación detallada de los costos operativos, incluyendo los recursos necesarios para su operación y el personal requerido, garantizando que puedan ser cubiertos por la universidad. Los aspectos ambientales, como la calidad en la disposición de residuos, el proceso de producción, y la gestión del aire y agua, son de igual importancia. Además, es vital considerar los impactos sociales y asegurar la aceptación y participación de la comunidad universitaria en este proyecto de compostaje.

2) *Especificaciones de diseño (Características)*

Las especificaciones de diseño del proceso deben incluir procedimientos y componentes que garanticen el cumplimiento de cierta cantidad, porcentaje de calidad y separación de los residuos, con el fin de disminuir la carga laboral. Además, el buen manejo y control de los residuos debe ser seguro para la salud y medio ambiente en el campus universitario, para evitar la exposición de agentes infecciosos, como también la liberación de contaminantes en las composteras y en el entorno de esta, con el propósito de dar con obediencia a las normas ambientales.

3) *Leyes, normas y estándares (Buenas prácticas)*

El conjunto de normas jurídicas, reglas específicas y nacionales que puedan afectar la oportunidad encontrada es el manejo y disposición de los residuos, según la Resolución No. 2184 de 2019 planteado en el Plan de Gestión Integral de Residuos. También, por parte del DAGMA se debe cumplir las regulaciones ambientales mediante el acatamiento del Decreto 1713 del 2022.

### III. MEDIR

#### A. Plan de recolección de datos

El objetivo de esta fase es elaborar un plan detallado para recolectar datos que brinden una comprensión exhaustiva del proceso de compostaje, centrándose especialmente en la cantidad de residuos orgánicos recolectados y los tiempos involucrados desde el inicio hasta la obtención del compost final. Para garantizar la completitud y organización de la recolección de datos, se emplearon fuentes primarias, como visitas directas a las instalaciones y entrevistas con los responsables del área de Gestión Ambiental de la Pontificia Universidad Javeriana Cali, incluyendo jardineros, personal de recursos físicos y el director del departamento de gestión organizacional.

Además, se utilizaron fuentes secundarias para complementar la información, como datos históricos, características específicas del proceso de compostaje y otros aspectos relevantes relacionados con la gestión de residuos orgánicos. Este enfoque integral permitirá ampliar los resultados obtenidos de las fuentes primarias y enriquecerá el análisis del proyecto. Los detalles completos del plan de recolección de datos se encuentran especificados en el Anexo 5.

A partir de la información recolectada, el objetivo es definir las variables del proceso para cuantificar el estado actual del proyecto y verificar los resultados de la mejora propuesta, que finalmente se traduce en la definición de los indicadores clave de desempeño (KPIs). A continuación, se presentan en la Tabla III, los indicadores de desempeño que se utilizaron para medir y evaluar los aspectos que influyen en el proceso de compostaje.

TABLA III. INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR

| VARIABLE  | OBJETIVO   | DESCRIPCIÓN   | INDICADOR  |
|---|--|---|--|
| <b>Residuos de Poda</b>                                   | Evaluar la contribución de los residuos de poda  | Cantidad de residuos de poda ingresados en la compostera  | Kilogramos de residuos de poda (Kg poda)   |
| <b>Conchos de Café</b>                                    | Evaluar la contribución de los conchos de café   | Cantidad de conchos de café ingresados en la compostera   | Kilogramos de conchos de café (Kg café)  |
| <b>Residuos crudos de cáscaras de frutas y vegetales</b>  | Evaluar la contribución de los residuos crudos de cáscaras de frutas y vegetales           | Cantidad de residuos crudos de cáscaras de frutas y vegetales ingresados en la compostera   | Kilogramos de residuos crudos de cáscaras de frutas y vegetales (Kg crudos)        |
| <b>Total de Entrada</b>                                   | Evaluar la entrada total de materiales a la compostera                                     | Suma total de todos los residuos ingresados en la compostera  | Kilogramos totales ingresados (Kg poda + Kg café + Kg crudos + L micro)            |
| <b>Volumen de la sección de la compostera</b>             | Asegurar la adecuada capacidad de la compostera  | Volumen metros cúbicos de la compostera   | Metros cúbicos de la compostera (m <sup>3</sup> )                                  |
| <b>Producción de Compost</b>                              | Medir la cantidad de compost producido   | Cantidad de compost producido a partir de los residuos ingresados   | Kilogramos de compost producido (kg compost) = 0,3*(Kg poda + Kg café + Kg crudos) |
| <b>Tiempo</b>   | Medir y evaluar el tiempo del proceso de producción de compost                             | Tiempo de producción de compost   | Tiempo de producción de compost en meses   |
| <b>Liberación o Uso del compost</b>                       | Minimizar el tiempo de almacenamiento para aumentarla capacidad de producción.             | Es el tiempo en que se tarda en retirar completamente el compost de la compostera.  | Días hasta la liberación del compost   |
| <b>Tiempo del Ciclo del Lote</b>                          | Maximizar la eficiencia del proceso mediante la disminución del tiempo de ciclo.           | Este es el tiempo total que un lote de compost pasa en el proceso, incluyendo la maduración y la liberación.  | Maduración de Compost+ Tiempo de ciclo del Lote.                                   |
| <b>Lotes x Año</b>  | Incrementar la frecuencia de producción de lotes para mejorar la capacidad anual.          | Esta es la cantidad de lotes de compost que pueden producirse en un año, basado en el tiempo de ciclo de cada lote.   | Número de lotes producidos por año   |
| <b>Kilogramos por Lote</b>                                | Establecer la cantidad de producción de compost por lote para estimar la producción total. | Esta es la cantidad de compost que se espera producir por lote. Está basado en un promedio estandarizado de los datos recolectados en el período 2022-2023. | Kilogramos de compost por lote   |
| <b>Capacidad de la compostera de la cancha de fútbol:</b> | Evaluar y maximizar la producción específica de la   | Esto es la cantidad total de compost que se puede producir en un año.   | Toneladas de compost producidas al año en la compostera de la cancha de fútbol     |

|                         |  |  |  |
|-------------------------|--|--|--|
|                         | compostera de la cancha de fútbol.   |  |  |
| <b>Capacidad Máxima</b> | Determinar el potencial máximo de producción sin tiempos de espera en la liberación del compost. | Esto ocurre cuando el tiempo de liberación es cero, lo que indica que la compostera está en su óptimo proceso de producción y aprovechamiento del compost. | Máxima capacidad de producción anual de compost sin tiempo de espera para la liberación (en toneladas) |
| <b>Temperatura</b>      | Evaluar la influencia de la temperatura en la eficiencia del compostaje                          | Medición de la temperatura interna de la compostera durante el proceso de compostaje   | Temperatura (°C)   |
| <b>Humedad</b>          | Asegurar niveles óptimos de humedad para la descomposición adecuada de los residuos              | Medición del contenido de humedad en la compostera   | Porcentaje de humedad (%)  |
| <b>pH</b>               | Controlar el pH para optimizar las condiciones de compostaje                                     | Medición del pH en diferentes etapas del compostaje  | Valor de pH  |
| <b>Oxígeno</b>          | Garantizar una adecuada aireación para la descomposición aeróbica                                | Medición de los niveles de oxígeno en la compostera  | Concentración de oxígeno (%)   |

### B. Exploración del mercado

La recolección de datos sobre los residuos generados en la universidad fue realizada diariamente por el personal del área de Gestión Ambiental entre 2022 y 2023. Estos datos fueron entregados al equipo del proyecto para realizar una simulación en Excel de la cantidad de compost producido mensualmente. Los detalles de esta información se encuentran en el Anexo 2, y los resultados de este período se sintetizan en la Tabla IV.

Durante las interacciones con el personal, se nos proporcionaron y compartieron documentos que detallan el método de recolección de residuos especificado en el Plan Integral de Gestión de Residuos (PGIRS), así como las normas y reglamentos del DAGMA relacionados con el proceso de compostaje. También se detallaron las medidas de las composteras, que se explican más adelante en este documento, con el objetivo de identificar oportunidades de mejora y asegurar el cumplimiento de ciertos criterios.

Además, se realizó una investigación sobre los estándares de cada fase del compostaje en otros procesos similares y la composición química del compost. Se obtuvo información sobre la influencia de variables como el pH, la temperatura, el oxígeno y los microorganismos en el compost, lo cual será útil para verificar cualquier cambio en el sistema actual.

Con base en las variables detalladas en la Tabla III, procederemos a sintetizar los datos recolectados para cada una de ellas con el propósito de evaluar el estado actual del proceso. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de estas interacciones:

TABLA IV. CANTIDAD RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS Y APLICADOS EN LAS 9 COMPOSTERAS DE LA PUJ DE CALI (ACUMULATIVOS) 2022-2023

| TIPO DE RESIDUOS ORGÁNICOS                          | CANTIDAD     | UNIDAD DE MEDIDA |
|---|--------------|------------------|
| Poda  | 2009         | kg / mes         |
| Crudo   | 1164         | kg / mes         |
| Café  | 128          | kg / mes         |
| <b>TOTAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS</b>                  | <b>3 299</b> | <b>kg/mes</b>    |
| <b>TOTAL DE COMPOST PRODUCIDO (30% del residuo)</b> | <b>990</b>   | <b>kg / mes</b>  |

Entre julio de 2022 y agosto de 2023, se recolectaron residuos mensualmente en las siguientes cantidades (Ver Anexo 2): 2 009 kg de material de poda, 1 164 kg de residuos orgánicos crudos y 128 kg de concho de café. Esto suma 3,299 kg/mes de residuos ingresados a las 9 composteras. Adicionalmente, en agosto de 2022 se añadieron 200 litros de microorganismos para ayudar en el proceso de descomposición.

Según lo informado en el proyecto “implementación de un sistema integral de compostaje a base de residuos sólidos orgánicos de la universidad cooperativa de Colombia campus Cali”, se estima que aproximadamente el 30% del total de residuos ingresados a la compostera se convierte en compost. Esto significa que, durante el período específico analizado, se produjeron 990 kg de compost mensuales a partir de los residuos orgánicos ingresados. [5]

Además, es importante considerar que la universidad utiliza aproximadamente 1,500 kg de compost en sus áreas del campus en 5 meses, lo que equivale a un uso mensual de 300 kg en todo el campus.

Obtenidos los datos sobre la cantidad de residuos orgánicos y compost generados en las 9 composteras, se determinó centrar el estudio solo en la **compostera de la cancha de fútbol para mejorar la producción**. Esta compostera fue seleccionada para identificar, medir y analizar las variables clave del proceso, dado que es una de las más grandes y recibe una mayor cantidad de insumos, lo que resulta en una producción significativamente mayor de compost; La compostera está dividida en tres secciones controladas, cada una 33.33 metros cuadrados. Por tanto, se recopila información sobre la cantidad de residuos que ingresan actualmente en la compostera de la cancha de fútbol y se extrae la cantidad de compost generado a partir de estos datos:

*TABLA V. CANTIDAD (KG) DE ENTRADA DE LOS RESIDUOS GENERADOS Y APLICADOS EN LA COMPOSTERAS DE LA CANCHA DE FÚTBOL DE LA PUJ DE CALI (ACUMULATIVOS) 2022-2023*

| TIPO DE RESIDUOS ORGÁNICOS                          | CANTIDAD      | UNIDAD DE MEDIDA |
|---|---------------|------------------|
| R. Poda   | 509,2         | kg / mes         |
| R. Crudo  | 293,6         | kg / mes         |
| C. Café   | 72            | kg / mes         |
| <b>TOTAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS</b>                  | <b>874,8</b>  | <b>kg/mes</b>    |
| <b>TOTAL DE COMPOST PRODUCIDO (30% del residuo)</b> | <b>262,43</b> | <b>kg / mes</b>  |

En la tabla anterior se detalla la información recopilada de la compostera de la cancha de fútbol, donde se recolectan mensualmente 509.2 kg de residuos de poda, 293.6 kg de residuos orgánicos crudos y 72 kg de conchos de café, sumando un total de 874.8 kg. Este proceso de compostaje produce 262.43 kg de compost al mes, equivalente al 30% de los residuos ingresados. Los residuos de poda representan la mayor parte con el 58% del total, seguidos por los residuos crudos con el 34% y los conchos de café con el 8%.

Tras recopilar los datos sobre la recolección de residuos y la producción de compost, es importante conocer el tiempo que tardan los residuos en descomponerse hasta producir compost. Este período, que abarca desde el inicio del compostaje hasta la maduración del compost, se denomina “Maduración”. Además, se detalla el tiempo que tarda en vaciarse o utilizarse por completo el compost madurado de la compostera, conocido como “Liberación”. A continuación, se presenta esta información detallada en la tabla VI:

*TABLA VI. TIEMPOS DE PROCESO DE PRODUCCIÓN EN LA COMPOSTERAS DE LA CANCHA DE FÚTBOL DE LA PUJ DE CALI*

| DESCRIPCIÓN                            | CANTIDAD | UNIDADES DE MEDIDA |
|--|----------|--------------------|
| Maduración del compost (P.T)           | 3,00     | mes                |
| Liberación o uso del compost producido | 1        | mes                |
| Tiempo de ciclo del lote               | 4,00     | mes                |
| Lotes x año                            | 3,0      | lotes/año          |
| Kilogramos por lote                    | 787,29   | kg x lote          |
| Capacidad                              | 2 361,87 | kg/año             |

De acuerdo con la tabla anterior, el proceso de compostaje incluye una etapa de maduración de 3 meses y una etapa de liberación o uso de 1 mes, lo que hace que cada ciclo de producción dure 4 meses. Esto permite producir 3 lotes de compost al año, con cada lote generando 787,29 kg, resultando en una capacidad de producción anual de 2,361.87 kg.

Estas mediciones servirán de base para este proyecto, facilitando la identificación de cambios o mejoras que puedan implementarse para reducir los tiempos de maduración y liberación del compost, lo que indirectamente aumentará la capacidad de compost producida anualmente.

Ahora bien, para poder entender donde fueron generados estos datos recolectados, es importante conocer el proceso de producción de compostaje, para esto, se utilizaron herramientas como diagramas de flujo, y el diagrama SIPOC para comprender en detalle cada etapa del proceso, los recursos involucrados y las demandas de los clientes (Universidad). A continuación, se detalla la información mencionada:

### **Proceso de recolección de residuos orgánicos**

Previo al inicio de la producción de compost, se lleva a cabo un tratamiento de los residuos generados en la universidad. Para esto, la institución implementa un Plan Integral de Gestión de Residuos (PGIRS) desde 2017, el cual establece estrategias y directrices alineadas con la normativa ambiental vigente y los lineamientos institucionales para el manejo de residuos. El PGIRS de la Pontificia Universidad Javeriana abarca la siguiente información:

- Antecedentes de la gestión de residuos en la universidad.
- Definiciones relacionadas con la gestión de residuos.
- Requisitos legales y otros que se deben cumplir en la gestión de residuos.
- Diagnóstico de la situación actual de la gestión integral de residuos, abordando aspectos como la gestión interna, movilización interna, gestión externa, manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, aceite usado, entre otros.
- Capacitación en gestión de residuos.
- Implementación, verificación y seguimiento del plan de gestión de residuos, incluyendo el personal responsable, auditorías y seguimiento de indicadores.

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos (PGIRS) de la universidad, se generan diversos tipos de residuos, tal como se muestra en la siguiente Figura 7 extraída del documento

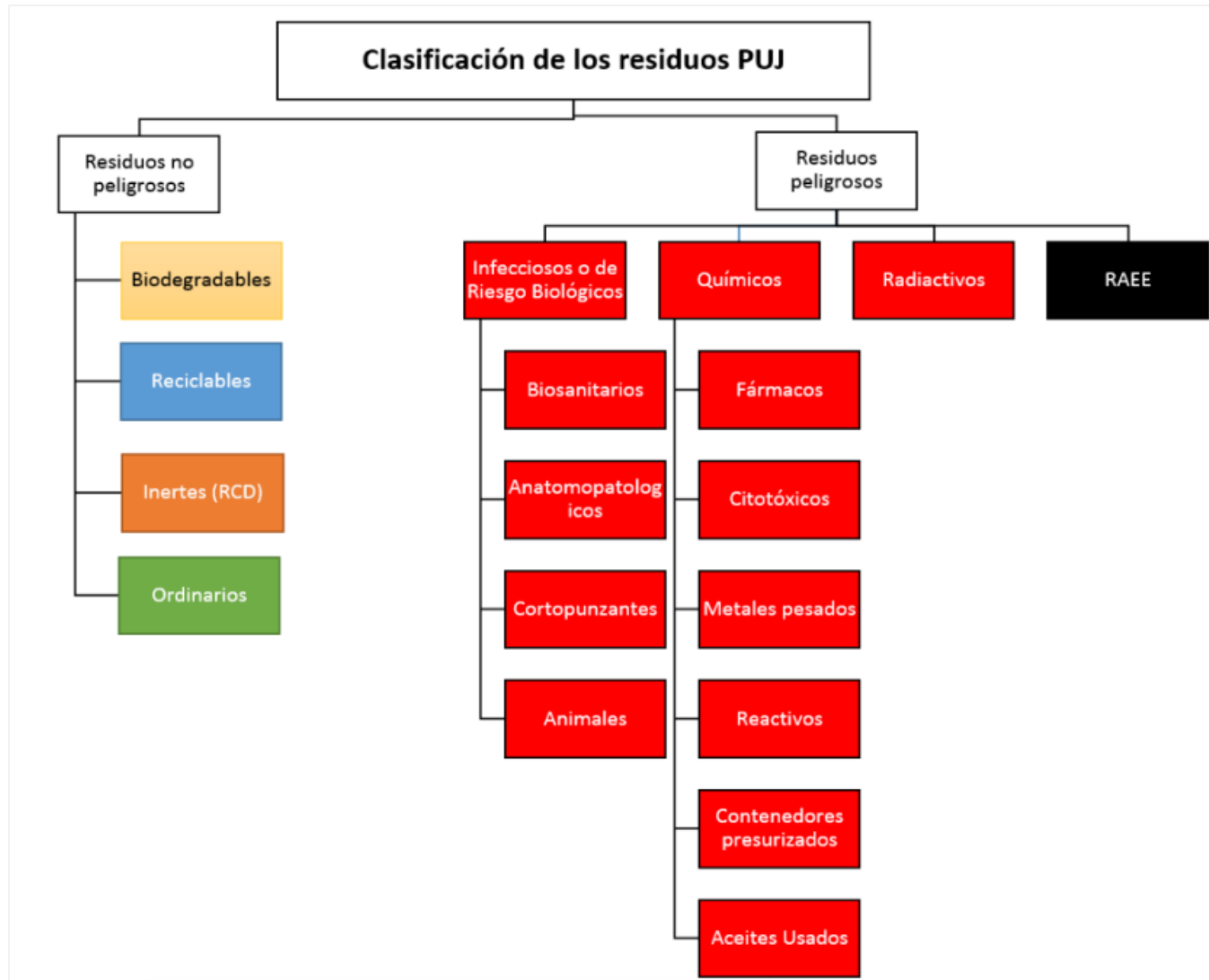


Figura 7. Clasificación de los residuos PUI [6]

Estos tipos de residuos son depositados en los puntos designados para la recolección de residuos en la universidad, como se ilustra en la Figura 8.

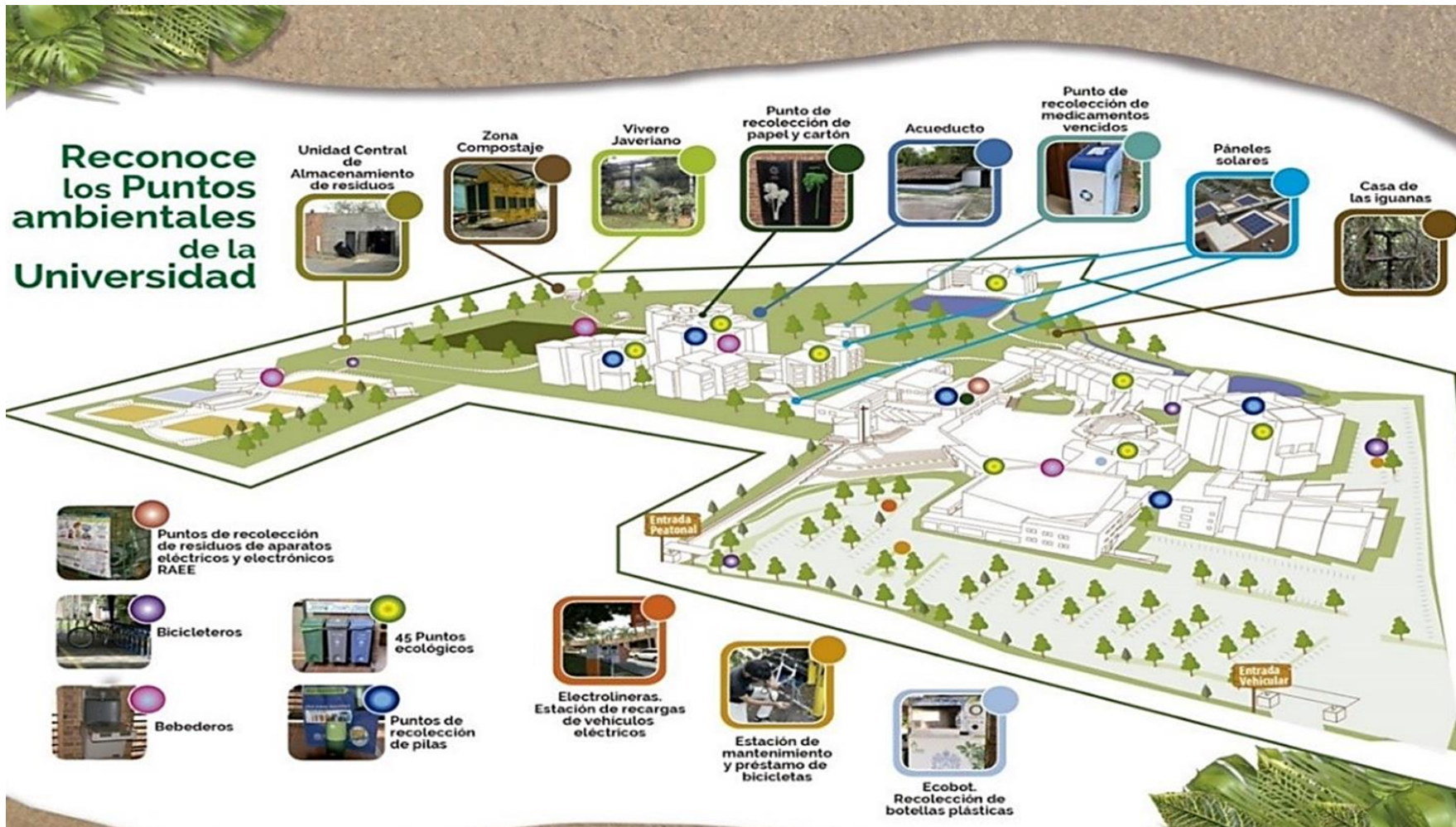


Figura 8. Mapa Ambiental de la PUJ Cali [7]

En algunos puntos de recolección específicos, se generan diferentes tipos de residuos que requieren procedimientos distintos para su recolección, debido al manejo y cuidado necesarios. Esto incluye consideraciones como rutas, horarios y herramientas (bolsas, carritos prácticos, entre otros). Para este proyecto, se detallará el procedimiento de recolección de residuos orgánicos, los cuales incluyen materiales fácilmente descomponibles en el ambiente, como frutas, cáscaras de huevo, conchos de café, vegetales y residuos de poda y jardinería, principalmente ubicados en zonas administrativas y concesionarios (cafeterías).

- **Procedimiento de recolección en zonas administrativas y académicas:** El operario recolector se encarga de la limpieza de las oficinas. Cada operario realiza la limpieza de los recipientes vaciando los residuos en una bolsa del mismo color. Al finalizar, el operario se dirige a depositar las bolsas en el punto ecológico más cercano teniendo en cuenta el código de colores. Si la bolsa está contaminada con residuos de comida, se retira la bolsa y se hace el respectivo cambio.
- **Procedimiento de recolección en zonas de cocinetas:** Este operario se encarga de la limpieza de las cocinetas ubicadas en las zonas administrativas. Cada operario realiza la limpieza de los recipientes ubicados en la cocineta, en estos lugares se emplean dos recipientes: uno para residuos ordinarios (verde) y otro para residuos orgánicos (Beige). El operario procede a realizar el vaciado de los residuos en otra bolsa del mismo color, en el caso de los residuos orgánicos, se retira la bolsa y se realiza el respectivo cambio de esta. [6]

Se recolectaron datos relevantes y destacados para el tratamiento de estos residuos. Además del PGIRS, también se consideran las normas ambientales establecidas por el DAGMA. Cumplir con estas regulaciones no solo asegura la seguridad y eficacia del compost y los residuos producidos, sino que también fortalece la reputación institucional al demostrar un compromiso con prácticas sostenibles y responsables frente a la comunidad y el medio ambiente.

El DAGMA (Departamento de Gestión Ambiental) es la entidad encargada de velar por la protección y conservación del medio ambiente a nivel local. En el contexto del compostaje, el DAGMA juega un papel crucial al establecer y hacer cumplir normativas ambientales específicas, como el Decreto 1713 del 2022, que regula el manejo de residuos orgánicos y la producción de compost. Este departamento no solo define los estándares técnicos y operativos que deben seguirse para asegurar la calidad del compost y la gestión adecuada de residuos, sino que también supervisa su implementación en el terreno.

A continuación, se mencionan algunos artículos de este decreto que se consideran en el proceso de compostaje y se complementan con el PGIRS de la universidad.

- **Artículo 70.** Formas de aprovechamiento: Se consideran formas de aprovechamiento, entre otras, la reutilización, el reciclaje, el compostaje, la lombricultura, la generación de biogás y la recuperación de energía.
- **Artículo 72.** Características de los residuos sólidos para el aprovechamiento: Para el compostaje y lombricultura, los residuos no deben estar contaminados con residuos peligrosos, metales pesados, ni bifenilos policlorados.
- **Artículo 73.** Programa de aprovechamiento. El programa de aprovechamiento de residuos sólidos deberá formularse y desarrollarse en concordancia con el PGIRS.
- **Artículo 74.** Localización de la planta de aprovechamiento. Para la localización de la planta de aprovechamiento de materiales contenidos en los residuos sólidos, se deben considerar entre otros los siguientes criterios: En primer lugar, la localización debe estar de acuerdo con los usos del suelo establecidos en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y otros planes de desarrollo municipales o distritales. Además, la viabilidad técnica, económica y ambiental de la planta debe ser evaluada, considerando factores como el tráfico, el ruido, los olores, la generación de partículas y el control de vectores. Finalmente, se debe garantizar la accesibilidad de la planta mediante rutas y vías adecuadas que minimicen el impacto del tráfico generado.
- **Artículo 75.** Diseño de edificaciones para el aprovechamiento. Estas edificaciones deben tener un diseño arquitectónico cerrado para mitigar los impactos sobre el área de influencia. Deben contar con un área mínima suficiente para la recepción y almacenamiento de residuos, considerando situaciones de contingencia y el comportamiento del mercado. Las vías de acceso deben ser adecuadas para los equipos de transporte utilizados en el servicio ordinario de aseo. Además, deben contar con un sistema de ventilación adecuado y un sistema de prevención y control de incendios. Asimismo, es necesario tener sistemas de drenaje para el control de aguas lluvias

y lixiviados. Finalmente, deben incluir sistemas para minimizar y controlar el ruido, los olores, la emisión de partículas y el esparcimiento de materiales, así como el control de vectores. [8]

### Proceso de compostaje

El compostaje de la universidad se realiza con un sistema autónomo que utiliza nueve composteras fabricadas con residuos de guadua generados durante las podas realizadas en el campus, como se ilustra en la Figura 9. La ubicación específica de cada compostera se detalla en la figura 10. Estas unidades de compostaje abarcan 253 metros cuadrados y pueden ampliarse en los próximos años. Los residuos orgánicos generados en la cafetería, así como el material vegetal de los espacios verdes y las canchas de fútbol, son compactados y convertidos en compost.



Figura 9. Sistema de compostaje Pontificia Universidad Javeriana Cali

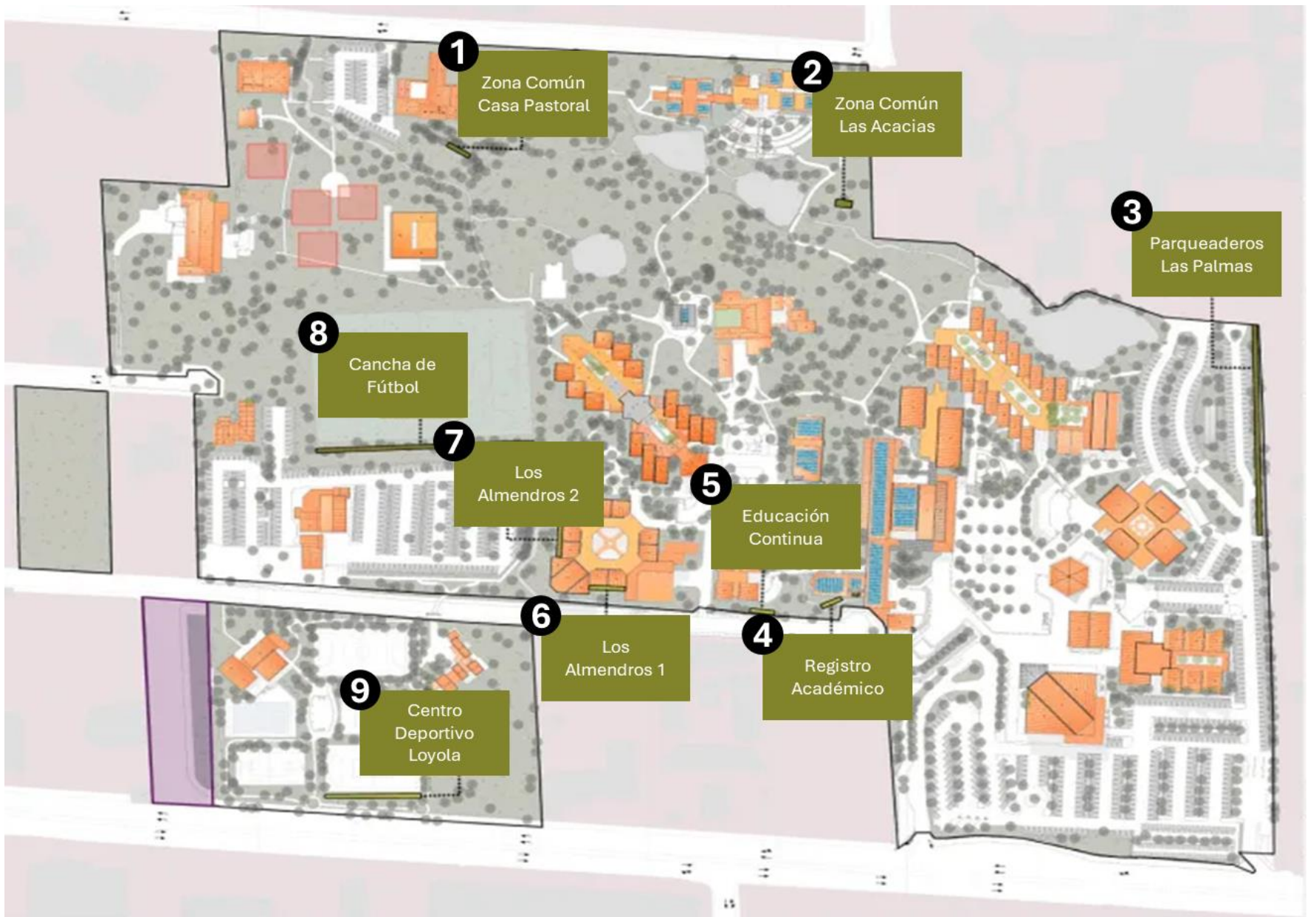


Figura 10. Ubicación de las composteras de la Pontificia Universidad Javeriana Cali

Una vez finalizada la recolección diaria de residuos orgánicos por parte de un operario de la Unidad Central de Almacenamiento (UCA), que incluye frutas y verduras según se detalló en la sección "Proceso de recolección de residuos orgánicos", estos residuos se transportan dos veces por semana a un sitio de compostaje y distribuidos en lugares específicos del campus para ser llenados en los contenedores de compostaje. En ese momento, comienza un período de cuatro meses para la transformación de estos residuos en compost.

Durante este tiempo, se desarrollan varias etapas: la descomposición mesofílica inicial, seguida de una fase termofílica o de higienización, una fase de enfriamiento y, finalmente, la maduración y afinación del compost. Estas etapas implican una serie de procesos biológicos y químicos en los que microorganismos, como bacterias y hongos, descomponen la materia orgánica, estabilizan los nutrientes y eliminan patógenos, todo bajo condiciones controladas de temperatura, humedad y aireación. Un diagrama que representa este proceso se puede ver en la Fig. 11, y las actividades y características de cada fase se detallan en la Tabla VII.

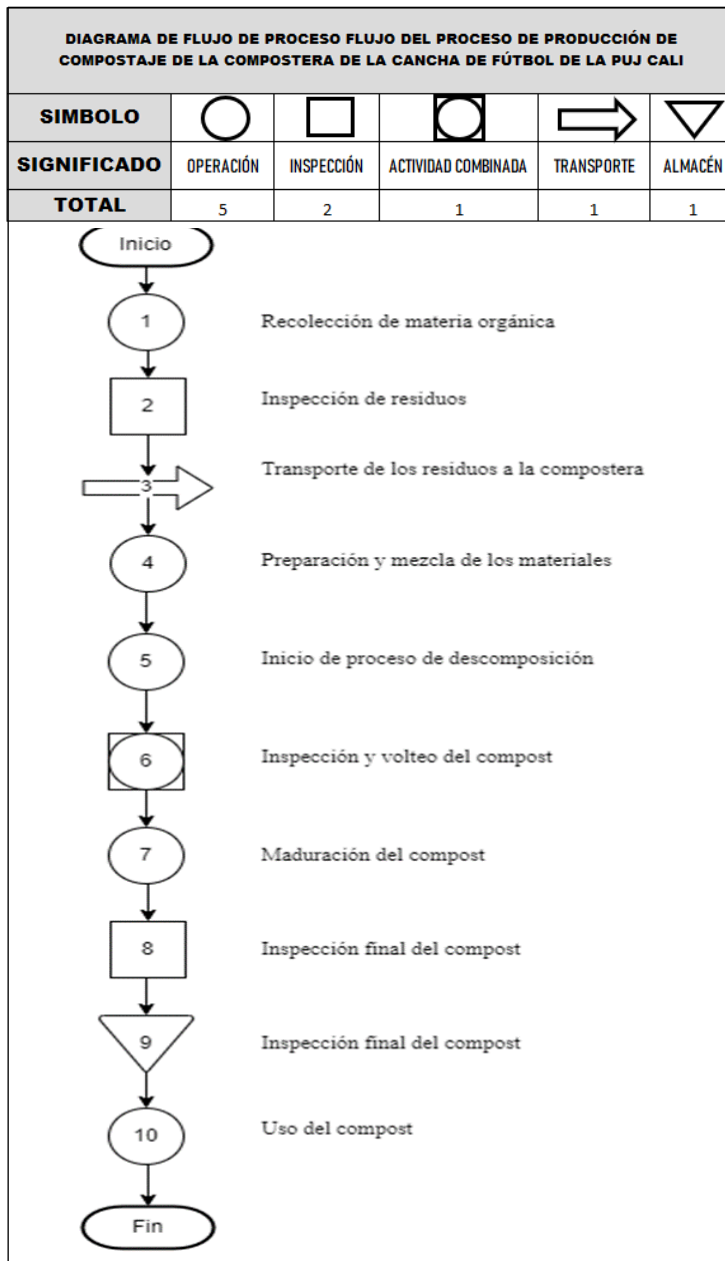


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de producción de compostaje

En esta tabla VII se detallan las fases del compostaje y sus características. Aunque estas características no se miden directamente en el proceso de compostaje de la universidad, se investigaron en fuentes especializadas y bajo condiciones similares. Esto permitió comprender el comportamiento de transformaciones biológicas de las variables como temperatura, microorganismos y pH en cada fase del compostaje.

TABLA VII. TRANSFORMACIONES BIOLÓGICAS DURANTE LA PRODUCCIÓN DE COMPOSTAJE [9]

| FASES DEL COMPOSTAJE                            | DESCRIPCIÓN   | CARACTERÍSTICAS  |
|---|---|--|
| <b>Preparación</b>                              | Separación y acondicionamiento de residuos orgánicos destinados para compostaje.                    | Temperatura: Ambiente  |
|   |   | Microorganismos: Variados                                    |
|   |   | pH: Variable   |
| <b>Descomposición Mesofílica</b>                | Etapa inicial de descomposición a temperatura ambiente.   | Temperatura: < 40°C  |
|   |   | Microorganismos: Mesófilos                                   |
|   |   | pH: 5-5,5.   |
| <b>Descomposición Termófila o Higienización</b> | La materia orgánica alcanza temperaturas elevadas, favoreciendo a las bacterias termófilas.         | Temperatura: 70 °C   |
|   |   | Microorganismos: Bacterias termófilas y filamentosas, hongos |
|   |   | pH: 8-9  |
| <b>Fase Mesófila o de Enfriamiento</b>          | Los niveles de temperatura descienden, y los microorganismos mesófilos reinician su actividad.      | Temperatura: 40°C - 45°C                                     |
|   |   | Microorganismos: Bacterias, hongos invertebrados             |
|   |   | pH: 8,5  |
| <b>Maduración</b>                               | Exposición del compost a temperatura ambiente para condensación y polimerización del humus.         | Temperatura: 12-22°C   |
|   |   | Microorganismos: Bacterias, Actinomicetos, hongos.           |
|   |   | pH: 7-8  |
| <b>Afinación (Industria)</b>                    | Mejoramiento de la homogeneidad del compost, regulación de la humedad y otros controles de calidad. | Temperatura: Variable  |
|   |   | Microorganismos: Variados                                    |
|   |   | pH: Estable  |

### Factores claves en el compostaje

Según la información proporcionada por el área de Gestión Ambiental, no se obtuvo información detallada sobre los factores clave considerados en el proceso de compostaje de la universidad. Esta falta representa una oportunidad para iniciar la recopilación de esta información crucial, ya que es fundamental identificar las variables del compostaje y la composición del compost. Estos elementos son fundamentales para analizar si cumplen con los estándares permitidos, evitando que afecten negativamente el proceso de producción y la calidad del producto final. Por lo tanto, es crucial evaluar y mantener un control sobre estos factores.

Ante esta situación, se procedió a consultar fuentes secundarias que comparten similitudes en las condiciones de las composteras y los procesos de producción con los de nuestra universidad, con el fin de obtener la información necesaria.

Basándonos en la literatura científica y en análisis de compost similares, se espera que se consideren los siguientes factores clave en el compostaje:

### Composición Química del Compost

TABLA VIII. COMPOSICIÓN DEL COMPOST [10]

| Componente                               | Rango (%) |
|--|-----------|
| Materia Orgánica (MO)                    | 40-60%    |
| Nitrógeno (N)                            | 1.5-3%    |
| Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 0.5-1.5%  |
| Potasio (K <sub>2</sub> O)               | 1-2%      |
| Calcio (Ca)                              | 1-3%      |
| Magnesio (Mg)                            | 0.5-1%    |
| Humedad                                  | 30-50%    |
| pH                                       | 6.5-8     |

### Variables Internas y Externas del Compostaje

TABLA IX. VARIABLES INTERNAS Y EXTERNAS DEL COMPOSTAJE [10]

| TIPO DE VARIABLE | VARIABLES                        | ÓPTIMA   | IMPACTO  |
|------------------|----------------------------------|--|--|
| <b>Internas</b>  | Temperatura                      | 55-65°C durante la fase termofílica                                  | Acelera la descomposición y elimina patógenos.   |
|                  | Humedad                          | 40-60%   | Crucial para la actividad microbiana; niveles inadecuados pueden inhibir el proceso.   |
|                  | pH                               | 6.5-8  | Favorece la actividad de bacterias y hongos beneficiosos.  |
|                  | Relación Carbono/Nitrógeno (C/N) | 25-30:1  | Asegura un equilibrio entre materia orgánica y descomposición eficiente.   |
|                  | Aireación                        | Niveles adecuados de oxígeno (>5%)                                   | Previene condiciones anaeróbicas y malos olores, favoreciendo la descomposición aeróbica.  |
| <b>Externas</b>  | Clima                            | Temperatura ambiente cálida, Humedad relativa moderada a alta        | Las condiciones climáticas, como la temperatura ambiente y la humedad, pueden afectar el proceso de compostaje. En climas cálidos y húmedos, el compostaje puede ser más rápido. |
|                  | Calidad de los Residuos          | Diversidad y ausencia de contaminantes                               | La calidad y tipo de residuos orgánicos influyen directamente en la calidad del compost final. Residuos más diversificados pueden mejorar el balance de nutrientes.              |
|                  | Manejo del Proceso               | Volteo regular, adición de agua según necesidad, monitoreo constante | Prácticas de manejo como el volteo regular del compost, la adición de agua y la monitorización de variables internas son cruciales para mantener condiciones óptimas.            |

Identificado el proceso mediante el diagrama de flujo y las características esenciales a considerar, procedemos a utilizar el diagrama SIPOC. Este diagrama nos permite analizar de manera detallada la información, identificando las entradas, procesos y salidas en el proceso de producción de compost en la PUJ Cali. El objetivo es facilitar las mejoras del proceso al identificar a los clientes y proveedores involucrados en él.



Figura 12. Sistema SIPOC para el proceso de producción de compostaje de la compostera de la cancha de fútbol de la PUJ Cali

Finalmente, en la Tabla X se presentan los resultados de los indicadores de desempeño (KPIs) establecidos. Es crucial destacar que estas metas fueron establecidas en base a acuerdos alcanzados con los grupos de interés involucrados en el proyecto, y fueron definidas tras un análisis cuidadoso de su factibilidad. Un resumen detallado de estas metas se encuentra en el Anexo 6. Esta definición de metas fue diseñada para asegurar que el proyecto sea realista, alcanzable y alineado con las expectativas y necesidades de todas las partes interesadas, garantizando así una implementación exitosa y beneficios significativos a través del nuevo sistema de compostaje propuesto.

TABLA X. RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

| VARIABLE             | ACTUALIDAD                    | META   |
|----------------------|-------------------------------|--|
| Tamaño de Compostera | 225 m <sup>3</sup>            | Aprovechamiento de los 70 m <sup>3</sup> de cada una las 3 secciones.                    |
| Tiempo de Liberación | 1 mes por compostera completa | Reducción del tiempo en un 20% de producción por el método de volteo de 1 mes a 0.80 mes |
| Lotes por año        | 3 lotes/año                   | 3.75 lotes/año   |

Para las demás variables contempladas en la Tabla III, los resultados se mantienen constantes, dado que estas variables no están directamente vinculadas al resultado final del proceso de compostaje. Se han mantenido estables para asegurar la consistencia en la medición del estudio, dado que el objetivo es rediseñar el proceso utilizando las mismas entradas (residuos orgánicos).

- **Residuos de Poda:** La cantidad de residuos de poda procesados se mantiene en 509.2 kg por mes.
- **Conchos de Café:** La cantidad de conchos de café procesados se mantiene en 72 kg por mes.
- **Residuos Crudos de Cáscaras de Frutas y Vegetales:** La cantidad de residuos crudos procesados se mantiene en 293.6 kg por mes.
- **Total de Entrada:** La entrada total de residuos se mantiene en 875 kg por mes.
- **Microorganismos de Laboratorio:** La utilización de microorganismos de laboratorio se mantiene en 16.67 litros por mes.
- **Producción de Compost:** La producción de compost se mantiene en 262.5 kg por mes.

## IV. ANALIZAR

### A. Análisis de Oportunidad

Con base en las variables establecidas en el Plan de Recolección de Datos (PRD) – Anexo 5 y sus evaluaciones mediante los indicadores de desempeño presentados en la Tabla X, se ha realizado un análisis exhaustivo para identificar oportunidades de mejora en el proceso actual de compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Durante este proceso, se formularon las siguientes preguntas clave para explorar a fondo las áreas de mejora:

- ¿Cuál es la demanda actual y futura de compost en el campus y áreas circundantes?
- ¿Qué expectativas tienen los grupos de interés respecto al proceso de compostaje?
- ¿Cuáles son las limitaciones del sistema actual de compostaje y cómo podrían abordarse en un rediseño?
- ¿Cómo afecta el tiempo de liberación a la disponibilidad de la compostera?

Durante las visitas a las instalaciones universitarias y en las conversaciones con los interesados, se identificó la oportunidad de mejorar al reducir el tiempo del proceso de producción de compost. Esto permitirá estar preparados para responder eficazmente al aumento en la generación de residuos orgánicos y asegurar que las composteras estén disponibles para satisfacer las demandas de compostaje, sin comprometer la calidad del producto final.

En consecuencia, se han identificado controladores clave para asegurar que el rediseño del proceso de compostaje no solo cumpla con las expectativas del cliente, sino que también mejore la eficiencia operativa y promueva la sostenibilidad económica y ambiental de la compostera de la PUJ de Cali. A continuación, se presentan los controladores identificados: CTS, CTQ y CTC:

- **CTS (Critical To Satisfaction):** Satisfacción de los usuarios finales, aceptación dentro de la comunidad universitaria y cumplimiento de normativas ambientales. La implementación del sistema de secciones y la reducción del tiempo de liberación busca mejorar la experiencia de los usuarios y cumplir con las expectativas ambientales.
- **CTQ (Critical To Quality):** Calidad del compost producido, eficiencia en la descomposición de materiales orgánicos y control efectivo de olores. La introducción de una trituradora de residuos orgánicos y costales de polipropileno asegura una alta calidad del compost y un proceso más eficiente.
- **CTC (Critical To Cost):** Costos operativos, incluyendo personal, mantenimiento y expansión del sistema. La estructura de secciones y el calendario de operaciones buscan reducir los costos mediante un manejo más eficiente de los recursos y una operación continua.

Además, para complementar estos controladores clave identificados, se utilizó la herramienta Quality Function Deployment (QFD) o Casa de la Calidad para traducir de manera cuantitativa las expectativas y prioridades de las necesidades de los clientes, como se muestra en la Figura 13. Esto asegura que dichas expectativas sean contempladas en la propuesta de mejora del proceso de compostaje.

**Quality Function Deployment (QFD):** Utilizar la casa de la calidad para traducir las necesidades de los grupos de interés en requisitos técnicos. Esto incluye asegurar que las secciones de la compostera se alineen con las expectativas de los usuarios y las normativas ambientales:

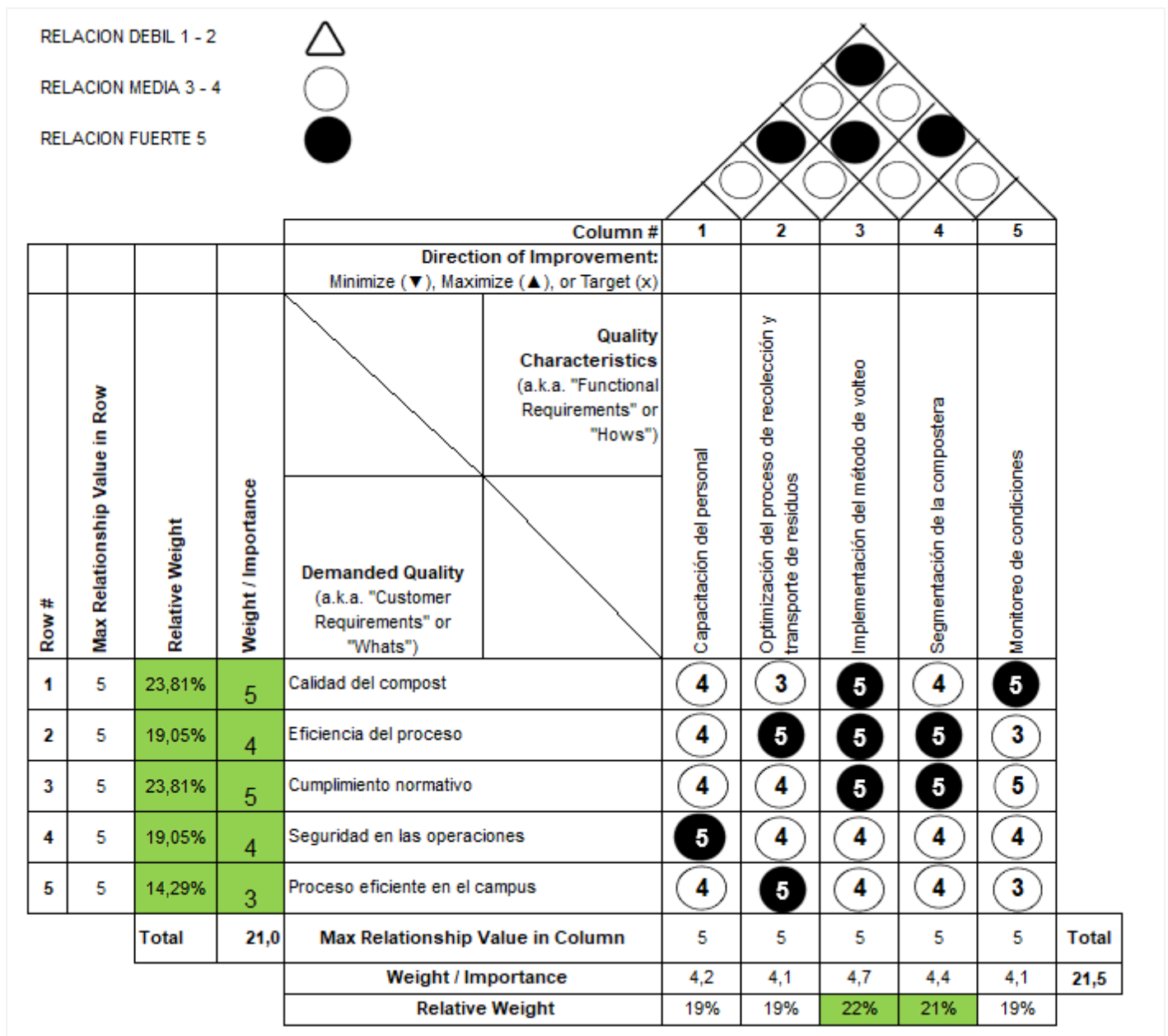


Figura 13. Diagrama QFD

El análisis del Despliegue de la Función de Calidad (QFD) para el proyecto de compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali revela las prioridades y relaciones clave entre los requisitos del cliente y las especificaciones de diseño. Los requisitos del cliente incluyen la calidad del compost (23.81%, puntuación 5), eficiencia del proceso (19.05%, puntuación 4), cumplimiento normativo (23.81%, puntuación 5), seguridad en las operaciones (19.05%, puntuación 4) y un proceso eficiente en el campus (14.29%, puntuación 3). Para satisfacer estos requisitos, se han identificado las siguientes especificaciones de diseño: capacitación del personal, optimización del proceso de recolección y transporte de residuos, implementación del método de volteo, segmentación de la compostera y monitoreo de condiciones.

La matriz central del QFD muestra cómo cada especificación de diseño se relaciona con los requisitos del cliente, utilizando símbolos para indicar la fuerza de la relación (relación fuerte: ●, relación media: ○). La capacitación del personal tiene una relación fuerte con la calidad del compost y el monitoreo de condiciones. La optimización del proceso de recolección y transporte de residuos tiene una relación fuerte con la eficiencia del proceso y el cumplimiento normativo. La implementación del método de volteo tiene una relación fuerte con la calidad del compost y la eficiencia del proceso. La segmentación de la compostera tiene una relación fuerte con la eficiencia del proceso.

El QFD también revela que la implementación del método de volteo (4.4, 22%) y la segmentación de la compostera (4.3, 21%) son las especificaciones más críticas debido a sus altas puntuaciones de relación y peso relativo. Estas especificaciones son esenciales porque el método de volteo mejora significativamente la eficiencia del proceso y la calidad del compost al permitir una mejor aireación y descomposición uniforme de los residuos orgánicos. Por otro lado, la segmentación de la compostera facilita la gestión del proceso de compostaje al permitir un control más preciso y eficiente de diferentes lotes de compost, reduciendo los tiempos de procesamiento y mejorando la consistencia del producto final.

Las relaciones son las siguientes:

- **Capacitación del personal:**

Relación con calidad del compost (5), eficiencia del proceso (4), cumplimiento normativo (5), seguridad en las operaciones (5) y proceso eficiente en el campus (4). Esta especificación tiene un valor alto en todos los aspectos críticos, lo que refuerza su importancia.

- **Optimización del proceso de recolección y transporte de residuos:**

Relación con calidad del compost (4), eficiencia del proceso (5), cumplimiento normativo (5), seguridad en las operaciones (5) y proceso eficiente en el campus (3). Esta especificación tiene una relación fuerte con la eficiencia del proceso y el cumplimiento normativo, subrayando su importancia para el éxito del proyecto.

- **Implementación del método de volteo:**

Relación con calidad del compost (4), eficiencia del proceso (4), cumplimiento normativo (5), seguridad en las operaciones (5) y proceso eficiente en el campus (5). Esta especificación es crítica para la calidad del compost y la eficiencia del proceso, justificada por su alta puntuación en todos los aspectos.

- **Segmentación de la compostera:**

Relación con calidad del compost (5), eficiencia del proceso (4), cumplimiento normativo (4), seguridad en las operaciones (4) y proceso eficiente en el campus (4). Esta especificación facilita un manejo más eficiente del compostaje, reflejado en su alta puntuación.

- **Monitoreo de condiciones:**

Relación con calidad del compost (4), eficiencia del proceso (5), cumplimiento normativo (4), seguridad en las operaciones (4) y proceso eficiente en el campus (3). El monitoreo es crucial para mantener la calidad y la eficiencia, lo que se refleja en su alta importancia relativa.

En resumen, para satisfacer los requisitos del cliente, se debe prestar especial atención a la implementación del método de volteo y la segmentación de la compostera debido a su impacto directo en la eficiencia del proceso y la calidad del compost. Estas especificaciones de diseño son cruciales para lograr un proceso de compostaje eficiente y de alta calidad en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.

## *B. Revisión de literatura*

En el caso del rediseño del proceso de compostaje en el campus de la universidad, se revisaron diversas fuentes que abordaban temas relacionados con el compostaje, la gestión de residuos orgánicos, y la implementación de prácticas sostenibles en entornos universitarios. A continuación, se presentan resumidamente algunos trabajos relevantes y sus contribuciones al objeto de estudio:

- **Aplicaciones de Métodos de Compostaje:**

Muhammad Ajmal et al. (2021) abordaron en su estudio el compostaje de pretratamiento de fermentación aeróbica a temperatura ultra alta, centrando su investigación en la optimización de parámetros, los mecanismos involucrados y la evaluación de la calidad del compost. El equipo de Ajmal demostró que el control preciso de la temperatura y la aireación durante la fase de fermentación aeróbica puede mejorar significativamente la calidad del compost producido. Estos hallazgos serán fundamentales para el rediseño del proceso de compostaje en el campus de la PUJ de Cali, permitiendo ajustar las variables del proceso para maximizar la descomposición de la materia orgánica y mejorar la calidad del compost final. [11]

Por otro lado, Krishna Chaitanya Maturi, Izharul Haq y Ajay S. Kalamdhad (2022) exploraron técnicas de compostaje para el aprovechamiento de residuos orgánicos en zonas urbanas de ciudades indias, proporcionando valiosa información sobre cómo gestionar de manera efectiva los residuos en contextos urbanos densamente poblados. Sus técnicas adaptadas a contextos urbanos serán consideradas para implementar un sistema de compostaje eficiente y escalable en el campus universitario, buscando reducir la huella de carbono y apoyar las iniciativas de sostenibilidad de la universidad.

La integración de los métodos y hallazgos de estos estudios en nuestro proyecto de compostaje en la PUJ de Cali apunta a una mejora sustancial en la gestión de residuos orgánicos y a la producción de compost de alta calidad, alineando las operaciones del campus con los estándares ambientales contemporáneos y las mejores prácticas de sostenibilidad.

El proyecto de grado en la ciudad de Bogotá para las instituciones educativas Celestin Freinet núcleo de los establecimientos educativos Gaitana, Tibabuyes Universal, Toscana, Centro Don Bosco V, Fe y Alegría, Nueva Gaitana, Alberto Lleras Camargo demuestra que la implementación del método de volteo puede reducir significativamente el tiempo de compostaje, mejorando la eficiencia y la calidad del compost producido. La reducción del tiempo de compostaje implica una menor necesidad de espacio y un manejo más rápido de los residuos orgánicos, beneficiando tanto al medio ambiente como a la gestión de residuos de la institución educativa.[12]

Por otro lado en el año 2023 "Definición de alternativas viables y sostenibles para la gestión y aprovechamiento de residuos alimenticios en Cajicá - Cundinamarca" fue realizado por Gelver Alexander Obando Muñoz, Oscar Javier Marquez Rodríguez y Germán Alberto Acevedo Gaitán. Descubrieron que Cajicá genera 24,000 toneladas de desechos anuales, de las cuales 4,800 son orgánicos. El compostaje con método de volteo, que asegura aireación y control de humedad y temperatura, se destacó por su viabilidad técnica y económica. Concluyeron que este método reduce el impacto ambiental y genera productos valiosos para la agricultura, lo que es esencial para rediseñar el compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali.[13]

- **Gestión de Residuos Orgánicos en Entornos Universitarios:**

La eficiencia en la gestión de residuos orgánicos es clave para las universidades, especialmente en los restaurantes universitarios, puntos críticos de generación de desechos. Daniela Andrea Vanegas Niño y Edisson Leonardo Poveda Cañón (2023) llevaron a cabo un estudio significativo en el que aplicaron la teoría de sistemas a la gestión de residuos en los restaurantes de la Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga. Este enfoque sistémico permitió identificar y optimizar los puntos clave en la cadena de gestión de residuos, desde la producción hasta su disposición final, garantizando un ciclo de manejo de desechos más sostenible y eficiente.

El análisis realizado por Vanegas Niño y Poveda Cañón (2023) es esencial para comprender los retos particulares de los entornos universitarios y aprovechar las oportunidades para mejorar la sostenibilidad operativa. Su estudio subraya la importancia de integrar todas las fases del manejo de residuos, destacando la necesidad de enfoques holísticos que abarquen desde la reducción en la fuente hasta el reciclaje y el compostaje, pasando por la educación y participación de la comunidad universitaria.

Incorporar las lecciones aprendidas de la investigación de Vanegas Niño y Poveda Cañón (2023) será vital para el proyecto de rediseño del proceso de producción de compost en la PUJ de Cali. Este proyecto busca establecer un sistema robusto que no solo gestione eficientemente los residuos orgánicos, sino que también promueva prácticas sostenibles dentro de la comunidad académica. La metodología adoptada por estos investigadores guiará la implementación de un proceso de compostaje que contribuya a los objetivos ecológicos y formativos de la universidad, reforzando así su compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental.

- **Implementación de Prácticas Sostenibles**

El compromiso con la sostenibilidad es un pilar en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, y este enfoque se refleja claramente en el Procedimiento para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) implementado en 2018. El PGIRS,

desarrollado por el Profesor de Gestión Ambiental, supervisado por el jefe de Recursos Físicos y aprobado oficialmente por el Vicerrector Administrativo, es una guía integral para gestionar residuos dentro del campus universitario. Este manual ha sido decisivo en la promoción de prácticas sostenibles, impactando positivamente tanto en la percepción como en la implicación activa de la comunidad universitaria en iniciativas de sostenibilidad.

- **Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS)**

El PGIRS ha establecido una estructura que permite a la comunidad universitaria participar de manera efectiva en la reducción, reutilización y reciclaje de residuos, fortaleciendo la conciencia ambiental y fomentando una cultura de responsabilidad ecológica. Según diversos estudios, los programas de gestión integral de residuos, como el PGIRS, son fundamentales para promover la sostenibilidad en los campus universitarios. La clara delineación de procedimientos y la definición de responsabilidades han facilitado una gestión de residuos coherente y alineada con los objetivos de sostenibilidad de la universidad.

- **Integración de Tecnologías Modernas**

La integración de tecnologías modernas, como sensores de temperatura y humedad, ha demostrado ser efectiva en mejorar la eficiencia del compostaje. Un estudio realizado por Sundberg et al. (2013) destaca que el monitoreo constante de variables como temperatura y humedad es crucial para mantener condiciones óptimas en el proceso de compostaje. Estas tecnologías permiten ajustes precisos que aseguran un ambiente adecuado para la descomposición de residuos orgánicos, resultando en compost de alta calidad. [14].

- **Participación Comunitaria y Educación Ambiental**

La participación de la comunidad universitaria es clave para el éxito de los programas de compostaje. Un estudio de Casey et al. (2018) indica que la educación y el involucramiento de estudiantes y personal son esenciales para fomentar prácticas sostenibles y garantizar el cumplimiento de los objetivos de gestión de residuos. La integración de talleres y actividades prácticas puede aumentar significativamente la conciencia y la participación en iniciativas de compostaje. [15]

### **Benchmarking y Mejores Prácticas**

El benchmarking, o análisis comparativo, es una herramienta valiosa para identificar y adoptar mejores prácticas en la gestión de residuos. Un estudio realizado por Gómez et al. (2019) sobre las mejores prácticas en compostaje en universidades españolas resalta la importancia de adaptar estrategias exitosas de otras instituciones a las necesidades específicas de cada campus. Esta práctica no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también promueve la innovación continua. [16]

- **Innovación y Mejora Continua**

La implementación de innovaciones, como el uso de costales de polipropileno y máquinas trituradoras, puede mejorar significativamente la eficiencia y calidad del compost. Un estudio de Larney et al. (2015) encontró que estas tecnologías permiten una descomposición más rápida y eficiente de los residuos orgánicos, produciendo un compost de mejor calidad. Además, la mejora continua del proceso mediante la incorporación de nuevas tecnologías y prácticas asegura la sostenibilidad a largo plazo. [17]

### *C. Exploración de ideas y selección de alternativa*

Después de analizar y estudiar el proceso de producción de compostaje en busca de oportunidades de mejora, se concluye que es necesario optimizar los subprocesos de maduración y liberación, ya que estos son los que más tiempo consumen y afectan la disponibilidad de las composteras. Una vez identificada este punto crítico, se debe realizar un estudio detallado de diferentes alternativas de solución, considerando los criterios y parámetros establecidos por el equipo de trabajo para elegir la mejor opción posible.

La **primera alternativa es el “Mejoramiento del proceso productivo actual”**, que implica refinar las prácticas existentes para aumentar la eficiencia del proceso de compostaje, enfocándose especialmente en reducir los tiempos de maduración y liberación sin la necesidad de adquirir nuevos equipos o infraestructura, ya que son estos los aspectos que más tiempo consumen en el proceso.

Como **segunda alternativa se encuentra la “Incorporación de equipos especializados”**, que consiste en la adquisición de maquinarias como trituradoras, volteadores de pilas y sistemas de riego automatizados, los cuales facilitarían las actividades y acelerarían el proceso de compostaje debido a la eficacia de estas herramientas.

En cuanto a la **tercera alternativa**, se considera la "**Ampliación o creación de nueva compostera**", dado el tiempo que conlleva el proceso de compostaje y la posibilidad de un aumento en la cantidad de residuos, lo cual podría llevar a la saturación de las composteras actuales, se propone ampliar el espacio físico mediante la construcción de una nueva instalación que incremente la capacidad de procesamiento de residuos orgánicos.

Y la **última alternativa** de solución es la "**Implementación de un nuevo tipo de compostera**", que implica adoptar un sistema de compostaje diferente y más avanzado que el actual, con la capacidad de ofrecer mejores resultados en términos de calidad del compost y eficiencia general del proceso.

Cada una de estas alternativas representa una oportunidad para mejorar los tiempos de producción de compostaje, pero no todas son igualmente viables de implementar debido a consideraciones como costos u otras restricciones impuestas tanto por la universidad como por las partes interesadas en el proyecto. Por lo tanto, se establecen criterios que faciliten la elección de la opción más factible y que también cumpla con los objetivos del proyecto. Estos criterios se detallan a continuación:

- **Eficiencia del proceso:** La habilidad de la alternativa para mejorar la transformación de residuos orgánicos en compost de alta calidad de manera eficaz.
- **Costo de Producción:** La inversión inicial y los costos operativos a largo plazo asociados con cada alternativa.
- **Ampliación:** El potencial de la alternativa para escalar el proceso de compostaje y su adaptabilidad a un volumen creciente de residuos.
- **Sostenibilidad de alternativa:** La viabilidad a largo plazo de la alternativa, incluyendo su impacto ambiental y alineación con los objetivos de sostenibilidad de la universidad.

Una vez definidas las alternativas y criterios, se aplica el método del Análisis Jerárquico AHP (Ver Anexo 7). Este método comienza con la evaluación de una matriz de comparaciones pareadas, donde se asignan pesos o prioridades numéricas basadas en la importancia relativa de cada criterio en relación con los demás, facilitando así la toma de decisiones informadas. Los resultados de este proceso se pueden observar en la Tabla XI.

TABLA XI. PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS

| CRITERIOS                        | PRIORIDADES |
|----------------------------------|-------------|
| Eficiencia del proceso           | 39%         |
| Costo de producción              | 25%         |
| Ampliación                       | 25%         |
| Sostenibilidad de la alternativa | 12%         |

Posteriormente, se elabora las matrices de comparación por pares para cada criterio con respecto a cada una de las alternativas. Los resultados de estas comparaciones se presentan en la Tabla XII.

TABLA XII. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS POR CRITERIOS

| ALTERNATIVAS                                  | EFICIENCIA DEL PROCESO | COSTO DE PRODUCCIÓN | AMPLIACIÓN | SOSTENIBILIDAD DE LA ALTERNATIVA |
|---|------------------------|---------------------|------------|----------------------------------|
| Mejoramiento del proceso productivo actual    | 32,29%                 | 38%                 | 40%        | 43%                              |
| Incorporación de equipos especializados       | 32,29%                 | 33%                 | 34%        | 23%                              |
| Ampliación o creación de nueva compostera     | 22,40%                 | 14%                 | 17%        | 21%                              |
| Implementación de un nuevo tipo de compostera | 13%                    | 14%                 | 10%        | 14%                              |

Después de completar las matrices de comparación por pares para los criterios y también para las alternativas, se procede a realizar la evaluación final utilizando el método AHP. En esta etapa, se multiplican los pesos de cada criterio por los pesos de cada alternativa correspondientes a ese criterio. Finalmente, se suman los resultados de cada alternativa para determinar cuál es la más viable. Los resultados de este proceso se muestran en la Tabla XIII.

TABLA XIII. EVALUACIÓN FINAL MATRIZ AHP

| ALTERNATIVAS                                  | TOTAL |
|---|-------|
| Mejoramiento del proceso productivo actual    | 37%   |
| Incorporación de equipos especializados       | 32%   |
| Ampliación o creación de nueva compostera     | 19%   |
| Implementación de un nuevo tipo de compostera | 13%   |

Tras la evaluación final, se determinó que la alternativa 1, "Mejoramiento del Proceso Productivo Actual", es la más adecuada para el proyecto. A pesar de que las otras alternativas presentan capacidades tecnológicas atractivas y potencial de expansión, se concluyó que optimizar el proceso actual es la opción más eficaz y rentable. Esta decisión se fundamentó en su consistencia operativa, menor costo de implementación y capacidad para generar mejoras significativas sin interrupciones. Esta estrategia se centra en mejorar el tiempo de liberación del compost, crucial para mantener una operación continua y eficiente. Al perfeccionar las prácticas existentes, la universidad avanza hacia sus metas de sostenibilidad, respaldando una gestión financiera responsable y asegurando la viabilidad a largo plazo del proyecto de compostaje.

#### D. Objetivos

##### Objetivo general:

Rediseñar el proceso de producción de compost en el campus de la PUJ de Cali para reducir el tiempo de liberación mediante el uso de herramientas de ingeniería de métodos con secciones controladas dentro de la compostera aumentando su disponibilidad.

##### Objetivos específicos:

- Evaluar el desempeño actual del proceso de producción de compostaje.
- Medir y analizar las variables que intervienen en el proceso para comprender su comportamiento.
- Diseñar un modelo o métodos de producción que permitan reducir los tiempos del proceso de compostaje.
- Validar el diseño propuesto para el proceso de compostaje de la PUJ.  
En caso de que no sea aplicable, se establece herramientas de control para garantizar su implementación.

### E. Plan de trabajo (PdT)

Con los objetivos definidos, se procede a planificar las actividades necesarias para presentar información analizada y configurada de acuerdo con las necesidades del proyecto y en línea con los objetivos establecidos. Estas actividades se detallan en la Tabla XIV y se planifican en el Anexo 9.

TABLA XIV. PLAN DE TRABAJO

| OBJETIVO   | ÁREA IISE                     | HERRAMIENTAS DE INGENIERÍA INDUSTRIAL   | ACTIVIDAD  | ENTREGABLE   | FECHA DE ENTREGA |
|--|-------------------------------|---|--|--|------------------|
| Evaluar el desempeño actual del proceso de producción de compostaje.                                 | Supply Chain Management       | VOC, Diagrama de Flujo e Histogramas  | Recopilación de información sobre el proceso de producción, como tiempos, fases, cantidades y medidas. | Archivo en Excel con los datos recolectados y diagrama de flujo. | 15/02/2024       |
| Medir y analizar las variables que intervienen en el proceso para comprender su comportamiento.      | Engineering Management        | Histogramas, VSM, Quality Function Deployment (QFD) o Casa de la Calidad, SIPOC | Identificar las variables del proceso y medirlas a través de cálculos matemáticos                      | Informe de análisis de variables con histogramas, SIPOC y QFD.   | 20/03/2024       |
| Diseñar un modelo o métodos de producción que permitan reducir los tiempos del proceso de compostaje | Work Design and Measurement   | Diseño de experimentos  | Desarrollar el diseño mejorado del proceso de compostaje.  | Diseño funcional del sistema de compostaje                       | 20/04/2024       |
| Validar el diseño propuesto para el proceso de compostaje de la PUJ.                                 | Engineering Economic Analysis | Análisis de costos y beneficios.  | Desarrollo de estimación de costos y beneficio.  | Análisis financiero de la alternativa                            | 20/05/2024       |
|  | Quality Control               | Plan de control   | Desarrollar un plan de seguimiento de los ciclos de la compostera                                      | Plan de seguimiento evaluado del sistema de compostaje           | 26/05/2024       |

## IV. DISEÑAR

### a. Desarrollo del diseño de la solución

Para el desarrollo del diseño de la alternativa seleccionada, que está enfocada en la reducción del tiempo de liberación. Esta alternativa incluye como primera solución la división de la compostera de la cancha de fútbol en tres secciones, que aparte de este método, incluye un Manual de procedimientos de liberación y alimentación, además de un Plan anual del sistema de compostaje, cómo se especifica más adelante en el diseño. Esta división aumentará su disponibilidad y eficiencia, no solo optimiza el proceso de compostaje, sino que también mejora la logística de manejo de residuos dentro del campus. Dividir la compostera en tres secciones ofrece múltiples beneficios desde la perspectiva de la ingeniería industrial, principalmente en términos de eficiencia operativa (tiempos de liberación y maduración), control de procesos y gestión de recursos.

La segunda solución es el método de volteo. Este método mejora la aireación, facilita el control de temperatura y humedad, y acelera la descomposición de los residuos orgánicos. A continuación, se detalla la configuración del diseño de la compostera y el método de volteo:

## División de la compostera de la cancha de fútbol

- **Flexibilidad operativa:** La separación en secciones permite gestionar los residuos de manera más efectiva. Cada sección puede ser manejada independientemente, facilitando la implementación de ciclos de maduración y liberación.
- **Aumento del uso del espacio:** Dado que los residuos de poda son voluminosos y pesados, dedicar las secciones 1 y 2 exclusivamente a estos residuos permite manejar grandes volúmenes de manera eficiente. Las cáscaras de frutas y vegetales y los conchos de café, que son menos voluminosos, se manejarán en la sección 3.
- **Proximidad y logística:** Ubicar la sección 3 cerca de los restaurantes de almendros reduce la distancia de transporte de los residuos de cáscaras de frutas y vegetales y los conchos de café, mejorando la eficiencia logística. Las secciones 1 y 2 están más cerca de las áreas verdes de la universidad, lo cual facilita la aplicación directa del compost en estas zonas.
- **Especificaciones del diseño:** La compostera mide 100 metros de largo, 1.5 metros de ancho y 1.5 metros de altura, dividida en tres secciones de 33.33 metros cada una. Esta división permite una gestión precisa y eficiente del proceso de compostaje.

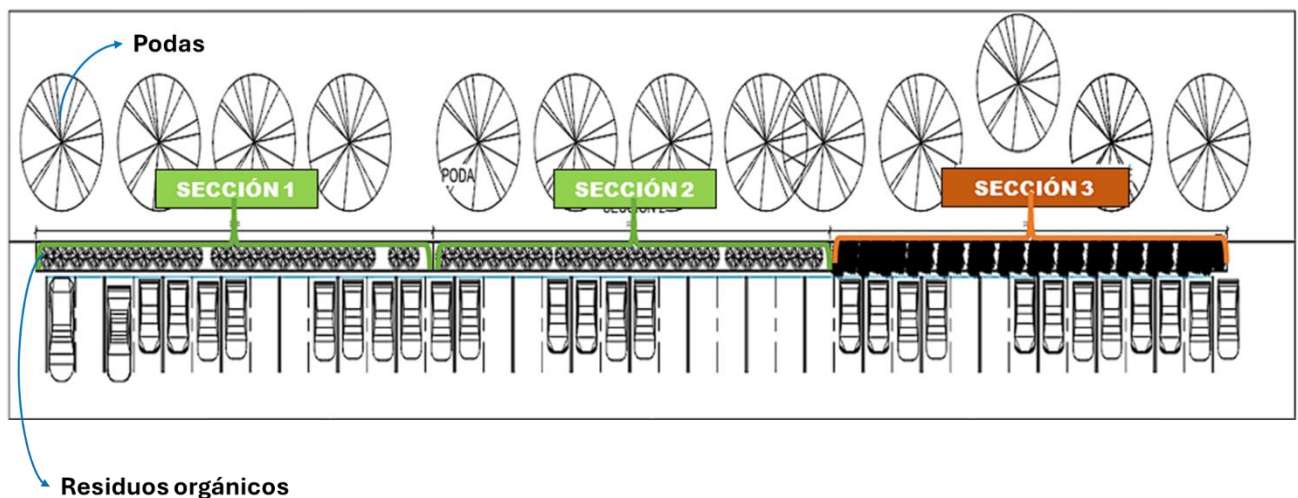


Figura 14. Plano y mediciones del rediseño de las 3 secciones de la compostera de la cancha de fútbol de la PUJ Cali.

## Método de volteo como complemento a la estructuración propuesta de la compostera

- **Frecuencia del volteo:** Realizar volteos de compost al menos dos veces por semana durante las primeras cuatro semanas del proceso de compostaje. Posteriormente, se puede reducir a una vez por semana. Este incremento en la frecuencia de volteo es efectivo para reducir la humedad inicial de los sustratos, logrando una mayor tasa de degradación de la materia orgánica y manteniendo temperaturas de higienización por períodos más prolongados.
- **Reducción del tiempo de compostaje:** La mayor frecuencia de volteo reduce la duración de las fases mesofílica, termofílica y de enfriamiento en un 20%. Esto permite que el compost esté listo para su liberación en menos tiempo.
- **Control de humedad y temperatura:** El volteo frecuente ayuda a mantener una humedad óptima y a distribuir el calor generado durante el proceso, evitando la formación de zonas anaerobias y mejorando la aireación del compost.

### Aspectos para considerar:

- **Preparación:** Verificar las condiciones del compost (temperatura, humedad y nivel de descomposición).
- **Volteo manual o mecánico:** Utilizar herramientas adecuadas, como rastrillos y palas, o equipos mecánicos, como buggies con implementos de volteo, para mezclar y voltear el compost. Esto asegura que los residuos de la parte superior e inferior se mezclen adecuadamente.
- **Monitoreo:** Después de cada volteo, registrar las condiciones del compost para asegurar que el proceso de descomposición se mantenga dentro de los parámetros óptimos. Es importante mantener la humedad del compost por encima del 40% para una descomposición eficiente.

#### b. Validación del diseño propuesto

Para validar el diseño propuesto, se optó por utilizar los datos disponibles proporcionados por el área de Gestión Ambiental, los cuales corresponden al modelo actual. Esta metodología permite realizar una comparación directa y facilita el análisis del método de volteo, al proporcionar una sólida base de información histórica y actual sobre la producción de compost. Al emplear datos existentes, se pueden identificar mejoras y evaluar con precisión la efectividad del nuevo método, asegurando que cualquier cambio observado sea atribuible a las modificaciones implementadas.

Es importante destacar que debido a restricciones de permisos y las dimensiones de las composteras, así como la rigurosidad en los tiempos establecidos, no fue factible realizar una prueba piloto en la universidad. No obstante, para cumplir con los objetivos del proyecto, se llevó a cabo una simulación o análisis matemático con un estudio de sensibilidad basado en los datos recopilados de fuentes primarias y secundarias. Este enfoque permitió aplicar variables relevantes al proceso y obtener resultados significativos.

Luego de investigar fuentes secundarias y considerar similitudes con el proceso actual, se confirma que el método seleccionado efectivamente reduce el tiempo de liberación de la compostera como parte integral de su diseño, mejorando la eficiencia del proceso de descomposición aeróbica. Este enfoque optimiza la aireación, facilita el control de temperatura y humedad, y acelera la descomposición de residuos orgánicos. Estudios indican que aumentar la frecuencia de volteo puede reducir el tiempo total de compostaje hasta en un 20%, lo cual mejora notablemente la eficiencia del proceso. Además, investigaciones recientes destacan que una mayor frecuencia de volteo incrementa la tasa de degradación de la materia orgánica, demostrando la efectividad de esta técnica en el compostaje.[18]

Sin embargo, esta mejora en la capacidad también conlleva un aumento en los costos laborales. Los operarios deben trabajar con mayor frecuencia en la compostera, lo que incrementa las horas de trabajo en un 20% para mantener la equidad.

Para evaluar la efectividad de este método en la mejora del proceso, se consideraron los datos de producción de compost en la cancha de fútbol (ver Anexo 3) y las siguientes variables clave:

- **Producción de Compost:** Cantidad estimada de compost generada a partir de los residuos ingresados.

$$(1) \text{ Producción de compost (kg)} = 30\% (R. Poda + R. cáscaras de frutas y vegetales + C. Café)$$

- **Maduración del Compost:** Tiempo necesario para que el compost alcance la condición deseada en tres meses.

$$(2) \text{ Maduración del compost} = (90 \text{ días en producirse el compost} \times 80\%) / 30 \text{ días}$$

- **Liberación o Uso del Compost:** Tiempo requerido para vaciar o utilizar completamente el compost producido, medido en meses, días o años.

$$(3) \text{ Liberación o Uso del Compost:} = (30 \text{ días tiempo de utilizar por completo el compost} \times 80\%) / 30 \text{ días}$$

- **Tiempo de Ciclo del Lote:** Suma de los tiempos de maduración y uso del compost producido.

$$(4) \text{Tiempo de ciclo del lote} = \text{Maduración del compost} + \text{Liberación del compost}$$

- **Lotes por Año:** Número de lotes producidos anualmente según el tiempo de ciclo del lote.

$$(5) \text{Lotes por año} = 12 \text{ meses} / \text{Tiempo de ciclo del lote}$$

- **Kilogramos por Lote:** Cantidad de compost en kilogramos generada por la compostera en cada situación, basado en un promedio estandarizado de datos recolectados durante el periodo 2022-2023, estimado en 787 kg por lote.

$$(6) \text{Kilogramos por lote} = \text{Lotes por año} * \text{Cantidad de compost a producir}$$

- **Capacidad de producción:** Capacidad de la compostera medida en kg/año.

$$(7) \text{Capacidad de producción} = \text{Kilogramos por Lotes} * \text{Lotes por año}$$

A continuación, en la Tabla XV se presentan los resultados de las variables definidas, obtenidos a partir de los cálculos matemáticos realizados tras la implementación de la propuesta:

TABLA XV. PROCESO LIBERACIÓN DEL COMPOST

| PROCESO DE LIBERACION DEL COMPOST             |             |               |                              |
|---|-------------|---------------|------------------------------|
| Subproceso                                    | Cantidad    | Unidades      | Tiempo de Ciclo              |
| Maduración del compost (P.T)                  | 2.4         | mes           | <b>MEJORA</b><br>3.2         |
| <b>Liberación o uso del compost producido</b> | <b>0.80</b> | <b>mes</b>    |                              |
| Tiempo de ciclo del lote                      | 3.20        | mes           | <b>ANTES</b><br>4            |
| Lotes x año                                   | 3.75        | lotes/año     |                              |
| Kilogramos por lote                           | 984.1       | kg x lote     | <b>% DE MEJORA</b><br>25.00% |
| <b>Capacidad</b>                              | <b>3690</b> | <b>kg/año</b> |                              |

Como se puede observar, la capacidad de compost producido en kilogramos por año aumentó. Con el sistema actual, se producían 2,361.87 kilogramos por año, mientras que, con la mejora en la producción, la capacidad aumentó a 3,690 kilogramos por año. Otro beneficio de esta implementación fue la reducción del tiempo de maduración, que pasó de 3 meses a 2.4 meses. Además, el tiempo de liberación se redujo de 1 mes a 0.8 meses, lo que equivale a 24 días.

Teniendo en cuenta que se realizó un rediseño del proceso de compostaje actual, es fundamental que los participantes del proceso comprendan cómo llevar a cabo sus actividades con la nueva propuesta. Por ende, se elaboró un Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación, así como un Plan Anual, que servirán como herramientas clave para asegurar el cumplimiento de los nuevos procedimientos, además de tener ya estandarizado estos documentos para las personas que se incorporan al proceso.

### Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación

El "Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación" es un documento esencial que describe en detalle los pasos necesarios para alimentar la compostera, recolectar los residuos, y gestionar la liberación del compost maduro diseñado por medio de la herramienta 3d de renderización a escala real, Enscape, este documento se encuentra en el Anexo 10. La importancia de este manual asegura que todos los operarios y responsables del proceso sigan un protocolo estándar, garantizando la eficiencia y los métodos involucrados en el proceso del compost.

### Recolección y Transporte de Residuos:

- **Residuos de Poda:** Los residuos de poda son generados principalmente en las zonas verdes de la universidad. Los operarios utilizan rastrillos y palas para agrupar estos residuos voluminosos. Una vez agrupados, se cargan en bolsas de recolección para facilitar su transporte. Para grandes volúmenes, se utiliza un buggy, que es un vehículo pequeño y versátil adecuado para transportar los residuos desde las zonas verdes hasta las Secciones 1 y 2 de la compostera. Antes de depositar los residuos en la compostera, se utiliza un triturador de residuos orgánicos que reduce significativamente su volumen, facilitando así su manejo y acelerando el proceso de descomposición.
- **Cáscaras de Frutas y Vegetales:** Los restaurantes de almendros son los principales generadores de cáscaras de frutas y vegetales. Estos residuos se recogen diariamente y se almacenan en bolsas de recolección. Estas bolsas son luego transportadas en buggy hasta la Sección 3 de la compostera. Al llegar, los residuos se distribuyen de manera uniforme en la sección, utilizando rastrillos para asegurarse de que la capa de residuos sea homogénea, lo que favorece una descomposición uniforme y eficiente.
- **Conchos de Café:** Las oficinas administrativas y Starbucks generan conchos de café, que son recolectados en bolsas de recolección. Estas bolsas, al igual que las de cáscaras de frutas y vegetales, son transportadas en buggy hasta la Sección 3. Al llegar, los operarios vacían las bolsas en la compostera y utilizan rastrillos para mezclar los conchos de café con otros residuos orgánicos, asegurando una adecuada distribución que facilita la descomposición.



Figura 15. Renders sobre la recolección de los residuos para la compostera de la cancha de fútbol

### Alimentación de la Compostera

Durante los semestres académicos, la compostera se alimenta diariamente, durante el semestre académico (enero-junio y agosto-diciembre). Este proceso es fundamental para mantener un flujo continuo de materiales orgánicos que se descomponen y se transforman en compost. En las Secciones 1 y 2, dedicadas a los residuos de poda, los operarios distribuyen los residuos triturados de manera uniforme utilizando rastrillos. En la Sección 3, los residuos de cáscaras de frutas y vegetales y los conchos de café se mezclan cuidadosamente para garantizar una descomposición eficiente. Este proceso de alimentación diaria se lleva a cabo durante todo el semestre académico, asegurando una continua aportación de materia orgánica.

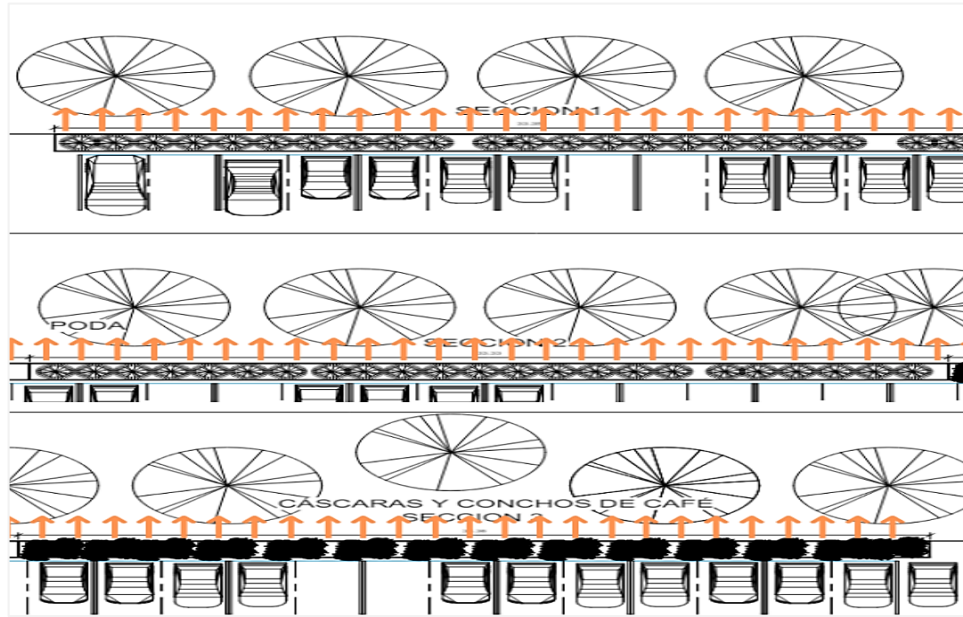


Figura 16. Renders sobre la alimentación de la compostera de la cancha de fútbol



Figura 17. Renders sobre la alimentación de la compostera de la cancha de fútbol

### Procedimientos de Liberación

Durante los primeros diez días de cada mes, se procede a la liberación de la Sección 1. Los operarios utilizan palas para recolectar el compost maduro, separando la capa superior de residuos orgánicos que aún no se han descompuesto completamente. Los rastrillos facilitan el movimiento y agrupamiento del compost, que luego se carga en el buggy. Este vehículo transporta el compost recolectado hacia las zonas verdes o áreas de almacenamiento, según sea necesario.

Cada sección de la compostera pasa por un periodo de maduración de tres meses. Al finalizar este periodo, se inicia la fase de liberación. Esta fase está organizada en bloques de diez días por sección, para cada sección, completando un ciclo de treinta días, lo que facilita una liberación ordenada y eficiente.

**Días 1-10:** Liberación de la Sección 1.

**Días 11-20:** Liberación de la Sección 2.

**Días 21-30:** Liberación de la Sección 3.

El mismo procedimiento se repite para la Sección 2 durante los días 11-20 del mes y para la Sección 3 durante los días 21-30. Esta organización permite una rotación eficiente y asegura que cada sección esté vaciada y realimentada de manera continua.

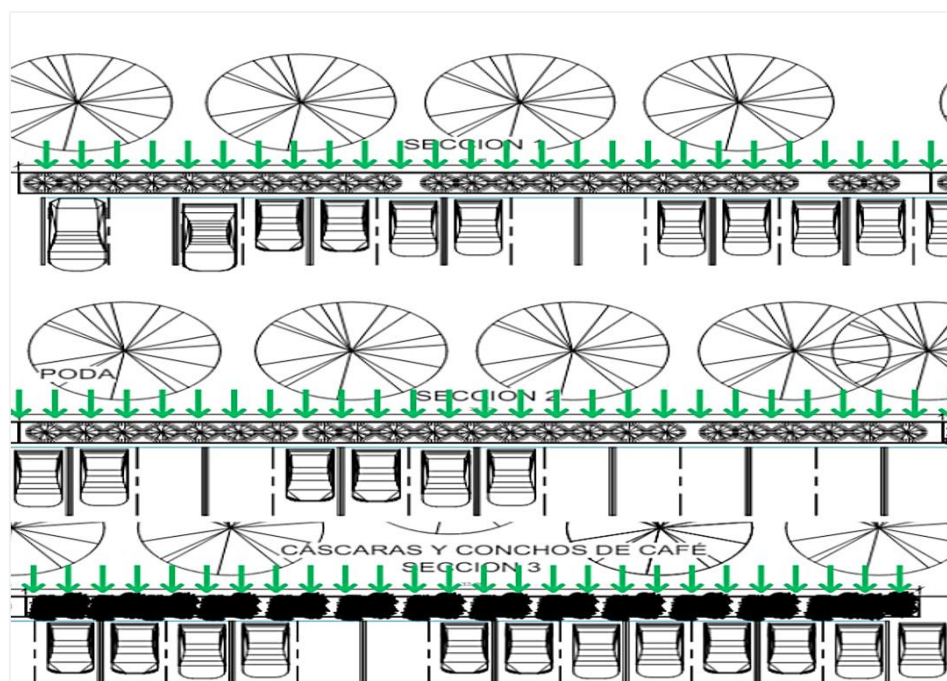


Figura 18. Plano indicativo sobre la liberación de la compostera de la cancha de fútbol

### Post-Liberación

Inmediatamente después de la liberación de cada sección, esta se rellena con nuevos residuos orgánicos, reiniciando así el ciclo de maduración. Este proceso asegura que siempre haya compost en diferentes etapas de maduración, aumentando la disponibilidad en la compostera.

### Plan Anual del Sistema de Compostaje

El Plan Anual del Sistema de Compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali está diseñado para asegurar un flujo continuo y eficiente de la producción de compost. El plan se basa en un calendario detallado que organiza las fases de alimentación y liberación de la compostera a lo largo del año. Este enfoque garantiza que cada sección de la compostera esté activa en diferentes etapas del proceso de compostaje, monitoreando así, el uso del espacio y los recursos.

### Calendario Detallado para 2025

El calendario se estructura en ciclos de maduración y liberación, con tres ciclos principales a lo largo del año. Cada ciclo incluye un periodo de maduración de tres meses seguido de un periodo de liberación de un mes.

- **Primer Ciclo**

El primer ciclo del año comienza en enero, cuando se inicia la primera fase de liberación. Durante los primeros diez días del mes, se procede a liberar y realimentar la Sección 1. Este proceso implica el uso de palas y rastrillos para recolectar el compost maduro y mover la capa superior de residuos orgánicos. El compost recolectado se transporta en buggys hacia las zonas verdes o áreas de almacenamiento, utilizando costales de polipropileno para mantener su calidad. Una vez completada la liberación de la Sección 1, se procede de manera similar con las Secciones 2 y 3, durante los días 11-20 y 21-30, respectivamente. Al finalizar el mes, todas las secciones están realimentadas con nuevos residuos orgánicos, preparados para el siguiente ciclo de maduración que se extiende desde el 1 de febrero hasta el 30 de abril. Durante este periodo, se mantiene una alimentación diaria de residuos de poda en las Secciones 1 y 2, y cáscaras y conchos de café en la Sección 3.

- **Segundo Ciclo**

El segundo ciclo comienza en mayo con la segunda fase de liberación. Similar al primer ciclo, la liberación de la Sección 1 ocurre del 1 al 10 de mayo, seguida de la Sección 2 del 11 al 20 de mayo, y la Sección 3 del 21 al 30 de mayo. Este proceso asegura que cada sección esté vaciada y realimentada de manera continua. El compost recolectado se gestiona de manera eficiente, utilizando las mismas herramientas y métodos de transporte. Tras completar la fase de liberación, se inicia el segundo periodo de maduración, que va del 1 de junio al 31 de agosto. Durante estos tres meses, se sigue con la rutina de alimentación diaria en todas las secciones, asegurando un flujo constante de materia orgánica.

- **Tercer Ciclo**

El tercer y último ciclo del año comienza en septiembre. La liberación de la Sección 1 se realiza del 1 al 10 de septiembre, seguida de la Sección 2 del 11 al 20 de septiembre, y la Sección 3 del 21 al 30 de septiembre. Este proceso sigue el mismo protocolo que los ciclos anteriores, garantizando la eficiencia y la calidad del compost producido. El compost recolectado se transporta y almacena utilizando los mismos métodos, asegurando que el proceso se mantenga consistente. Después de la fase de liberación, se inicia el tercer periodo de maduración, que se extiende desde el 1 de octubre hasta el 31 de diciembre. Durante estos meses, se mantiene la rutina de alimentación diaria, completando así el ciclo anual de compostaje.

### **Procedimientos de Alimentación**

La recolección y transporte de residuos se manejan cuidadosamente para facilitar el proceso de compostaje. Los residuos de poda, que provienen de las zonas verdes de la universidad, se recogen utilizando rastrillos y palas, se agrupan y se transportan en buggys hasta las Secciones 1 y 2 de la compostera. Estos residuos se trituran antes de ser depositados, lo que reduce su volumen y facilita su descomposición. Las cáscaras de frutas y vegetales, generadas principalmente en los restaurantes de almendros, se recogen en bolsas de recolección y se transportan en buggys hasta la Sección 3. Estos residuos se distribuyen uniformemente utilizando rastrillos para asegurar una descomposición eficiente. Los conchos de café, recolectados de las oficinas administrativas y Starbucks, se transportan de manera similar y se mezclan adecuadamente con otros residuos en la Sección 3.

### **Procedimientos de Liberación**

La preparación para la liberación es una parte crucial del proceso. Cada sección de la compostera pasa tres meses de maduración, al final de la fase de liberación. Este proceso está organizado en bloques de diez días por sección, garantizando una liberación ordenada y eficiente. Durante la liberación, los operarios utilizan palas para recolectar el compost maduro y rastrillos para agruparlo.

El Plan Anual del Sistema de Compostaje asegura que el proceso de producción de compost en la PUJ de Cali sea eficiente, sostenible y alineado con los objetivos de reducción del tiempo de liberación y aumento de la disponibilidad de compost. El cronograma detallado, junto con los procedimientos de alimentación y liberación, garantiza un flujo continuo de compost de alta calidad, contribuyendo significativamente a las iniciativas de sostenibilidad del campus. Este enfoque sistemático y organizado monitorea el uso de los recursos y el espacio y asegura que el compost producido cumple con los más altos estándares de calidad, proporcionando un valioso recurso para mantener las áreas verdes y otras aplicaciones agrícolas.

TABLA XVI. KPI'S DE LAS VARIABLES DESPUES DE LA APLICACIÓN

| VARIABLE                               | ACTUAL   |           | PROPUESTO |           | ÍNDICE DE EFECTIVIDAD DE LA PROPUESTA |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------------------|
|  | Cantidad | Unidades  | Cantidad  | Unidades  |                                       |
| Tipos de residuos                      |          |           |           |           |                                       |
| Maduración del compost (P.T)           | 3        | mes       | 2,4       | mes       | 20%                                   |
| Liberación o uso del compost producido | 1        | mes       | 0,8       | mes       | 20%                                   |
| Tiempo de ciclo del lote               | 4        | mes       | 3,2       | mes       | 20%                                   |
| Lotes x año                            | 3        | lotes/año | 3,8       | lotes/año | 25%                                   |
| Kilogramos por lote                    | 787      | kg x lote | 984       | kg x lote | 25%                                   |
| Capacidad                              | 2362     | kg/año    | 3690      | kg/año    | 56%                                   |

La tabla presentada muestra los KPI's del proceso de manejo de compost, esenciales para evaluar y monitorear la eficiencia y efectividad de este proceso. Los KPI's son fundamentales porque proporcionan datos cuantificables que permiten identificar áreas de mejora, medir el progreso hacia objetivos específicos y tomar decisiones informadas basadas en el rendimiento actual y proyectado. En cuanto a la maduración del compost (P.T), se propone reducir el tiempo actual de 3 meses a 2.4 meses, logrando una mejora del 20%, lo que acelera el ciclo de producción y aumenta la disponibilidad de compost. La liberación o uso del compost producido se reduciría de 1 mes a 0.8 meses, también con una mejora del 20%, facilitando una gestión más ágil del producto final. El tiempo de ciclo del lote se optimizaría de 4 meses a 3.2 meses, representando una mejora del 20%, lo que permite completar más lotes en el mismo período de tiempo, incrementando la capacidad de producción. Los lotes por año aumentarían de 3 a 3.8, con una mejora del 25%, lo que significa una producción más frecuente de compost, fundamental para satisfacer una mayor demanda. El peso de kilogramos por lote se incrementaría de 787 kg a 984 kg, mejorando un 25%, lo que maximiza la eficiencia del proceso de compostaje al producir más compost por cada lote. Finalmente, la capacidad total aumentaría de 2362 kg/año a 3690 kg/año, logrando una mejora del 56%, lo que demuestra un impacto positivo significativo en la capacidad de producción y manejo de compost. Estos indicadores son vitales para garantizar un proceso eficiente y efectivo, alineado con los objetivos de sostenibilidad y optimización de recursos.

## VI. VERIFICAR

### a. Medición de los impactos

#### Impacto Social

El rediseño del sistema de compostaje no solo es una estrategia para gestionar residuos orgánicos, sino que también actúa como un catalizador de cambio social positivo. La reducción del tiempo de liberación y el aumento de la disponibilidad de la compostera tienen un impacto significativo en la comunidad universitaria y más allá.

La calidad de vida de la comunidad universitaria mejora al proporcionar un entorno más limpio y saludable. La implementación de secciones en la compostera y el eficiente manejo del tiempo de liberación aseguran que los residuos orgánicos se procesen de manera continua y efectiva, reduciendo la acumulación de residuos y minimizando los olores. Esto crea un ambiente más agradable para todos los que trabajan y estudian en el campus.

La sostenibilidad se integra en las operaciones cotidianas de la universidad, inculcando prácticas verdes que los estudiantes pueden llevar más allá del campus. El conocimiento y la experiencia adquiridos a través de este proyecto sensibilizan a los estudiantes sobre la importancia del compostaje y la gestión de residuos, fomentando un compromiso con prácticas sostenibles a lo largo de sus vidas.

El fortalecimiento comunitario se observa en la colaboración entre estudiantes, personal y administración para mantener y mejorar el sistema de compostaje. La participación en el proceso de compostaje promueve un sentido de responsabilidad compartida y cooperación entre todos los miembros de la comunidad universitaria.

El compost de alta calidad también se puede distribuir a comunidades locales, ayudando a mejorar la fertilidad del suelo y apoyando la agricultura urbana. La implementación de costales de polipropileno para el almacenamiento del compost asegura que este se mantenga en óptimas condiciones hasta su uso, beneficiando a las comunidades que lo reciben. Esto refuerza el vínculo entre la universidad y la sociedad, demostrando el compromiso de la universidad con la sostenibilidad y la mejora del entorno local.

La igualdad se promueve al brindar a todos los miembros de la comunidad el mismo beneficio del mejoramiento ambiental. Al asegurar una gestión eficiente y equitativa de los residuos orgánicos, todos los estudiantes y el personal pueden disfrutar de un campus más limpio y verde. Además, la proximidad de las secciones de la compostera a las principales fuentes de residuos facilita la participación de todos, independientemente de su ubicación en el campus.

#### **Fomento de los ODS:**

- **Calidad de vida y educación (ODS 3 y 4):** Al mejorar la gestión de residuos y crear un entorno de aprendizaje sobre prácticas sostenibles, el proyecto contribuye a garantizar una vida saludable y promueve oportunidades de aprendizaje continuo.
- **Sostenibilidad y ciudades sostenibles (ODS 11):** Al mejorar la infraestructura de gestión de residuos, el proyecto hace que la universidad y su entorno sean más sostenibles, contribuyendo a la creación de comunidades y ciudades resilientes y sostenibles.
- **Alianzas para lograr los objetivos (ODS 17):** Fomenta la colaboración entre estudiantes, personal y la comunidad local para promover prácticas sostenibles, trabajando en alianzas para alcanzar los ODS.

#### **Impacto Ambiental**

El proyecto de rediseño del proceso de compostaje tiene un efecto neto positivo en el medio ambiente, principalmente al convertir desechos orgánicos en compost, lo cual reduce significativamente la cantidad de residuos destinados a vertederos y, en consecuencia, la generación de metano, un potente gas de efecto invernadero. Al implementar un sistema de compostaje más eficiente mediante la reducción del tiempo de liberación y el aumento de la disponibilidad de la compostera, se garantiza que los residuos orgánicos se procesen de manera continua.

El compostaje en el campus mejora la calidad del suelo al proporcionar nutrientes esenciales que promueven la biodiversidad y la salud del ecosistema. El compost producido actúa como un hábitat rico en nutrientes para microorganismos beneficiosos, lo que enriquece la vida microbiana y contribuye a un suelo más saludable y fértil. Este proceso respalda la sostenibilidad de los recursos naturales al reducir la necesidad de fertilizantes químicos, que son sustituidos por el compost producido en el campus. Esto no solo reduce los costos para la universidad, sino que también disminuye la contaminación de cuerpos de agua por escorrentías de fertilizantes químicos, minimizando el impacto negativo en la vida silvestre local y promoviendo un entorno más equilibrado y sostenible.

El rediseño del sistema de compostaje, que incluye el uso de un método de volteo y la división de la compostera en secciones, facilita un manejo más preciso y controlado del compostaje. Esto mejora la eficiencia del ciclo de compostaje, reduce los residuos no procesados y asegura que el proceso sea más rápido y efectivo. Además, la proximidad de las secciones a las fuentes de residuos minimiza el transporte y las emisiones de carbono asociadas.

En resumen, el rediseño del sistema de compostaje contribuye a una gestión más eficiente de los residuos orgánicos y tiene un impacto ambiental positivo significativo. Al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del suelo, promover la biodiversidad y disminuir la dependencia de fertilizantes químicos, este proyecto no solo avanza los objetivos de sostenibilidad de la universidad, sino que también establece un modelo replicable de prácticas ambientales responsables.

#### **Fomento de los ODS:**

- **Conservación de la vida terrestre (ODS 15):** Al transformar los desechos orgánicos en compost, se promueve la regeneración del suelo y se contribuye a la vida terrestre saludable y sostenible.

- **Acción por el clima (ODS 13):** El proceso de compostaje disminuye la generación de metano en los vertederos, contribuyendo directamente a la lucha contra el cambio climático.
- **Agua limpia y saneamiento (ODS 6):** Al reducir la necesidad de fertilizantes químicos a través del compostaje, se protegen los cuerpos de agua de la contaminación por nitratos y fosfatos.
- **Producción y consumo responsables (ODS 12):** El proyecto enfatiza la importancia del reciclaje y el uso eficiente de los recursos, promoviendo prácticas de consumo y producción sostenibles.

## **Análisis Financiero**

Para llevar a cabo el análisis financiero del proyecto, es fundamental aclarar que la alternativa de solución propuesta no requiere inversión de capital por parte de la Universidad. En su lugar, el análisis debe considerar los costos y gastos derivados de las actividades necesarias para el funcionamiento y mantenimiento de la compostera, así como los beneficios (ahorros) obtenidos por la reducción de los tiempos de producción y la liberación del uso de las demás composteras, con excepción de la ubicada en la cancha de fútbol.

La viabilidad del proyecto se evaluará determinando si los ahorros generados serán suficientes para cubrir los compromisos adquiridos y hasta qué punto el proyecto será rentable. Para recopilar la información financiera necesaria, se contó con la colaboración del personal del área medioambiental de la Universidad.

Entre las variables consideradas para calcular los costos totales se incluyen los costos operativos, tales como la mano de obra, el consumo energético y de combustible necesario para el funcionamiento de las máquinas trituradoras, así como la adquisición de maquinaria y herramientas manuales. Además, se incluyen otros costos como el mantenimiento de la infraestructura utilizada. Estos datos se obtuvieron de manera anual con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre el costo en pesos de la implementación del rediseño y el costo anual actual de la disposición final de los residuos orgánicos.

## **Costos y Gastos del Proyecto**

- **Costos por Mano de Obra**

En la producción interviene el personal interno de la Universidad, especializado en actividades de jardinería. El salario de este personal está determinado por las políticas de la Universidad y las leyes laborales colombianas. Para calcular el costo mensual de los jardineros, se consideraron las prestaciones sociales establecidas por el gobierno nacional para el año 2024. Los porcentajes correspondientes a cada prestación son los siguientes:

- Pensión: 12%
- Salud: 8,5%
- ARL Nivel 3: 2,436%
- Caja de Compensación: 4%
- ICBF: 3%
- SENA: 2%
- Prima: 8,33%
- Cesantías: 8,33%
- Intereses de Cesantías: 1%
- Vacaciones: 4,17%

Estas prestaciones sociales se suman al salario base de los jardineros, incrementando el costo total de la mano de obra. A continuación, se detallan los cálculos para determinar el costo mensual total por cada jardinero, teniendo en cuenta el salario base y los porcentajes de cada prestación.

Es importante destacar que estos costos son esenciales para garantizar que el personal especializado reciba una compensación justa y cumpla con todas las regulaciones laborales vigentes, asegurando la sostenibilidad y la legalidad del proyecto.

*TABLA XVII. COSTO MANO DE OBRA JARDINEROS MENSUAL*

| <b>MANO DE OBRA JARDINEROS MENSUAL</b> |               |                 |              |                     |
|--|---------------|-----------------|--------------|---------------------|
| <b>Descripción</b>                     | <b>Unidad</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Valor</b> | <b>Costo total</b>  |
| Salario mensual jardineros             | Mes           | 1               | \$ 1.600.000 | \$ 1.600.000        |
| Salud                                  | Mes           | 1               | \$ 136.000   | \$ 136.000          |
| Pensión                                | Mes           | 1               | \$ 192.000   | \$ 192.000          |
| ARL riesgo nivel 3                     | Mes           | 1               | \$ 38.976    | \$ 38.976           |
| Caja de compensación familiar          | Mes           | 1               | \$ 64.000    | \$ 64.000           |
| Subsidio de transporte                 | Mes           | 1               | \$ 162.000   | \$ 162.000          |
| Vacaciones                             | Mes           | 1               | \$ 66.720    | \$ 66.720           |
| Prima de servicios                     | Mes           | 1               | \$ 146.775   | \$ 146.775          |
| Cesantías                              | Mes           | 1               | \$ 146.775   | \$ 146.775          |
| Intereses de cesantías                 | Mes           | 1               | \$ 17.613    | \$ 17.613           |
| <b>TOTAL</b>                           |               |                 |              | <b>\$ 2.570.858</b> |

La siguiente tabla muestra de manera detallada el costo real de un operario de la compostera, desglosado en costos mensuales, diarios y por hora.

*TABLA XVIII. COSTO REAL DE UN JARDINERO*

| <b>DESCRIPCIÓN</b>          | <b>VALOR</b> |
|-----------------------------|--------------|
| Costo real operario mensual | \$ 2.570.858 |
| Costo real operario diario  | \$ 85.695    |
| Valor hora operario         | \$ 10.712    |

### **Costos de Mano de Obra de Actividades de Mantenimiento**

Basado en el cálculo anterior de la mano de obra de los jardineros, se logra construir el costo total por el mantenimiento de la compostera. Este cálculo se basa en la cantidad de horas que los jardineros dedican a diversas actividades para asegurar el correcto funcionamiento del proceso productivo en la compostera. A continuación, se muestra en detalle las actividades y de los costos mensuales derivados de las mismas:

TABLA XIX. COSTO DE MANTENIMIENTO

| COSTO DE MANTENIMIENTO                  |                  |            |           |                   |
|---|------------------|------------|-----------|-------------------|
| Descripción de actividad                | Duración (horas) | Jardineros | Costo     | Costo mensual     |
| Recolección de hojas                    | 2                | 3          | \$ 57.130 | \$ 228.521        |
| Esparcimiento de hojas en la compostera | 0,4              | 3          | \$ 14.283 | \$ 57.130         |
| Cosecha de compost                      | 0,4              | 2          | \$ 9.522  | \$ 9.522          |
| Empacado de compost                     | 1                | 2          | \$ 19.043 | \$ 19.043         |
| Recolección concesionarios              | 0,2              | 2          | \$ 4.761  | \$ 142.825        |
| <b>TOTAL</b>                            |                  |            |           | <b>\$ 457.041</b> |

### Costos por Compra de Maquinaria y Equipos

En el proceso productivo los jardineros utilizan diversas máquinas y equipos que facilitan las actividades necesarias para el compostaje. Estos elementos son fundamentales para asegurar la eficiencia y eficacia del proceso, pero también tienen una vida útil limitada, lo que requiere su reemplazo periódico para mantener la calidad del funcionamiento.

A continuación, se detalla cada una de las herramientas y equipos utilizados, su vida útil y el costo de compra:

TABLA XX. COSTO MAQUINARIA Y EQUIPOS

| MAQUINARIA Y EQUIPOS                  |          |                 |                 |                  |
|---------------------------------------|----------|-----------------|-----------------|------------------|
| Descripción                           | Cantidad | Vida útil meses | Precio unitario | Costo mensual    |
| Buggy                                 | 2        | 18              | \$ 279.900      | \$ 15.550        |
| Herramientas manuales (palas)         | 1        | 6               | \$ 50.900       | \$ 8.483         |
| Herramientas manuales (rastrillo)     | 1        | 6               | \$ 30.900       | \$ 5.150         |
| Herramientas manuales (otros equipos) | 1        | 6               | \$ 56.350       | \$ 9.392         |
| <b>TOTAL</b>                          |          |                 |                 | <b>\$ 38.575</b> |

### Costos por Consumo de Energía

La empresa Celsia es el proveedor contratado por la Universidad para el suministro de energía, por ende, para el cálculo de los costos de consumo es importante partir de las tarifas establecidas por kilovatio hora (kWh) que este proveedor aplica a un cliente comercial no regulado.

La tarifa total de energía es de \$501,32 COP por kWh. De esta cifra, el componente más significativo es el cargo por generación de energía, que asciende a \$306,65 COP por kWh. Este valor representa el costo de producir la energía consumida por la universidad. A continuación, se desglosan los demás componentes de la tarifa:

- Cargo por uso de sistemas de transmisión (STN): \$57,10 COP por kWh. Este cargo cubre el costo de transportar la energía desde las plantas generadoras hasta las subestaciones de distribución.
- Cargo por uso de sistemas de distribución local (SDL): \$97,78 COP por kWh. Este monto cubre el costo de llevar la energía desde las subestaciones hasta los puntos de consumo en la universidad.
- Cargo por comercialización: \$5,71 COP por kWh. Este cargo incluye los costos de gestión y administración del suministro de energía.
- Pérdidas de generación: \$16,40 COP por kWh. Estas pérdidas reflejan las ineficiencias en la producción de energía.
- Pérdidas de STN: \$2,25 COP por kWh. Este valor representa las pérdidas en la transmisión de energía.
- Cargo por restricciones: \$7,86 COP por kWh. Este costo cubre las limitaciones operativas en el sistema eléctrico.

- Otros costos menores: Estos incluyen cargos asociados a CND (\$1,56 COP), ASIC (\$0,55 COP), SSPD (\$0,89 COP), CREG (\$0,08 COP) y EMCALI-CPROG (\$4,49 COP), sumando un total de \$7,57 COP por kWh.

La tabla a continuación proporciona una descripción detallada de estos costos, permitiendo una visión clara de cómo se desglosa cada concepto.

TABLA XXI. TARIFA KWH

| <b>Tarifas Celsia (kWh) para un cliente no regulado comercial</b> |                       |
|---|-----------------------|
| <b>Conceptos</b>  | <b>Valor unitario</b> |
| Generación  | \$ 306,65             |
| Comercialización  | \$ 5,71               |
| Uso STN   | \$ 57,10              |
| Uso SDL   | \$ 97,78              |
| Perdidas generación   | \$ 16,40              |
| Perdidas STN  | \$ 2,25               |
| Restricciones   | \$ 7,86               |
| CND   | \$ 1,56               |
| ASIC  | \$ 0,55               |
| SSPD  | \$ 0,89               |
| CREG  | \$ 0,08               |
| EMCALI-CPROG  | \$ 4,49               |
| <b>TOTAL</b>  | <b>\$ 501,32</b>      |

### Costo de Consumo de Energía de las Trituradoras TR 500T

Las trituradoras de residuos orgánicos TR 500T cumplen un papel importante en el proceso productivo, ya que son el medio por el cual de triturar los residuos orgánicos para facilitar su descomposición y posterior conversión en compost. Este compost se utiliza en las áreas verdes y jardines de la universidad, contribuyendo a manejar los residuos y mejorando la calidad del suelo.

Partiendo de la tarifa para el consumo de energía, el análisis del consumo energético de las trituradoras de residuos orgánicos permite una evaluación detallada de los costos operativos asociados al uso de estas máquinas. Cada trituradora TR 500T opera a 16 caballos de fuerza (HP), lo que equivale a 11.93 kilovatios (KW).

Para comprender mejor el impacto del consumo energético, consideremos los tiempos de uso promedio de las trituradoras:

- Uso diario: 0.13 horas
- Uso semanal: 0.89 horas
- Uso mensual: 3.56 horas

Con una tarifa de \$501,32 COP por kilovatio hora (kWh), podemos calcular el consumo energético mensual y el costo correspondiente por máquina:

### Consumo energético mensual por máquina:

Consumo mensual = 11.93 KW × 3.56 horas = 42.42 kWh

**Costo energético mensual por máquina:**

Costo mensual = 42.42 kWh × 501.32 COP/kWh = 21,267 COP

Estos cálculos revelan que el consumo energético mensual de cada trituradora asciende a 42.42 kWh, lo que se traduce en un costo mensual de \$21,267 COP por máquina. Este costo se multiplica por el número de trituradoras en operación para obtener el costo total de energía.

*TABLA XXII. COSTO ENERGETICO MAQUINAS TRITURADORAS*

| Descripción                            | Costo mensual       |
|--|---------------------|
| Horas uso diario                       | \$ 0,13             |
| Horas uso semanal                      | \$ 0,89             |
| Horas uso mensual                      | \$ 3,56             |
| Consumo HP máquina                     | \$ 16,00            |
| Caballo de fuerza a unidad de potencia | \$ 0,75             |
| Conversión HP a KW                     | \$ 11,93            |
| Tarifa kilovatio hora                  | \$ 501,32           |
| Consumo kilovatio mes                  | \$ 42,42            |
| <b>TOTAL</b>                           | <b>\$ 21.267,02</b> |

**Costos de Materiales (Combustible)**

Las trituradoras para su operación hacen el consumo de gasolina, es por esta razón que a continuación se calcula el costo a incurrir por la compra de este material. En la tabla se muestran los precios por galón según las estaciones de servicio Terpel.

*TABLA XXIII. CALCULO GALON GASOLINA PROMEDIO*

| Calculo precio galón gasolina promedio |                     |
|--|---------------------|
| Terpel MAYAPAN                         | \$ 15.540,00        |
| Terpel AUTOPISTA                       | \$ 15.490,00        |
| Terpel INGENIO                         | \$ 15.540,00        |
| Terpel CIUDAD 2000                     | \$ 15.740,00        |
| Terpel PASOANCHO                       | \$ 15.470,00        |
| Terpel EL TRIUNFO                      | \$ 15.610,00        |
| Terpel SILOE                           | \$ 16.200,00        |
| <b>PROMEDIO</b>                        | <b>\$ 15.655,71</b> |

## Costo de Consumo de Combustible de las Trituradoras TR 500T

Cada trituradora puede tener 16.6 litros de combustible, de los que consumen 5 litros por hora. Los jardineros operan 3.6 horas al mes, resultando en un consumo total de 18 litros mensuales. Esto equivale aproximadamente a 4.75 galones de combustible al mes. A un precio de \$15,656 COP por galón, el gasto mensual en combustible se estima en \$73,525 COP.

TABLA XXIV. CALCULO CONSUMO GASOLINA MENSUAL

| Consumo gasolina mensual     |                     |                 |
|------------------------------|---------------------|-----------------|
| Descripción                  | Cantidad            | Unidades        |
| 1 litro                      | \$ 0,26             | Litros          |
| Capacidad tanque trituradora | \$ 16,60            | Litros          |
| Consumo medio 2 trituradoras | \$ 5,00             | Litros/hora     |
| Horas mensual uso maquinas   | \$ 3,56             | Horas / mes     |
| Consumo kilovatio mes        | \$ 42,42            | Kilovatio / mes |
| Consumo x mes litros         | \$ 17,78            | Litros / mes    |
| Consumo galones mes          | \$ 4,70             | Galón / mes     |
| Precio galón                 | \$ 15.655,71        |                 |
| <b>TOTAL</b>                 | <b>\$ 73.525,36</b> |                 |

## Otros Costos

La inversión en mantenimiento y capacitación es crucial para la sostenibilidad y éxito del proyecto, permitiendo una gestión eficiente de los recursos y promoviendo prácticas sostenibles en la gestión de residuos orgánicos.

TABLA XXV. OTROS COSTOS

| Otros costos mensuales |          |                 |                      |
|------------------------|----------|-----------------|----------------------|
| Descripción            | Cantidad | Precio unitario | Costo total          |
| Mantenimiento mes      | 1        | \$ 125.000,00   | \$ 125.000,00        |
| Capacitación personal  | 6        | \$ 6.944,44     | \$ 41.666,67         |
| <b>TOTAL</b>           |          |                 | <b>\$ 166.666,67</b> |

En las siguientes tablas se explica el origen de los costos de mantenimiento y capacitación:

TABLA XXVI. ORIGEN COSTOS MANTEINIMIENTO Y CAPACITACIÓN

| Desglose mantenimiento compostera |  |
|-----------------------------------|--|
| Elemento                          | Detalle  |
| Descripción del Servicio          | Revisión de composteras para evaluar su estado físico, reparación de partes, inspecciones. |
| Proveedor del Servicio            | Personal interno o proveedor externo especializado.  |
| Frecuencia del Mantenimiento      | 1 visita mensual (12 visitas anuales).   |
| Costo Desglosado                  | Mano de obra y materiales: \$125,000 por visita. Total: \$1,500,000 anual.                 |
| Capacitación del personal         |  |
| Elemento                          | Detalle  |
| Tipo de Capacitación              | Manejo de equipos, protocolos de seguridad en el trabajo, manejo del compostaje.           |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Duración de la Capacitación  | Una sesión de 1.5 horas cada 2 meses, 6 sesiones anuales.              |
| Costo por Persona            | \$6,944.44 por persona por sesión. Total: \$41,666.67 para 6 personas. |
| Proveedor de la Capacitación | Personal interno o proveedor externo especializado en compost.         |

### Resumen del Costo Total de la Operación en la Compostera de la cancha de futbol

Repasados cada uno de los conceptos a considerar en los costos del proyecto, se consolidan para calcular el costo total de la operación de la compostera en un mes y también en un año.

En la tabla siguiente se resumen los costos:

TABLA XXVII. RESUMEN DE COSTOS

| Resumen de costos        |                        |
|--------------------------|------------------------|
| Descripción              | Costo total            |
| Mano de obra             | \$ 457.041,45          |
| Maquinaria y equipos     | \$ 38.575,00           |
| Consumo de energía       | \$ 21.267,02           |
| Gasolina de trituradoras | \$ 73.525,36           |
| Otros costos             | \$ 166.666,67          |
| <b>TOTAL / MES</b>       | <b>\$ 757.075,49</b>   |
| <b>TOTAL / AÑO</b>       | <b>\$ 9.084.905,91</b> |

### Beneficios del Proyecto

El nuevo diseño y metodología de volteo implica cambios en los parámetros e indicadores del proceso de producción de la compostera. Por un lado, los costos de la mano de obra presentan un ligero aumento a causa de la frecuencia con la que los jardineros deberán realizar las actividades relacionadas al método de volteo y la segmentación de la compostera.

### Reducción de Costos

Los conceptos analizados durante el apartado 5.1. sufrieron cambios relacionados con la frecuencia en la que se realizarán cada actividad del proceso productivo de compostaje.

A continuación, se presentan los cambios en cada uno de los frentes:

Con el rediseño la cantidad de jardineros se redujo en 1 para cada una de las actividades, lo que ocasiona que este componente se redujera en total en \$ 111.879,94 con respecto a los costos presentados en el apartado de “Costos de Mano de Obra de Actividades de Mantenimiento”.

TABLA XXVIII. REDUCCIÓN DE COSTO MANTENIMIENTO

| Costo mantenimiento                     |                  |            |           |               |
|---|------------------|------------|-----------|---------------|
| Descripción de actividad                | Duración (horas) | Jardineros | Costo     | Costo mensual |
| Recolección de hojas                    | 2                | 2          | \$ 47.608 | \$ 190.434    |
| Esparcimiento de hojas en la compostera | 1                | 2          | \$ 11.902 | \$ 47.608     |
| Cosecha de compost                      | 1                | 1          | \$ 5.951  | \$ 5.951      |
| Empacado de compost                     | 1                | 1          | \$ 11.902 | \$ 11.902     |

|                            |     |   |          |                   |
|----------------------------|-----|---|----------|-------------------|
| Recolección concesionarios | 0,3 | 1 | \$ 2.976 | \$ 89.266         |
| <b>TOTAL</b>               |     |   |          | <b>\$ 345.162</b> |

Caso contrario para el componente de maquinaria y equipos en el que ahora se deberá hacer uso frecuente de las máquinas y herramientas por lo que acortarán el ciclo de vida útil. Este cambio aumentó el costo de este concepto en \$ 9.643,75 con respecto al costo presentado en el apartado de “Costos por Compra de Maquinaria y Equipos”

TABLA XXIX. REDUCCIÓN DE COSTO MAQUINARIA Y EQUIPOS

| Maquinaria y equipos                  |          |                 |                 |                  |
|---------------------------------------|----------|-----------------|-----------------|------------------|
| Descripción                           | Cantidad | Vida útil (Mes) | Precio unitario | Costo total      |
| Buggy                                 | 2        | 14              | \$ 279.900      | \$ 19.438        |
| Herramientas manuales(palas)          | 1        | 5               | \$ 50.900       | \$ 10.604        |
| Herramientas manuales(rastrillo)      | 1        | 5               | \$ 30.900       | \$ 6.438         |
| Herramientas manuales (otros equipos) | 1        | 5               | \$ 56.350       | \$ 11.740        |
| <b>TOTAL</b>                          |          |                 |                 | <b>\$ 48.219</b> |

En cuanto a los componentes de consumo de energía y combustible por las trituradoras, no presentan variación ya que las actividades en las que intervienen no se modificarán en su frecuencia. Por tanto, los costos seguirán siendo de \$ 21.267,02 y de \$ 73.525,36 respectivamente. Por último, el componente de otros costos, al igual que los anteriores componentes, no presenta ninguna variación.

De esta manera se presenta en la siguiente tabla el resumen y la comparación de los costos en ambos escenarios. En donde se aprecia que el rediseño permite reducir los costos en un 13,50%

TABLA XXX. COMPARATIVO COSTOS

| Comparativo de costos |                   |                   |               |
|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Descripción           | Diseño actual     | Rediseño          | % Variación   |
| Mano de obra          | \$ 457.041        | \$ 345.162        | 24,48%        |
| Maquinaria y equipos  | \$ 38.575         | \$ 48.219         | -25,00%       |
| Consumo energía       | \$ 21.267         | \$ 21.267         | 0,00%         |
| Consumo gasolina      | \$ 73.525         | \$ 73.525         | 0,00%         |
| Otros costos          | \$ 166.666        | \$ 166.667        | 0,00%         |
| <b>TOTAL</b>          | <b>\$ 757.075</b> | <b>\$ 654.839</b> | <b>13,50%</b> |

### Ahorro por Utilización de Composteras

Para entender el origen ahorro que genera la aplicación de la propuesta de rediseño y la metodología de volteo. La siguiente tabla permite comparar el estado actual versus el estado futuro de la producción de compost en una compostera.

TABLA XXXI. PROCESO DE PRODUCCION CANCHA DE FUTBOL ACTUAL VS PROPUESTO

| <b>PROCESO DE PRODUCCIÓN CANCHA DE FUTBOL DISEÑO ACTUAL - PROPUESTO</b> |                      |                 |               |
|---|----------------------|-----------------|---------------|
| <b>Subproceso</b>   | <b>Diseño actual</b> | <b>Rediseño</b> | <b>Unidad</b> |
| Maduración del compost (P.T)  | 3,00                 | 2,40            | Mes           |
| Liberación o uso del compost producido                                  | 1,00                 | 0,80            | Mes           |
| Tiempo de ciclo del lote  | 4,00                 | 3,20            | Mes           |
| Lotes x año   | 3,00                 | 3,75            | Lotes/año     |
| Kilogramos por lote   | 787,29               | 984,11          | Kg/lote       |
| <b>CAPACIDAD</b>  | <b>2.361,87</b>      | <b>3.690,42</b> | <b>Kg/año</b> |
| <b>DEMANDA UNIVERSIDAD</b>  | <b>3.600</b>         |                 | <b>Kg/año</b> |

Como se observa gracias a la reducción del 20% del tiempo de producción la capacidad de una compostera aumentó en un 56.26% pasando de producir 2.361,87 kg/año a 3.960,42 kg/año. Ahora bien, partiendo de que la demanda de compost en la Universidad es de 300 kg/mes o 3.600 kg/año, podemos concluir que se requiere de una sola compostera para atender dicha necesidad.

TABLA XXXII. DEMANDA DE COMPOST UNIVERSIDAD

|   |                |
|---|----------------|
| Demanda universidad anual                         | 3600 kg/año    |
| Diseño actual                                     | 2361,87 kg/año |
| Diseño propuesto                                  | 3690 kg/año    |
| % De generación modelo actual cancha de futbol    | 66%            |
| % De generación modelo propuesto cancha de futbol | 103%           |

La tabla muestra una comparación entre la demanda anual de compost de la universidad y la capacidad de producción del diseño actual y el diseño propuesto para la cancha de fútbol. La universidad requiere 3,600 kg de compost al año. Sin embargo, el diseño actual de la compostera solo produce 2,361.87 kg de compost al año, lo que significa que cubre únicamente el 66% de la demanda anual de la universidad. En contraste, el diseño propuesto tiene una capacidad de producción de 3,690 kg de compost al año. Esto no solo satisface la demanda anual de la universidad, sino que también excede ligeramente la demanda, alcanzando un 103% de la generación requerida. En resumen, el diseño propuesto es significativamente más eficiente y capaz de satisfacer completamente las necesidades de compost de la universidad, superando la capacidad del diseño actual.

El equipo del proyecto propone a la Universidad dedicar el esfuerzo (económico y de mano de obra) a una sola compostera como lo es la de la cancha de futbol suspendiendo el uso de las otras 8 existentes en el campus. Según esta definición, los ahorros que se generarían por una respuesta positiva de los dirigentes de la Universidad.

A continuación, la siguiente tabla explica en términos económicos el beneficio de la suspensión de las composteras:

TABLA XXXIII. BENEFICIO ECONOMICO DISEÑO

| <b>Beneficio económico</b>                               |                      |                |
|--|----------------------|----------------|
| <b>Descripción</b>                                       | <b>Total</b>         | <b>Unidad</b>  |
| Autoconsumo compost (demanda)                            | 3.600                | Kg/año         |
| Capacidad de producción                                  | 3.690                | Kg/año         |
| Numero composteras necesarias                            | 1                    | Compostera/año |
| Costo mantenimiento 1 compostera (diseño actual)         | \$ 757.075           | Mes            |
| Costo mantenimiento 1 compostera (diseño actual)         | \$ 9.084.906         | Año            |
| <b>Costo mantenimiento 9 composteras (diseño actual)</b> | <b>\$ 81.764.153</b> | <b>Año</b>     |
| Costo mantenimiento 1 compostera (rediseño)              | \$ 654.839,30        | Mes            |

|  |                         |            |
|--|-------------------------|------------|
| Costo mantenimiento 1 compostera (rediseño)  | \$ 7.858.071,65         | Año        |
| <b>Ahorro suspensión 8 composteras</b>       | <b>\$ 74.098.618,23</b> | <b>Año</b> |
| <b>Disminución porcentual en gasto anual</b> | <b>91%</b>              | <b>Año</b> |

Como conclusión al análisis financiero se determina que el proyecto en términos económicos es viable para su implementación.

*b. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control)*

**Plan de Control del Proceso de Compostaje**

El Plan de Control, Manual del Usuario y el Manual de procedimientos de liberación y alimentación son componentes esenciales para garantizar que la solución de compostaje rediseñada satisface las necesidades planteadas y se mantiene operativa de manera consistente y eficiente. Estos documentos proporcionan directrices claras y estructuradas para la operación diaria, el monitoreo, el mantenimiento y la mejora continua del proceso de compostaje.

**Manual de procedimientos de liberación y alimentación**

El Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación asegura la consistencia en el rediseño del proceso de compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. Este plan guía la operación estándar, estructurada de la siguiente manera: Para garantizar la eficiencia y calidad del proceso de compostaje, se han definido parámetros clave y procedimientos operativos estándar. Los inputs críticos incluyen los tipos y volúmenes de residuos orgánicos, como residuos de poda, conchos de café y cáscaras de frutas y vegetales. Los outputs críticos se refieren a la cantidad de compost producido, que debe cumplir con los estándares de calidad en nutrientes y ausencia de contaminantes.

Los procedimientos operativos estándar detallan cada etapa del proceso de compostaje, desde la recolección y transporte de residuos hasta la maduración y liberación del compost. Esto incluye técnicas y herramientas para monitorear y controlar el proceso, como el uso de palas, rastrillos y buggys. Además, se ha establecido un calendario específico para la alimentación de residuos en las secciones 1, 2 y 3 conforme al Plan Anual del Sistema de Compostaje, asegurando una distribución equilibrada y eficiente de los residuos en las diferentes etapas del proceso. Un componente clave de estos procedimientos es el método de volteo, que implica el volteo regular de los residuos para asegurar una aireación adecuada y acelerar la descomposición. La implementación del volteo mejora significativamente la eficiencia del proceso y la calidad del compost final.

En conjunto, estos parámetros y procedimientos aseguran que el proceso de compostaje sea eficiente, sostenible y capaz de producir compost de alta calidad, cumpliendo con los objetivos de gestión de residuos orgánicos de la universidad.

**Cronograma de Mantenimiento:**

Para asegurar la eficiencia y calidad en el proceso de compostaje en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali, se han establecido varios procedimientos operativos estándar. Estos incluyen el uso y mantenimiento de las composteras y la máquina trituradora, así como procedimientos de limpieza regulares para los equipos y áreas de compostaje. Además, se han definido protocolos para la reparación y el reemplazo de equipos defectuosos, asegurando que todos los componentes del sistema operen de manera óptima.

Se han seleccionado indicadores clave de desempeño (KPI's) para monitorear y evaluar el proceso de compostaje, tales como el tiempo de liberación, que mide el tiempo desde el inicio hasta la finalización de la liberación en cada sección, y la cantidad de compost producido en kilogramos. También se evalúa la eficiencia operativa, considerando el tiempo y los recursos utilizados para cada operación. Estos indicadores se registran y analizan periódicamente mediante hojas de cálculo, permitiendo un seguimiento continuo del desempeño.

*c. Conclusiones*

El proyecto de rediseño del proceso de producción de compost en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali logró exitosamente su objetivo principal de reducir el tiempo de liberación del compost, aumentando así la disponibilidad de la compostera. Este rediseño, que incluyó la implementación de secciones controladas y un calendario estructurado (Plan anual de sistema de compostaje), permitió una liberación eficiente y aumentó significativamente la capacidad de producción anual.

Uno de los factores clave en el éxito de este proyecto fue la implementación del método de volteo regular y la reorganización de la compostera en secciones. Estas mejoras resultaron en una reducción del 20% en los tiempos de compostaje, permitiendo así un mayor rendimiento y eficiencia en el uso del espacio disponible. Este enfoque no solo optimizó el proceso, sino que también contribuyó a una disminución significativa de los costos operativos, al reducir el tiempo necesario para la maduración del compost y mejorar la ergonomía del trabajo.

El uso de un archivo de Excel como Manual de Usuario y el Manual de Procedimientos permitió monitorear y ajustar el proceso de manera continua, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo costos asociados a la gestión de residuos. La mejora en la ergonomía y la disminución de las distancias de transporte dentro del campus también se tradujeron en ahorros considerables de tiempo y recursos.

Finalmente, este proyecto marca un avance significativo en la sostenibilidad y eficiencia operativa de la gestión de residuos orgánicos en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. La implementación de mejoras, como el método de volteo y la reorganización de la compostera en secciones, ha resultado en una reducción del 20% en los tiempos de compostaje. Esta reducción optimiza el uso de recursos, mejora la capacidad de producción anual y disminuye costos operativos.

Al establecer un precedente para futuras iniciativas, tanto dentro de la universidad como en otras instituciones, este proyecto demuestra un liderazgo estratégico en prácticas ambientales innovadoras. La eficiencia operativa mejorada y la promoción de una cultura de responsabilidad ambiental refuerzan el compromiso de la universidad con la sostenibilidad. Este modelo replicable y adaptable tiene el potencial de generar un impacto positivo sustancial en la gestión de residuos a nivel institucional y comunitario.

#### *d. Recomendaciones*

**Reestructuración Física de la Compostera de la cancha de fútbol:** Se recomienda reemplazar el diseño de guadua por materiales más duraderos como el concreto, que proporcionen mayor solidez y resistencia a las condiciones físicas de la compostera, mejorando así su longevidad y funcionalidad.



*Figura 19. Pilas Mixtas – Modelos de Compostaje a mediana escala por EarthGreen*

**Implementos de Seguridad Industrial:** Es crucial dotar al personal encargado del manejo del sistema de compostaje con el equipo de protección adecuado, incluyendo guantes, gafas de seguridad y mascarillas, para garantizar un manejo seguro de los residuos y evitar riesgos laborales.

**Método de Volteo:** Actualmente, el método de volteo se utiliza para mejorar la eficiencia del compostaje. Este método implica voltear regularmente los residuos en la compostera para asegurar una aireación adecuada y acelerar el proceso de descomposición. El volteo frecuente ayuda a mantener las condiciones óptimas de humedad y temperatura, promoviendo una descomposición más rápida y uniforme de los residuos orgánicos. Este proceso aumenta la capacidad de la compostera y mejora la calidad del compost producido.

**Actualización del Manual de Procedimientos y Plan Anual:** Mantener actualizados el manual de procedimientos y el plan anual, adaptándolos a mejoras continuas y necesidades cambiantes. Estos documentos deben ser claros y accesibles para todos los operadores.

**Educación y Participación Comunitario:** Promover la participación de la comunidad universitaria a través de talleres, charlas y actividades educativas para aumentar la conciencia ambiental y la colaboración en el manejo de residuos.

**Monitoreo y Evaluación Continuo:** Implementar un sistema de monitoreo y evaluación constante para identificar mejoras y adaptarse a nuevos desafíos. Revisar periódicamente los KPI y realizar ajustes basados en datos.

**Investigación y Desarrollo Fomentar** proyectos de investigación y desarrollo para innovar en el sistema de compostaje. Colaborar con otras instituciones y buscar financiamiento para explorar nuevas tecnologías aplicadas al compostaje.

## VII. GLOSARIO

- Compostaje: Proceso aeróbico de descomposición de materia orgánica para mejorar el suelo y proporcionar nutrientes. (FAO)
- Compostera: Caja utilizada para transformar residuos orgánicos en compost.
- PGIRS: Plan municipal o regional para la gestión de residuos sólidos, estableciendo objetivos, metas y recursos.
- Residuos Crudos de Cáscaras de Frutas y Vegetales: Desechos orgánicos de frutas, verduras y material de poda.
- Microorganismos: Organismos diminutos esenciales para la descomposición en el compostaje, como bacterias y hongos.
- Descomposición Aeróbica: Proceso de descomposición en presencia de oxígeno, realizado por microorganismos aeróbicos.
- Descomposición Anaeróbica: Proceso de descomposición en ausencia de oxígeno, realizado por microorganismos anaeróbicos.
- Humedad: Cantidad de agua en la mezcla de compostaje, crucial para la actividad microbiana.
- Aireación: Proceso de proporcionar oxígeno a la mezcla de compostaje, generalmente mediante el volteo.
- Temperatura: Factor crítico que afecta la velocidad de descomposición y la actividad microbiana.
- pH: Medida de la acidez o alcalinidad de la mezcla de compostaje, que afecta la actividad microbiana.
- Maduración del compost es el tiempo que tarda en producirse el compost en 3 meses.
- Diseño de Experimentos (DOE): Método para determinar las relaciones entre factores que afectan un proceso y su resultado.

- QFD (Quality Function Deployment): Herramienta para transformar necesidades del cliente en requisitos técnicos.
- Benchmarking: Comparación de procesos, productos o servicios con las mejores prácticas de la industria.
- CTQ (Critical To Quality): Características clave que aseguran la calidad y satisfacción del cliente.
- CTC (Critical To Cost): Factores críticos para controlar los costos en un proyecto o proceso.
- CTS (Critical To Satisfaction): Características clave para garantizar la satisfacción del cliente.
- Prototipo: Versión inicial de un producto o sistema para pruebas y evaluaciones.
- Validación: Proceso de aseguramiento de que un producto o sistema cumple con los requisitos especificados.
- Lean Six Sigma: Metodología para eliminar desperdicios y reducir variabilidad en los procesos.

## VIII. REFERENCIAS

- [1] “Los reyes del compostaje, ellos lideran la gestión de residuos orgánicos » Hablemos del Campo”. Hablemos del Campo. Accedido el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.hablemosdelcampo.com/los-reyes-del-compostaje-ellos-lideran-la-gestion-de-residuos-organicos/>
- [2] “Localización campus de la Pontificia Universidad Javeriana Cali”, Google Maps, 2023. [En línea] Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Pontificia+Universidad+Javeriana+Cali>
- [3] “Campus | Pontificia Universidad Javeriana, Cali”. Inicio | Pontificia Universidad Javeriana, Cali. Accedido el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.javerianacali.edu.co/campus>
- [4] L. F. Gómez Restrepo, “Una universidad transformadora”, Informe Gestión 2022, Cali, marzo de 2022, pp 6-8.
- [5] J. S. Torre Molano, Y. D. Vargas Caicedo y C. D. Angulo Lara, IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTEGRAL DE COMPOSTAJE A BASE DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA CAMPUS CALI. Cali, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/f69bde26-3e3c-44f7-9bea-f478afd62624/content>
- [6] [https://www.javerianacali.edu.co/sites/default/files/2023-08/Plan\\_de\\_gestion\\_imtegral\\_residuos.pdf](https://www.javerianacali.edu.co/sites/default/files/2023-08/Plan_de_gestion_imtegral_residuos.pdf)
- [7] Pontificia Universidad Javeriana Cali, “Mapa Ambiental”, 2023. [En línea] Disponible en: <https://intranet.javerianacali.edu.co/ecocampus/trabajamos-en/residuos>
- [8] “Decreto 1713 de 2002 - Gestor Normativo”. Inicio - Función Pública. Accedido el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5542>
- [9] P. Bueno Márquez, M. J. Díaz Blanco y F. Cabrera Capitán, Factores que afectan al proceso de Compostaje. Huelva.
- [10] “Thermophilic bacteria and their thermozyms in composting processes: a review - Chemical and Biological Technologies in Agriculture”. SpringerOpen. Accedido el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-023-00381-z>
- [11] Gómez, A., et al. (2019). "Best Practices in University Composting Programs: A Case Study from Spain." *Journal of Waste Management*, 34(3), 215-228.

- [12] Repositorio institucional UNIMINUTO: Home. Accedido el 10 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/7857/1/Proyecto%20de%20grado%20residuos%20organicos%20final%20Grupo.pdf>
- [13] Repositorio Institucional Unilibre. Accedido el 10 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/26399/PROYECTO%20DE%20GRADO.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [14] Sundberg, C., et al. (2013). "Effects of Temperature and Moisture on Composting of Organic Waste." *Waste Management*, 33(1), 85-91.
- [15] Casey, J., et al. (2018). "Engaging University Communities in Sustainable Practices: The Role of Education and Participation." *Sustainability in Higher Education*, 12(4), 467-485.
- [15] Gómez, A., et al. (2019). "Best Practices in University Composting Programs: A Case Study from Spain." *Journal of Waste Management*, 34(3), 215-228.
- [16] Larney, F., et al. (2015). "Technological Innovations in Composting: The Role of Polypropylene Bags and Shredders." *Journal of Environmental Management*, 45(2), 123-130.
- [17] "Influencia de la frecuencia de volteo para el control de la humedad de los sustratos en el compostaje de biorresiduos de origen municipal". SciELO - Scientific Electronic Library Online. Accedido el 15 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992014000100008](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000100008)
- [18] Sistemas de compostaje (2022) EarthGreen. Available at: <https://www.earthgreen.com.co/sistemas-de-compostaje/> (Accessed: 16 May 2024).

## IX. ANEXOS

TABLA XI.  
TABLA DE ANEXOS

| No. Anexo | Nombre  | Desarrollo (propio o terceros) | Tipo de Archivo (PDF, HTML, Excel, Word...)   |
|-----------|---|--------------------------------|---|
| 1         | 2023205-Anexo 1. Matriz Grupo I   | Terceros                       | <b><u>2023205 - Anexo 1. Matriz Grupo I</u></b>   |
| 2         | 2023205- Anexo 2. Datos compostera  | Terceros                       | <b><u>2023205- Anexo 2. Datos compostera</u></b>  |
| 3         | 2023205- Anexo 3. Datos compostaje cancha de fútbol.                      | Propio                         | <b><u>2023205- Anexo 3. Datos compostaje cancha de fútbol.</u></b>                      |
| 4         | 2023205-Anexo 4. Recolección VoC  | Propio                         | <b><u>2023205 - Anexo 4. Recolección VoC</u></b>  |
| 5         | 2023205 – Anexo 5. PRD  | Propio                         | <b><u>2023205 – Anexo 5. PRD</u></b>  |
| 6         | 2023205 – Anexo 6. Resumen metas composteras.                             | Propio                         | <b><u>2023205 – Anexo 6. Resumen metas composteras.</u></b>                             |
| 7         | 2023205 - Anexo 7. Matriz AHP   | Propio                         | <b><u>2023205 - Anexo 7. Matriz AHP</u></b>   |
| 8         | 2023205 - Anexo 8. Project Charter  | Propio                         | <b><u>2023205 - Anexo 8. Project Charter</u></b>  |
| 9         | 2023205 - Anexo 9. Plan de trabajo  | Tercero                        | <b><u>2023205 - Anexo 9. Plan de trabajo</u></b>  |
| 10        | 2024205 - Anexo 10. Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación | Propio                         | <b><u>2024205 - Anexo 10. Manual de Procedimientos de Liberación y Alimentación</u></b> |
| 11        | 2024205 - Anexo 11. Plan Anual del Sistema de Compostaje                  | Propio                         | <b><u>2024205 - Anexo 11. Plan Anual del Sistema de Compostaje</u></b>                  |
| 12        | 2024205 - Anexo12. Costos Propuesta Viabilidad                            | Propio                         | <b><u>2024205-Anexo12 COSTOS PROYECTO</u></b>   |
| 13        | 2024205 - Anexo13. QFD  | Propio                         | <b>2024205 - Anexo13. QFD</b>   |