

Universidad Nacional  
Facultad de las Ciencias de la Tierra y el Mar  
Escuela de Ciencias Ambientales

**COMPARACIÓN DE LAS EMISIONES DE GASES EFECTO  
INVERNADERO PARA DOS TECNOLOGÍAS DE  
TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE PULPA DE CAFÉ EN  
COSTA RICA**

Proyecto de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería  
Sanitaria

Presentado por la postulante:  
Carolina Balma Montero

Heredia, 2018

Trabajo de graduación aprobado por el Tribunal Examinador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, para optar al grado de Licenciatura en Gestión Ambiental con énfasis en Ingeniería Sanitaria.

## **MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR**

.....  
Nombre y apellido Decano de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el  
Mar  
( o su representante)

.....  
Nombre y apellidos  
Director de la  
Escuela de Ciencias Ambientales  
(o su representante)

.....  
Nombre y apellidos  
Tutor

.....  
Nombre y apellidos  
Lector

.....  
Nombre y apellidos  
Lector

.....  
Nombre y apellidos  
Postulante

## **Agradecimientos**

A mi familia, por ser mi motivación como persona y profesional. A mi madre, Marlen Montero Murillo, y a mi padre, Ricardo Balma Madrid, por ser las personas que me han acompañado en el camino, inculcando en mí valores como la responsabilidad y la perseverancia, pero sobre todo, la determinación en la realización de lo propuesto. Gracias, papá, por creer en mí, sé que desde allí estás muy orgulloso.

A mi hermana Daniela, por conocer este proyecto de pies a cabeza. Gracias por apoyarme tanto.

Al Dr. Jorge Herrera, por depositar en mí la confianza para la realización del presente proyecto. Además, al equipo del Laboratorio de Análisis Ambiental, Víctor Hugo Beita, David Solórzano, Rodrigo Chinchilla, José Félix Rojas, Gabriel Contreras, Jorge Chavarría y Xinia Jiménez, por la dedicación y entrega en los muestreos, análisis y logística.

Al Instituto del Café y a los Beneficios participantes, por la colaboración y disposición a lo largo de los cuatro meses de muestreo, que permitieron el enriquecimiento del sector en cuanto a su huella en gases efecto invernadero y que podrá ser un punto de decisión para futuras acciones.

A mi equipo de trabajo, José Félix Rojas, Víctor Valverde y Rolando Chacón, por ser mis guías y maestros en esta investigación.

## Contenido General

<b>1. Resumen ejecutivo</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Justificación</b> .....	<b>5</b>
<b>4. Objetivos</b> .....	<b>8</b>
4.1. Objetivo General.....	8
4.2. Objetivos específicos .....	8
<b>5. Marco teórico</b> .....	<b>9</b>
5.1. Calentamiento global .....	9
5.2. Marco legal .....	11
5.3. Marco institucional .....	13
5.4. Proceso de beneficiado de café .....	15
5.5. Residuos de café .....	18
5.6. Tratamiento actual de la pulpa residual de café en Costa Rica.....	19
5.6.1. Etapas del compostaje .....	21
5.6.2. Sistemas utilizados .....	25
5.6.3. Monitoreo durante el compost.....	26
5.7. Características indicadoras del potencial energético de los residuos.....	28
5.8. Gasificación como alternativa de disposición.....	30
5.9. Viabilidad del cambio a la tecnología de gasificación.....	37
<b>6. Lineamientos metodológicos</b> .....	<b>38</b>
6.1. Tipo de investigación.....	38
6.2. Fase I: Línea base de aspectos ambientales generados por las emisiones del compostaje de la pulpa de café .....	39
6.2.1. Población y muestra .....	39
6.2.2. El tipo de muestreo .....	40
6.2.3. Sitio de estudio .....	41
6.2.4. Encuesta diagnóstico en campo.....	42
6.2.5. Medición de las emisiones en el composteo .....	43

6.2.2.1. Medición de los gases que se acumulan en el interior del montículo de pulpa de café.....	47
6.2.2.2. Experimento de compostaje controlado para la comparación de resultados obtenidos en los diferentes Beneficios .....	50
.....	51
6.3. Fase II: Caracterización del potencial de la pulpa residual de café como fuente de energía.....	51
6.3.1. Determinación de variables dependientes .....	52
6.3.1.1. Metodología para determinar el contenido de humedad .....	52
6.3.1.2. Metodología para determinar el contenido de las cenizas .....	53
6.3.1.3. Metodología para determinar el poder calorífico .....	53
6.3.1.4. Metodología para determinar el contenido de nitrógeno, carbono, potasio y calcio.....	54
6.4. Fase IV: Medición de gases efecto invernadero en el gasificador piloto .....	55
6.4.1. Condiciones cromatográficas empleadas en la determinación analítica de las concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en ambas tecnologías .....	57
6.5. Incertidumbre de los resultados .....	59
6.6. Fase IV: Análisis de viabilidad de la conversión del sistema actual a la gasificación de pulpa residual.....	60
<b>7. Presentación y análisis de resultados .....</b>	<b>61</b>
7.1. Determinación de línea base de impactos ambientales del tratamiento actual de la pulpa residual de café .....	61
7.1.1. Datos obtenidos de la aplicación de encuestas a la muestra de Beneficios.....	61
7.1.2. Beneficios seleccionados para el muestreo de GEI.....	61
7.1.3. Emisiones de GEI generadas a partir del compostaje como sistema de tratamiento de los residuos de pulpa de café.....	64
7.1.3.1. Comportamiento de las emisiones de GEI en sistemas de compostaje sin volteo: aplicación del método de sonda.....	78
7.1.3.2. Emisiones generadas en el experimento de compostaje controlado: Icafé... 82	
7.2. Resultados de la caracterización de la pulpa residual de café .....	84
7.3. Emisiones de GEI en los sistemas de gasificación como tratamiento alternativo de la pulpa residual de café.....	88

7.3.1. Comparación de las emisiones de GEI generadas a partir del tratamiento de la pulpa residual de café en un sistema de compostaje y por gasificación .....	91
7.4. Análisis de viabilidad de la conversión a la tecnología de gasificación de la pulpa de café en Costa Rica.....	99
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>109</b>
<b>9. Recomendaciones.....</b>	<b>110</b>
<b>10. Literatura citada.....</b>	<b>111</b>
<b>11. Apéndices .....</b>	<b>123</b>
<b>12. Anexos .....</b>	<b>193</b>

## Contenido de Figuras

Figura 1. Descripción del proceso de beneficiado húmedo.....	16
Figura 2. Partes constitutivas del fruto del café.....	19
Figura 3. Temperatura, oxígeno y pH en el proceso del compost. ....	21
Figura 4. Proceso de formación del gas.....	30
Figura 5. Componentes de un sistema Power Pellet: a) 1. Tolva de materia prima 2. Llama 3. Pila de escape. 4. Válvulas para el gas de la llama y el motor. 5. Recipiente de recogida de cenizas - Este buque tiene suficiente capacidad para manejar 1 224 horas de tiempo de funcionamiento. 6. Filtro del gas. 7. PCU (Proceso de Control Unitario) 8. Panel de operaciones 9. Caja de control de la rejilla 10. Caja de configuración eléctrica 11. Generador. b) 1. Cubo de secado 2. Palanca de bloqueo de tapa del filtro de gas 3. Ventana de visualización del reactor de pirolisis 4. Gasificador 5. Válvula de retención de entrada de aire 6. Ciclones y cenizas ciclónicas 7. Tapón de drenaje del filtro de gas.....	32
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de gasificación. ....	33
Figura 7. Esquema del proceso de gasificación utilizados diferentes agentes gasificantes. 34	
Figura 8. Esquema de un gasificador descendente o de tiro invertido .....	37
Figura 9. Diagrama esquemático del diseño experimental para el muestreo del montículo de pulpa residual de café. ....	43
Figura 10. Representación esquemática de la campana para la captura de gases (a). Imagen del sistema empleado para la cuantificación de flujos de emisión de GEI (b).....	44
Figura 11. Método utilizado para la succión de la muestra del flujo de gas de GEI acumulado en la campana (a). Tubos utilizados para la captura del flujo de gas y su respectiva rotulación (b). ....	46
Figura 12. Sonda utilizada para capturar gases efecto invernadero en el interior de un montículo de pulpa residual de café (elaboración propia, 2016).....	48
Figura 13. Cuarteo realizado para la toma de la muestra de GEI en los montículos de pulpa residual de café en los cuales no se aplicó volteo. División en cuatro puntos de muestreo (a) División en dos puntos de muestreo (b). ....	49
Figura 14. Diagrama esquemático del diseño experimental para el muestreo interno del montículo de pulpa residual de café sin volteo. ....	49
Figura 15. Montículos utilizados para el análisis comparativo de las emisiones de GEI con respecto a las obtenidas en los diez Beneficios seleccionados. ....	51
Figura 16. Esquema de utilización del cromatógrafo de gases.....	58
Figura 17. Estructura interna e externa formada en el montículo utilizado para la toma de muestras de gases efecto invernadero en el Beneficio Coope-Tarrazú, 2016. ....	79
Figura 18. Estructura interna e externa formada en un montículo original en el Beneficio Río Jorco, 2016.....	79
Figura 19. Sitio de tratamiento de la pulpa residual de café en el Beneficio Coope Libertad, 2015. ....	124

Figura 20. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual de café en el Beneficio Coope Libertad, 2015. ....	124
Figura 21. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Las Marías, 2015. ....	125
Figura 22. Maquinaria utilizada para el volteo en el Beneficio Las Marías, 2015. ....	125
Figura 23. Fosa de almacenamiento de los lixiviados generados por el compost en el Beneficio Las Marías, 2015. ....	126
Figura 24. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio La Guaria, 2015. ....	127
Figura 25. Volteo realizado en el patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café de Altura, 2015. ....	128
Figura 26. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café de Altura, 2015.	128
Figura 27. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Coopro- Naranjo, 2015. ....	129
Figura 28. Microorganismos aplicados al compost en el Beneficio El Cántaro, 2015. ....	130
Figura 29. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio El cántaro, 2015. ....	130
Figura 30. Microorganismos aplicados en el Beneficio El Cántaro, 2015. ....	130
Figura 31. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio El Cántaro, 2015. ....	130
Figura 32. Tuberías utilizadas para captar el lixiviado en el patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Atenas, 2015. ....	131
Figura 33. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Atenas, 2015. ....	131
Figura 34. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café Cristina, 2015..	132
Figura 35. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio La Bandera, 2015. ...	133
Figura 36. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015. ....	134
Figura 37. Sitio de almacenamiento del abono en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015. ....	134
Figura 38. Terrazas en donde se dispone la pulpa residual en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015. ....	134
Figura 39. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Vista del Lago, 2015. ....	135
Figura 40. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Monte Copey, 2015.	136
Figura 41. Sitio de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Jorco, 2015. ....	136
Figura 42. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Río Jorco, 2015. ....	136
Figura 43. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio Juanachute, 2015. ....	137
Figura 44. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio La Violeta, 2015. ....	138
Figura 45. Sitio de tratamiento de la pulpa residual de café en el Beneficio de Aquiares, 2015. ....	139
Figura 46. Microorganismos aplicados al compost en el Beneficio Santa Rosa, 2015. ....	140
Figura 47. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Santa Rosa, 2015. ....	140

Figura 48. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coopros-San Vito, 2015. ....	141
Figura 49. Área de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio de Coopros- San Vito, 2015.....	141
Figura 50. Área de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Negro, 2015. ....	142
Figura 51. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Negro, 2015. ....	142
Figura 52. Drenaje utilizado para los lixiviados generados del compost en el Beneficio Río Negro, 2015. ....	142
Figura 53. Área destinada para el tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Pagua, 2015. ....	143
Figura 54. Área de disposición de la pulpa residual en el Beneficio San Gerónimo, 2015. ....	144
Figura 55. Área de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Agri, 2015. ....	145
Figura 56. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Coope- Agri, 2015... ..	145
Figura 57. Sitio de almacenamiento del compost en el Beneficio Coope- Agri, 201 ..... ..	145

## Contenido de Cuadros

Cuadro 1. Marco legal en materia de energía, ambiente e internacional aplicable a la propuesta de aprovechamiento energético por gasificación de la pulpa residual de café en Costa Rica.....	11
Cuadro 2. Cantidad de pulpa residual de café producida por fanega procesada. ....	18
Cuadro 3. Riesgos por la incorrecta manipulación del compost. ....	23
Cuadro 4. Parámetros que se deben controlar en un sistema de compostaje.....	26
Cuadro 5. Características determinantes en el potencial energético de la pulpa residual de café.....	28
Cuadro 6. Valores utilizados para la determinación del tamaño de la muestra de investigación.....	40
Cuadro 7. Muestra de Beneficios de café seleccionado para determinación de las variables del presente trabajo de investigación.....	41
Cuadro 8. Descripción de las condiciones cromatográficas utilizadas para la determinación de la concentración de metano y óxido nitroso. ....	58
Cuadro 9. Beneficios seleccionados para la determinación de los flujos de emisión de GEI en sistemas de compostaje como método de tratamiento de los residuos de pulpa.....	63
Cuadro 10. Detalle de las principales características y variables controladas en los muestreos realizados en cada uno de los Beneficios seleccionados. ....	65
Cuadro 11. Resultados obtenidos de para las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxidos nitroso en los sistemas de composteo para los Beneficios seleccionados .....	74
Cuadro 12. Poder calorífico de distintas fuentes de biomasa en comparación con la obtenida para la pulpa de café .....	87
Cuadro 13. Condiciones de muestreo y factores de emisión obtenidos en las diferentes corridas del sistema de gasificación. ....	91
Cuadro 14. Tabla comparativa de las emisiones de GEI individuales y en términos de CO <sub>2</sub> eq para un caso hipotético de un proceso de beneficiado de café.....	97
Cuadro 15. Ventajas y desventajas encontradas en el análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión del sistema de gasificación respecto a las condiciones encontradas en el Beneficio Icafé.....	103

## Contenido de Gráficos

Gráfico 1. Energía primaria con base seca para RAO cafetaleros en regiones de Costa Rica. ....	17
Gráfico 2. Porcentaje de Beneficios que realizan volteo como método de tratamiento de la pulpa residual, 2015.....	62
Gráfico 3. Producción promedio de pulpa residual por cosecha en los Beneficios seleccionados para el muestreo de Gases Efecto Invernadero, período 2015-2016. ....	64
Gráfico 4. Comparación de los flujos de emisión de metano en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis.....	75
Gráfico 5. Comparación de los flujos de emisión de dióxido de carbono en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis. ...	75
Gráfico 6. Comparación de los flujos de emisión de óxido nitroso en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis. ....	76
Gráfico 7. Comportamiento de las emisiones de gases efecto invernadero en la pulpa residual de café en los Beneficios en análisis.....	77
Gráfico 8. Comportamiento de las emisiones de óxido nitroso y metano gases efecto invernadero en la pulpa residual de café en los Beneficios en análisis. ....	78
Gráfico 9. Comportamiento de las emisiones de metano al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo.....	80
Gráfico 10. Comportamiento de las emisiones de dióxido de carbono al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo .....	81
Gráfico 11. Comportamiento de las emisiones de óxido nitroso al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo. ....	81
Gráfico 12. Comportamiento de las emisiones de GEI generadas en el montículo de pulpa residual de café desarrollado en el experimento controlado en el Icafé aplicando volteo. ..	84
Gráfico 13. Comportamiento de las emisiones de GEI generadas en el montículo de pulpa residual de café desarrollado en el experimento controlado en el Icafé aplicando volteo ...	84
Gráfico 14. Factores de emisión obtenidos para el sistema de gasificación en cual se emplearon las siguientes mezclas de biomasa: (1) 90% broza y 10% de cascarilla, (2) 100% broza y (3) 100% broza. ....	90
Gráfico 15. Comportamiento de los factores de emisión de CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub> en sistemas de compostaje, con volteo y sin volteo. En las figuras (a) y (b) se muestran los resultados obtenidos para CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O, mientras que en la Figura (c) se muestran los resultados para las emisiones de CO <sub>2</sub> . ....	93
Gráfico 16. Comparación de los factores de emisión de CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O y CO <sub>2</sub> obtenidos para las técnicas de composteo y gasificación como método de tratamiento de los residuos sólidos	

de broza de café. (a) Diagrama de bloques para los factores de emisión de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O. (b) Diagrama de bloques para los factores de emisión de CO <sub>2</sub> .....	95
Gráfico 17. Comparación entre las emisiones de GEI para un caso donde un Beneficio hipotético produce alrededor de 10 500 toneladas de pulpa de café residual al año. (a) Comparación de las emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O para las técnicas de compostaje y gasificación. (b) Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> y las emisiones totales para el Beneficio en términos de CO <sub>2</sub> eq. ....	99

## Contenido de Apéndices

Apéndice 1. Diagnóstico realizado a la muestra de Beneficios seleccionados para el muestreo de gases efecto invernadero en pulpa residual de café, 2015. ....	123
Apéndice 2. Resultados obtenidos de la caracterización de la pulpa residual de café en los diez Beneficios en seleccionados y las emisiones de GEI asociadas .....	146
Apéndice 3. Temperatura promedio del montículo para cada día de muestreo realizado y su respectiva emisión de GEI.....	158
Apéndice 4. Resultados del poder calorífico de muestras de pulpa residual de café procedentes de los Beneficios seleccionados .....	166
Apéndice 5. Porcentaje de carbono y nitrógeno liberado en forma de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en cada uno de los Beneficios seleccionados .....	168
Apéndice 6. Resultados obtenidos de GEI y otros contaminantes en cuatro pruebas de gasificación como sistema de tratamiento de la pulpa residual de café .....	170
Apéndice 7. Análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión del sistema de compostaje a la gasificación de la pulpa residual de café con respecto a las condiciones encontradas en el Beneficio Icafé.....	172

## **Contenido de Anexos**

Anexo 1. Matriz utilizada para la terminación de la viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión de la tecnología de compostaje al gasificador .....	193
Anexo 2. Encuesta aplicada a los Beneficios .....	201

## **Lista de Acrónimos**

**ICAFÉ:** Instituto del Café

**ICE:** Instituto Costarricense de Electricidad

**CENCE:** Centro Nacional de Control de Energía

**INTA:** Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

**FITTACORI:** Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica.

**GEI:** Gases Efecto Invernadero

**NAMA:** Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada

**MAG:** Ministerio de Agricultura y Ganadería

**ONG:** Organización No Gubernamental

**PCG:** Potencial de Calentamiento Global

**PNUMA:** Programa de la Naciones Unidas por el Medio Ambiente

**RAO:** Residuos Orgánicos Agrícolas

**UNA:** Universidad Nacional de Costa Rica

**UCR:** Universidad de Costa Rica

**LAA:** Laboratorio de Análisis Ambiental

## **Abreviaturas y simbología**

**Ton CO<sub>2</sub> eq.:** Tonelada de dióxido de carbono equivalente

**TJ:** terajulios

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**CH<sub>4</sub>:** metano

**N<sub>2</sub>O:** óxido nitroso

**Gg:** giga gramos

**Tg CO<sub>2</sub> eq:** teragramos de dióxido de carbono equivalente

## **1. Resumen ejecutivo**

El presente proyecto de graduación realiza una comparación de las emisiones de gases efecto invernadero generadas en dos sistemas de tratamiento de pulpa residual de café: el compostaje y la gasificación. Asimismo, evalúa el desempeño de este material como combustible en el gasificador, en términos de poder calorífico, humedad y producción de cenizas. Se culmina con un análisis comparativo de características técnicas, económicas y ambientales, que los Beneficios deben considerar para la conversión de los sistemas de compostaje al tratamiento de la broza por medio de la gasificación.

Para la medición en campo de las emisiones GEI del compostaje, se seleccionó una muestra de un 5% de Beneficio respecto al total inscrito en el Icafé; no obstante, representaron en producción, alrededor del 60% del total. Estos pertenecen al sector Valle Occidental, Turrialba y Orosi. Además, se realizaron mediciones en un gasificador prototipo Power Lab ®, ubicado en el Instituto del Café en Barva de Heredia.

La toma de muestras en el compostaje requirió la formación de montículos de aproximadamente 500 kg, los cuales fueron cubiertos con una lona de vinil, impermeable al gas, de tal manera que el flujo de emisión fuera canalizado a la parte superior y capturado en campanas de homogenización. Para aquellos Beneficios donde no se aplicaba la técnica de volteo, y por ende se formó una capa externa, se diseñó una metodología de sonda que permitió conocer la concentración de GEI dentro del montículo. En el caso del gasificador, la toma de muestras de dióxido de carbono se realizó mediante un analizador automático, Testo 340. En el caso del óxido nitroso y metano se tomaron muestras en bolsas tedlar y analizadas en cromatografía de gases.

Con base en los resultados obtenidos, se alcanzaron reducciones en el sistema de gasificación con respecto a la técnica de compostaje, entre un 35% y un 80% respecto al percentil 75 y al máximo valor para el contaminante metano. El óxido nitroso por su parte, presentó un comportamiento menos marcado debido a las bajas tasas de emisión; sin embargo, de igual manera presentó reducciones entre un 50% y 87% respecto al percentil 75 y el valor máximo para el contaminante. No fue así en el caso del dióxido de carbono, en el cual el de gasificador, al ser un sistema que realiza una transformación del carbono presente en la biomasa, se obtuvo valores de factores de emisión más altos, en el ámbito de 5 600 y 7300 g/kg de biomasa húmeda.

Además, se logró identificar que la realización de volteo en los montículos de compostaje genera mayores emisiones de dióxido de carbono, directamente relacionada a la aireación del sistema, lo que favorece una descomposición tipo aerobio. No siendo así en el caso de aquellos Beneficios en donde no se realizaba volteo, en los cuales se obtuvieron valores de metano y óxido nitroso de hasta 572 y 94,1 kg de contaminante/fanega procesada.

Para evaluar el desempeño de la pulpa residual de café como combustible en el gasificador, se tomaron muestras en los Beneficios seleccionados, recién generada la pulpa. De esto, se obtuvo un valor promedio de 16 MJ/kg de pulpa, valor muy cercano a los materiales comúnmente utilizados en el beneficiado de café, madera y cascarilla.

El análisis de viabilidad de la conversión de la técnica de compostaje a gasificación en el Instituto del Café, arrojó que la variable técnica presenta condiciones favorables para el gasificador. En cuanto a las emisiones, se generaron en el compostaje valores muy por debajo del gasificador. Por último, en la variable económica, el gasificador genera una

inversión inicial de hasta 86 229 806,7 (CRC), sin embargo este puede significar un ahorro en el secado de café al generar aproximadamente 580 kW/h a una potencia de 11 kW con un consumo de pellets de 19 kg/h.

## **2. Introducción**

Un residuo es definido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), citado por CEPAL (2016), como “todo material (sólido, semisólido, líquido o contenedor de gases) descartado, es decir que ha sido abandonado, es reciclado o considerado inherentemente residual”. El manejo inadecuado de estos materiales produce múltiples impactos negativos sobre la salud de las personas y el medio ambiente.

Entre los impactos negativos se encuentra que, por un lado, una inadecuada gestión de los residuos puede redundar en serias afectaciones en la salud de la población, en especial debido a enfermedades entéricas. Y por otro lado, se encuentran efectos ambientales, tales como el deterioro de la calidad de las aguas superficiales por escurrimiento de los lixiviados (CEPAL/ONU, 2010, citado por CEPAL, 2016), que a su vez tienen repercusiones en el suelo por la introducción de compuestos extraños, provocando así efectos en su capacidad de amortiguamiento y disminuyendo el actuar del suelo como un sistema protector (Rosique, 2016). También hay repercusiones en la calidad del aire, por emisiones gaseosas, en particular de biogás (compuesto en su mayoría de metano), con sus efectos en el cambio climático (CEPAL/ONU, 2010, citado por CEPAL, 2016).

Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> son consideradas el principal contribuyente del calentamiento global, con un aumento de un 45% entre 1990 y 2010 (Plaza *et al.*, 2012). Según el quinto informe del IPCC (2015), los desechos y las aguas residuales representaron

1,5 GtCO<sub>2</sub>eq en el 2010. Debido esto, se presentan como opciones importantes para la mitigación en la gestión de residuos, la reducción, seguida de la reutilización, el reciclaje y la recuperación de energía. Tomando en cuenta, que la proporción de material reciclado o reutilizado aún es baja alrededor del mundo (alrededor del 20% de los residuos sólidos urbanos), las tecnologías de tratamiento de desechos y la recuperación de energía para reducir la demanda de combustibles fósiles pueden tener un importante efecto directo en la reducción de las emisiones derivadas de la eliminación de los residuos.

En Costa Rica, según el último inventario nacional de GEI (IMN 2012), el sector residuos es el responsable de más del 17% de las emisiones totales nacionales, en el cual 91,06 Gg, 81,52 Gg, 0,20 Gg, corresponden a la generación dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, respectivamente.

Una de las actividades agrícolas prioritarias en el país es el cultivo de café, el cual a lo largo del tiempo se ha asociado a la generación de subproductos, que en muchos casos se han convertido en residuos. Esto ha constituido un problema ambiental de grandes proporciones, relacionado con la generación de aguas residuales derivadas de la extracción del mucílago y residuos sólidos consecuentes del despulpado. Siendo este último, utilizado alternativamente para la alimentación de ganado, como combustible en procesos de secado de café y en mayor medida como abono rico en fuentes de potasio, fosforo y micronutrientes (Food & Agriculture, 1993).

Actualmente, la pulpa de café constituye una biomasa residual con potencial uso en procesos de recuperación de energía, que contribuyan a los procesos de combustión necesarios en el beneficiado de café. Unido a esto, el sector está en búsqueda de sistemas

eficientes, que puedan ser tomados como alternativas tecnológicas para el uso de los subproductos del beneficiado, mejorando su competitividad y uso ambiental de la biomasa que se produce (Chacón, 2003).

La biomasa se refiere a cualquier material orgánico derivado de las plantas o animales, disponible en forma renovable, el cual ha almacenado luz a través de procesos fotosintéticos (Coto, 2013). A través de estos, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el CO<sub>2</sub> del aire y el agua del suelo en carbohidratos, para formar la materia orgánica. Cuando estos carbohidratos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen. De esta forma, este material funciona como una especie de batería que almacena la energía solar (García, 2011:5).

Se estima que la fotosíntesis fija 220 millones de toneladas de peso seco de biomasa al año, lo que supone unas diez veces la demanda energética mundial (Federación Nacional de cafeteros de Colombia, 2010). Por lo tanto, esta tiene características muy únicas como fuente de energía renovable debido a que puede ser convertida a bases de combustibles y químicos, así como para la generación eléctrica (Coto, 2013).

### **3. Justificación**

El cambio climático y la emisión de GEI forman parte de los temas críticos que enfrenta la sociedad en la actualidad (INTECO, 2011). A raíz de estos problemas en la calidad ambiental, diferentes organizaciones han comenzado a buscar métodos de tratamiento y reciclaje de los residuos agrícolas e industriales.

Por su parte, Costa Rica es firmante de la Convención Marco de Cambio Climático, la cual ha sido ratificada mediante la Ley No. 7414. Asimismo, mediante la Ley No. 8219 y la Ley

No. 7513 es ratificado el Convenio Regional, también es firmante del Protocolo de Montreal y Protocolo de Kioto, los cuales buscan reducir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera (Cortés, 2009). Por esta razón, se posiciona como meta nacional, en el Plan Nacional de Desarrollo de Costa Rica (2011 - 2014), lograr un 95% de la energía eléctrica de fuentes renovables y sustentables, así como avances a carbono neutralidad (MIDEPLAN, 2010).

Respecto al sector cafetalero, el país se ha comprometido a diseñar e implementar una Acción de Mitigación Nacionalmente Apropriada (NAMA) (Icafé, 2012), la cual se fundamenta en la implementación de tecnologías que permitan mejorar la competitividad, al aplicar medidas de mitigación de los GEI, que al mismo tiempo generen Beneficios sociales, económicos y ambientales que favorezcan la adaptación al cambio climático (IICA, 2012).

La industrialización del café en el país produce, en promedio, entre el periodo de junio y abril, grandes cantidades de residuos orgánicos: 264 000 toneladas de pulpa, 27 000 toneladas de cascarilla y 99 000 toneladas de mucílago (Barquero y Cortés, 2011) y ocupando el segundo lugar en el país en la generación de emisiones de gas metano (Steiner 2006). Su contribución a nivel nacional es de un 9% de las emisiones de GEI, generando un 25% de las emisiones provenientes del sector agropecuario, que a su vez es responsable del 37% del total de emisiones del país (Icafé, 2012).

Usualmente la pulpa es desechada, produciendo metano y mal olor. Por otro lado, en una gran cantidad de Beneficios esta es tratada en un sistema de compostaje con el fin de aplicarlo al campo y obtener suelos más fértiles. Este sistema reduce las emisiones y al mismo tiempo disminuye el uso de fertilizantes. Alternativamente, el uso de esta biomasa

como fuente de bioenergía significaría un procesamiento más sostenible y al mismo tiempo disminuiría el costo para los Beneficios (GIZ, 2015).

El tratamiento actual, el compostaje, representa una buena opción para los productores pequeños que pueden aprovechar los recursos de la finca para elaborar sus composteras. Sin embargo, la limitante está en que dependiendo de la extensión de la plantación el espacio de la compostera o la cantidad total de compost que se produce se pueden hacer insuficientes (Monge, 1999). Asimismo, este representa un alto costo y esfuerzo de manejo ambiental por la implicación de espacio y mantenimiento (Coto, 2013).

En lo que respecta al consumo eléctrico por parte del sector cafetalero, de acuerdo con Carlos Soto del CICAFFE, citado por Reto (2006), el secado del café requiere una energía de 405,5 MJ/fanega de café fruta tomando en cuenta las pérdidas del sistema de aproximadamente 50%. Se demuestra que en el caso cuando se seca la pulpa con los gases exhaustos del horno y se queme la totalidad de la pulpa secada junto a la cascarilla en el horno, se obtiene energía en exceso de 101 MJ/fanega.

De acuerdo con la Encuesta de oferta y consumo energético nacional a partir de la biomasa, realizada por la Dirección Sectorial de Energía en el año 2006, existe una gran producción de residuos biomásicos a nivel nacional que pueden analizarse con el fin de valorar su potencial energético (Ramírez *et al.*, 2007). Según el Plan Nacional de Energía (2011), el potencial energético bruto para la generación de electricidad asociado a la biomasa es de 637 MW.

La actual utilización de residuos orgánicos para producir energía en Costa Rica puede ser sustancialmente mejorada a través de la aplicación de metodologías de producción más limpia, el uso de tecnología de punta y utilidades alternativas (Steiner, 2006). Además, disminuiría costos tanto del tratamiento de los residuos como el

consumo de electricidad en diferentes procesos (Cortés, 2009).

A raíz de esto, el presente trabajo propone que la pulpa residual podría ser gasificada o quemada junto con la cascarilla por medio de la técnica conocida como gasificación. En la actualidad, en el sector cafetalero están implementados cinco gasificadores; sin embargo, lo que se utiliza como materia prima es cascarilla y leña, por lo que es fundamental el estudio de nuevas fuentes posibles de energía y la identificación de una opción tratamiento a este residuo.

Asimismo, esta tecnología trae consigo una mejora importante en el procesamiento del café al aumentar la eficiencia en su proceso de secado, el cual en la mayoría de las empresas conlleva pérdidas demasiado grandes de energía. Para esto se debe realizar una comparación cuidadosa de las emisiones actuales respecto a la disminución efectivamente posible de emisiones, con el fin de efectuar un análisis de técnico, ambiental y económico que permita determinar su viabilidad (Steiner, 2006).

#### **4. Objetivos**

##### **4.1. Objetivo General**

Evaluar la viabilidad del uso de la pulpa residual de café en un sistema de gasificación para la producción de energía en el sector cafetalero de Costa Rica.

##### **4.2. Objetivos específicos**

- Establecer una línea base de los flujos de emisión de gases efecto invernadero generados por el tratamiento actual de la pulpa residual de café en Costa Rica.
- Caracterizar el potencial energético de la pulpa del café para su utilización como energía alternativa en el proceso de secado del café.

- Cuantificar las emisiones de gases efecto invernadero producidas por la gasificación en comparación con el tratamiento actual de los residuos de la pulpa de café.
- Realizar un análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental de la conversión a la tecnología de gasificación de la pulpa de café utilizando el modelo prototipo del Instituto del Café.

## **5. Marco teórico**

### **5.1. Calentamiento global**

El calentamiento global no es un fenómeno ambientalmente novedoso, pues a lo largo de la historia han existido épocas de glaciación, calentamiento y enfriamiento. Sin embargo, el proceso de desarrollo de las poblaciones ha provocado el aumento de gases contaminantes a la atmósfera y con ello la aceleración de dicho fenómeno.

Este provoca que aumente la capacidad de la atmósfera de retener parte de la energía reflejada por la Tierra, lo cual causa finalmente el calentamiento. La Tierra recibe energía del Sol y la re-emite nuevamente hacia el espacio. La atmósfera retiene parte de la energía reflejada por la esta, lo que provoca una temperatura promedio del planeta de 15 °C. Si no existiera este efecto, la temperatura promedio sería de -18 °C (Cortés, 2009).

Los principales GEI son componentes gaseosos naturales o antropogénicos como son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>), el sulfuro de azufre (SF<sub>6</sub>), los perfluorocarbonos (PFCs) y los clorofluorocarbonos (HFCs). Estos gases de la atmósfera absorben y emiten radiaciones emitidas por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Cuando existe un desequilibrio en la concentración de los gases de

efecto invernadero, la temperatura de la atmósfera aumenta por el forzamiento radiactivo (Reto, 2006).

La concentración de estos gases ha aumentado por efecto de actividades humanas, desde la era preindustrial, en un 70% entre 1970 y 2004. El CO<sub>2</sub> es el GEI antropogénico más importante, se estima que sus emisiones anuales se han elevado en torno a un 80% entre 1970 y 2004. Esto se debe principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil y, en una parte apreciable pero menor, a los cambios de uso de la tierra. El aumento observado de la concentración de CH<sub>4</sub> se deba predominantemente a la agricultura y a la utilización de combustibles de origen fósil (IPCC, 2008:5).

No todos los GEI tienen la misma capacidad para atrapar los rayos ultravioleta, ni todos tienen igual vida media en la atmósfera, por lo cual se ha establecido un índice llamado Potencial de Calentamiento Global (PCG) (Rojas, 2014), el cual indica la medida del efecto comparado con el CO<sub>2</sub> de la cantidad de calor que puede ser atrapada por determinado gas. Cuanto mayor sea esa capacidad, mayor será su PCG (Cortés, 2009).

El proceso de descomposición de los residuos orgánicos emite una serie de gases de efecto invernadero (GEI), en especial metano (aunque también algunos óxidos nitrosos y dióxido de carbono, en menor escala) (Rojas, 2014). Según el IPCC (2007), citado por Rojas (2014), el metano tiene un PCG a 100 años de 21, es decir, la emisión de una tonelada de CH<sub>4</sub> a la atmósfera es equivalente a emitir 21 toneladas de dióxido de carbono, lo cual hace aún más evidente la relevancia que tiene el sector de los residuos en la lucha para reducir el calentamiento global.

## 5.2. Marco legal

En esta sección se menciona de forma resumida los aspectos más importantes por tomar en cuenta en la elaboración de la propuesta de la conversión al sistema de gasificación de la pulpa residual de café en Costa Rica. El marco legal contempla los aspectos ambientales, de generación de energía eléctrica y regulaciones internacionales aplicables.

**Cuadro 1.** Marco legal en materia de energía, ambiente e internacional aplicable a la propuesta de aprovechamiento energético por gasificación de la pulpa residual de café en Costa Rica

<b>MARCO LEGAL EN MATERIA DE ENERGÍA</b>	<b>MARCO LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL</b>	<b>MARCO LEGAL INTERNACIONAL APLICABLE</b>
<p><b>Ley N° 7200 Capítulo I y II (1990):</b> Ley que autoriza la generación eléctrica autónoma o paralela.</p>	<p><b>Constitución Política de la República de Costa Rica (1999):</b> Artículo 50. Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado.</p> <p><b>Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839 (2010):</b></p> <p>1) Artículo 38: obligaciones de los generadores.</p> <p>2) Artículo 45: Prevención de la contaminación.</p> <p><b>Ley de la Salud 5395 (1973):</b></p> <p>1) Artículo 278: todos los residuos sólidos que provengan de las actividades corrientes personales, familiares o de la comunidad y de operaciones agrícolas, ganaderas, industriales o comerciales, deberán ser separados, recolectados, acumulados, utilizados cuando proceda y sujetos a</p>	<p><b>Protocolo de Kyoto:</b></p> <p>1) Imitación y/o reducción de las emisiones de metano mediante su recuperación y utilización en la gestión de los residuos así como en la producción, el transporte y la distribución de energía.</p> <p>2) Investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía, de tecnologías de secuestro del dióxido de carbono y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales</p>

**MARCO LEGAL EN  
MATERIA DE  
ENERGÍA**

**MARCO LEGAL EN MATERIA  
AMBIENTAL**

**MARCO LEGAL  
INTERNACIONAL  
APLICABLE**

tratamiento o dispuestos finalmente, por las personas responsables a fin de evitar o disminuir en lo posible la contaminación del aire, del suelo o de las aguas.

**Ley Orgánica del Ambiente 7554 (1995):**

- 1) Artículo 57: Aprovechamiento de recursos.
- 2) El aprovechamiento de los recursos energéticos deberá realizarse en forma racional y eficiente, de tal forma que se conserve y proteja el ambiente.
- 3) Artículo 58: Fuentes energéticas alternas. Para propiciar un desarrollo económico sostenible, la autoridad competente evaluará y promoverá la exploración y la explotación de fuentes alternas de energía, renovables y ambientalmente sanas.
- 4) Artículo 68: Prevención de la contaminación del suelo. Es obligación de las personas, físicas o jurídicas, públicas o privadas, evitar la contaminación del suelo por acumulación, almacenamiento, recolección, transporte o disposición final inadecuada de residuo y sustancias tóxicas o peligrosas de cualquier naturaleza.
- 5) Artículo 69: Disposición de residuos contaminantes. En el manejo y aprovechamiento de los suelos, debe controlarse la disposición de los residuos que constituyan fuente de contaminación. Las actividades productivas evitarán

**Convenio de Basilia:**

Incluye entre la categoría de residuo que hay que controlar:

- 1) Residuos alquitranados resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico.

**Protocolo de Montreal (2006):**

- 1) Las emisiones gaseosas del proceso deben vigilarse y analizarse utilizando instrumentos adecuados. Esta medida debería complementarse con controles aleatorios periódicos utilizando métodos manuales de muestreo de efluentes. Otras liberaciones en el medio ambiente, como las de efluentes líquidos y las de residuos sólidos, requieren análisis periódicos en laboratorio.

MARCO LEGAL EN MATERIA DE ENERGÍA	MARCO LEGAL EN MATERIA AMBIENTAL	MARCO LEGAL INTERNACIONAL APLICABLE
	<p>descargas, depósitos o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en el suelo.</p> <p><b>Reglamento sobre Manejo de Basuras N° 19049-S (1989):</b> La recuperación de los residuos sólidos a partir de basuras, tiene dos propósitos principales:</p> <p>a) Recuperación de valores económicos y energéticos que hayan sido utilizados en el proceso primario de elaboración de productos.</p> <p>b) Reducción de la cantidad de basura producida y que se dispondrá sanitariamente.</p>	

*Fuente: Elaboración propia, 2015.*

En el siguiente apartado se extiende el marco institucional, en donde se enmarca el proyecto como parte de un acuerdo del sector cafetalero y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

### **5.3. Marco institucional**

En Costa Rica la comercialización de café se encuentra totalmente en manos del sector privado, pero el Estado mantiene la supervisión y el control a través del Instituto del Café de Costa Rica (Icafé). En este están representados todos los sectores que intervienen en la actividad: Productores, beneficiadores, exportadores y torrefactores (Coto, 2013).

El Icafé es una entidad única en el mundo, con más de 80 años de regular la actividad cafetalera. Su origen se remonta a 1933, cuando fue fundado como Instituto de Defensa del Café por la Ley de la República de Costa Rica No. 121 de 24 de julio del mismo año.

Desde entonces contribuye con el desarrollo de la actividad cafetalera y la diversificación agrícola en el país; apoya los procesos de beneficiado, exportación y comercialización del café. Además, realiza su promoción dentro y fuera del país; investiga, desarrolla y transfiere tecnología agrícola e industrial (beneficiado y tueste) y aprueba el precio mínimo de liquidación final que le debe pagar cada Beneficio de café al Productor (Icafé, 2013).

El Icafé, junto con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), sostiene un acuerdo para apoyar el desarrollo y la implementación del NAMA café. El concepto NAMA se basa en la implementación de tecnologías que permiten al sector cafetalero mejorar su competitividad al aplicar medidas que contribuyen a la mitigación de GEI y que, a su vez, generan una serie de co-beneficios sociales, económicos y ambientales que favorecen la adaptación de los sistemas productivos al cambio climático (Icafé, 2012).

Entre las medidas del NAMA se encuentra el uso de residuos agrícolas como fuente de energía que contribuyan a sustituir fuentes convencionales, principalmente hidrocarburos importados. El proyecto incluye el estudio de generación y aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas (RAO) en 12 actividades productivas en Costa Rica: café, caña de azúcar, piña, arroz, cítricos, maderable (aserraderos), pecuario (avícola, cerdos, ganado carne, ganado de leche), banano y palma aceitera. Sin embargo, se concentra en la actividad cafetalera, dado que es una de las tres actividades más importantes en materia de reducción de emisiones de GEI (CEPAL 2013).

Para la implementación del NAMA Café se ha constituido un grupo de trabajo coordinado por el MAG que incluye a: ICAFÉ, MINAE y FUNDECOOPERACIÓN. Además una organización no gubernamental representada por cinco sectores claves, las ONG, la sociedad civil, el gobierno, el sector privado y la academia. Unido a esto se le suma la participación de un equipo de especialistas de diversas instituciones como son ICE, INTA,

UCR y UNA. Finalmente, cuenta con el apoyo técnico del *International Environmental Technology Center*, el financiamiento del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Fundación FITTACORI, la cual participa como ente administrador de los fondos del financiamiento (CEPAL, 2013).

A continuación, se describe el proceso de beneficiado de café y los principales residuos con potencial energético.

#### **5.4. Proceso de beneficiado de café**

La elaboración industrial del café puede realizarse mediante dos procesos: beneficiado seco y beneficiado húmedo, siendo este último el sistema más utilizado en Costa Rica (Del Rosario y Rodríguez, 1994). Datos del Icafé (2017) indican que solo dos de los Beneficios de los 270 inscritos realiza beneficiado seco. En el primero, el café se seca al sol en patios empedrados, de ladrillo o en un suelo duro limpio. Luego se descascara a “golpe de vara” en pilones de madera dura, se deja en al aire libre para limpiarlo y en seguida se recoge en cestas para finalmente ser guardado en sacos (Rojas, 2000). El segundo, requiere de preparación del grano, generando un café conocido como “suave”, de gran calidad y aceptación en el mercado internacional. Este proceso involucra las siguientes operaciones: despulpado, desmucilaginado, lavado, secado y posteriormente, la separación de la cascarilla para ser clasificado y envasado (Del Rosario y Rodríguez, 1994). A continuación se describen con mayor detalle cada uno de ellos (Cenicafé, 2016) (ver Figura 1):

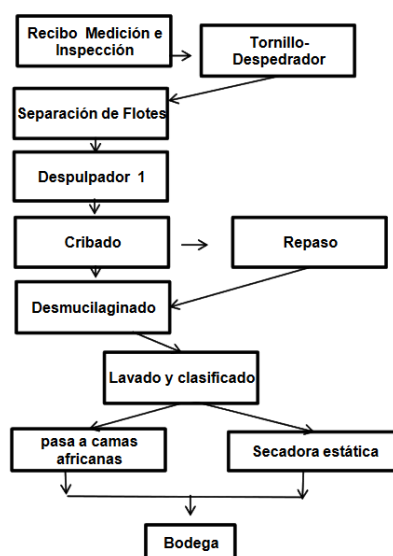
**Despulpado:** Consiste en retirar la pulpa de la cereza por medio de presión que ejerce la camisa de la despulpadora. La pulpa es conducida generalmente en medios mecánicos hacia

los sistemas de disposición y tratamiento, para evitar que gane aún más humedad en el proceso.

**Remoción del mucílago:** El mucílago es la baba que recubre el grano despulpado. El mucílago se remueve por medio del proceso de fermentación natural o mecánicamente.

**Lavado:** El lavado permite retirar totalmente el mucílago fermentado del grano. Se utiliza agua limpia para evitar defectos como el grano manchado, sucio, el sabor a fermento y la contaminación.

**Secado:** La práctica de secado busca disminuir el agua del grano de café, previamente lavado y escurrido de una forma natural o mecánica.



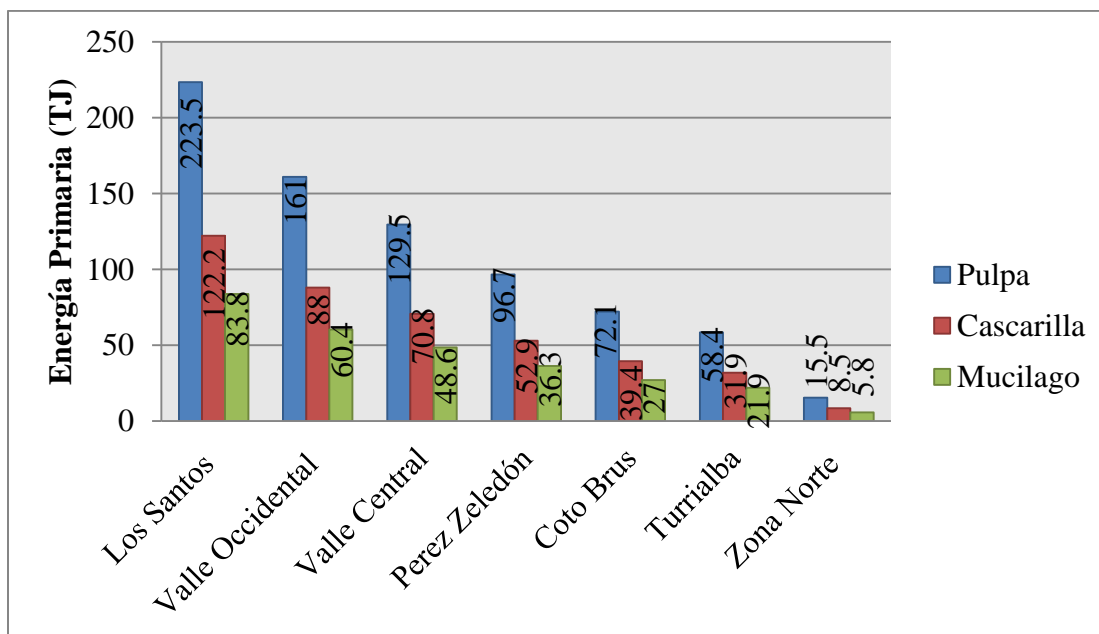
**Figura 1.** Descripción del proceso de beneficiado húmedo.

*Fuente: MAG, 2010.*

El beneficiado de café, en especial en su etapa de secado, constituye un proceso que demanda grandes cantidades de energía, incluyendo electricidad, calor y en algunos casos, combustibles derivados del petróleo (FIAGRO, s.f.). Por esta razón es de suma importancia

notar la contribución de la materia seca y energía asociada a la pulpa respecto a los otros residuos. Sin embargo, debido a los altos contenidos de humedad en la materia orgánica, y tomando en cuenta la necesidad de secar o preparar la materia para un proceso de conversión energética, no se puede asociar el potencial con la disponibilidad energética de este residuo.

La búsqueda tecnológica en un residuo como la pulpa y su viabilidad dictará eventualmente cuanto de este potencial puede finalmente quedar disponible para usos finales de calor de proceso o de generación eléctrica en el sector (Coto, 2013). En el Gráfico 1., se puede apreciar la energía primaria en terajulios que puede producir los diferentes subproductos de café en los sectores cafetaleros del país, donde se destaca la pulpa y la cascarilla de café.



Fuente: Coto, 2013.

**Gráfico 1.** Energía primaria con base seca para RAO cafetaleros en regiones de Costa Rica.

## 5.5. Residuos de café

En el proceso del café se estima que menos del 5% de la biomasa generada se aprovecha en la elaboración de la bebida, el resto queda en forma residual en materiales lignocelulósicos (Rodríguez y Zambrano, 2010). Entre estos se encuentra la pulpa, la cual representa aproximadamente un 42 % del peso del fruto de café, el mucílago (de pectina) adherido al grano aproximadamente 16 %, y la cascarilla un 4,3 % (Ver Figura 2) (Barquero y Cortés, 2011).

En especial, el beneficiado húmedo está asociado a la liberación de desechos o subproductos que generan alteraciones directas e indirectas en el medio, como es el caso de la pulpa de café y las aguas residuales. La broza del café, en algunos casos, no es liberada junto con las aguas residuales y es acumulada en áreas cercanas al Beneficio (Del Rosario y Rodríguez, 1994). Según datos aportados por el Icafé (2015), por cada fanega procesada se produce 105 kilogramos de pulpa (ver Cuadro 2).

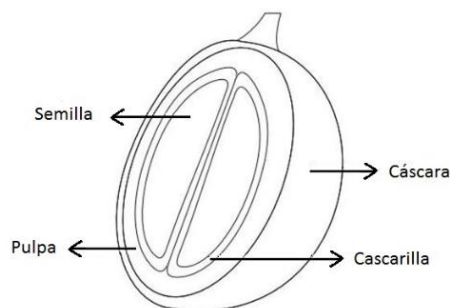
**Cuadro 2.** Cantidad de pulpa residual de café producida por fanega procesada.

Descripción	kg/ff	%peso/ff	%vol/ff	Kg/m <sup>3</sup>	qq/m <sup>3</sup>	ff/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /1000ff
Café en fruta	253,0	100,0%	100,0%	632,5	13,75	2,5	400,0
Pulpa fresca	105,2	41,6%	56,0%	469,9	10,2	4,5	224,0
Café en baba	148,0	58,5%	43,9%	842,9	18,3	5,7	175,6
Mucílago	39,5	15,6%	4,7%	2099,4	45,6	53,2	18,8
Agua de secado	50,3	19,9%	0,0%		0,0		
Café de lavado 53% bh	108,5	42,9%	39,1%	694,0	15,1	6,4	156,4
Pergamino 12% bh	57,9	22,9%	36,6%	395,7	8,6	6,8	146,4
Café de oro 12% bh	47,1	18,6%	16,5%	713,0	15,5	15,2	66,0
Cascarilla	10,9	4,3%	9,9%	274,7	6,0	25,3	39,6
Fanega	0,40	400					
	m <sup>3</sup>	litros					
Quintal	46 kg	100					
		libras					

*Fuente: Icafé, 2015.*

Es por esa razón que el residuo sólido principal proveniente del proceso es la pulpa. Aunque el despulpado se realice en seco, y el transporte de la pulpa se realice sin contacto con el agua, esta inicialmente tiene un contenido de humedad mayor al 85%, esta condición favorece una rápida descomposición del producto, lo cual obliga a los Beneficios a tratarla en forma rápida. Esto por lo tanto, les implica un costo y esfuerzo considerable (Chacón, 2003).

La pulpa residual es un material rico en celulosa y en azúcares reductores. Contiene sustancias como pectinas, taninos, ácido clorogénico, azúcares no reductores, ácido cafeico y cafeína. El 11,3 % de su masa es materia inorgánica a raíz del contenido de cenizas y de algunos minerales en la pulpa (Barquero y Cortés, 2011). Por otra parte, la cascarilla de café corresponde a la capa que cubre la semilla, esta constituye el 4,2% del total (Rincón *et al.*, 2011) (ver Figura 3).



**Figura 2.** Partes constitutivas del fruto del café.

*Fuente: Rincón et al., 2011.*

## **5.6. Tratamiento actual de la pulpa residual de café en Costa Rica**

Para un total de 210 Beneficios de café inscritos en Costa Rica, para el periodo 2016 se evidencia que cerca 100% de la pulpa de café es tratada por medio de composteo mecánico para la producción de abono orgánico (Chacón, 2017).

El compostaje ha representado en los últimos años una opción de manejo tanto en el ámbito nacional como internacional, ya que se ha reconocido su valor nutricional y el potencial que posee en el mejoramiento de los suelos. En Costa Rica el uso de abonos orgánicos se inició especialmente entre los productores orgánicos del país, consecuentes con el principio fundamental que establece el mejoramiento de los suelos como la base para el desarrollo de este sistema de producción. Unido a esto, la regulación en cuanto al manejo de residuo del beneficiado del café ha llevado a los beneficiadores a buscar opciones de manejo para la broza del café (Meléndez y Molina, 2001).

El compostaje es un proceso dinámico, biológico, aerobio y en consecuencia termófilo, que para llevarse a cabo necesita: materia orgánica, población microbiana inicial y las condiciones óptimas para desarrollarse con multiplicidad de funciones y actividades sinérgicas; para ello y para que la población microbiana sea lo más variada posible debe mantenerse una serie de equilibrios: aire/agua, biopolímeros y nutrientes (Varona, 2012).

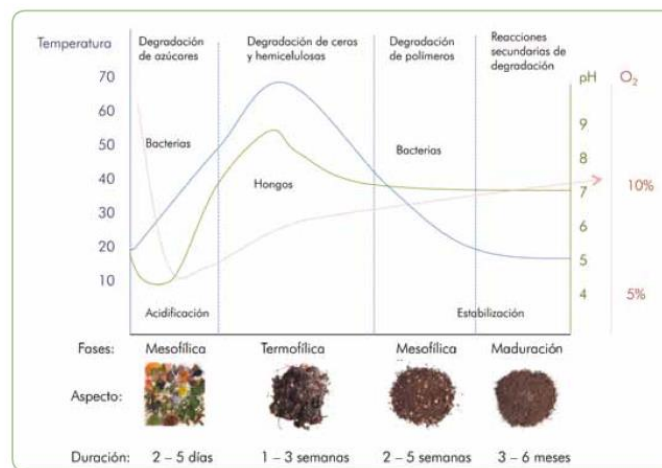
Un proceso de compostaje bien controlado y aplicado a los materiales adecuados consigue los siguientes objetivos:

- Transformación de materiales orgánicos biodegradables en material biológicamente estable.
- Reduce la humedad, el peso, el volumen de los residuos tratados, obteniendo un producto estabilizado, almacenable y transportable.
- Destruir patógenos, huevos de insectos y otros organismos no queridos que puedan estar presentes en la materia orgánica.
- Retención del máximo contenido nutricional (nitrógeno, fósforo y potasio).

- Al ser aplicado al suelo mejora la infiltración y retención de agua, disminuye las fluctuaciones de temperatura, reduce la erosión, mejora la sanidad de los cultivos al favorecer un control natural de plagas y aporta nutrientes para el sustento de las plantas (Varona, 2012).

### 5.6.1. Etapas del compostaje

Las etapas de composteo son las fases del proceso identificables por la evolución de las curvas de: temperatura, pH, reducción del volumen y relación carbono/nitrógeno (C/N), principalmente. Estas son: mesófila, termófila, de enfriamiento y de maduración (Román 2013) (ver Figura 3).



**Figura 3.** Temperatura, oxígeno y pH en el proceso del compost.

*Fuente: Román, 2013.*

Según Colomer (2007), el compost presenta las siguientes etapas:

**Etapa de latencia:** Es la etapa inicial, considerada desde la conformación de la pila hasta que se constatan incrementos de temperatura, respecto a la temperatura del material inicial. Esta etapa es notoria cuando el material ingresa fresco al compostaje. Con temperatura ambiente entre los 10 y 12 °C, en pilas adecuadamente conformadas, esta etapa puede durar

de 24 a 72 h. La temperatura y la carga de biomasa microbiana que contiene el material son los dos factores que definen la duración de esta etapa.

**Etapa mesotérmica 1 (10-40 °C):** En esta etapa, se destacan las fermentaciones facultativas de la microflora mesófila. Se dan procesos de nitrificación y oxidación de compuestos reducidos de azufre, fósforo, etc. La participación de hongos ocurre al inicio de esta etapa y al final del proceso, en áreas muy específicas de las pilas de compostaje. La falta de disipación de calor produce un incremento aún mayor y favorece el desarrollo de la microflora termófila que se encuentra en estado latente. La duración de esta etapa es variable y depende de numerosos factores.

**Etapa termógena (40-75 °C):** La microflora mesófila es sustituida por la termófila debido a la acción de bacilos y actinomicetos termófilos. Normalmente, en esta etapa se eliminan todos los mesófilos patógenos, hongos, esporas, semillas y elementos biológicos indeseables. El CO<sub>2</sub> se produce en volúmenes importantes que difunden desde el núcleo a la corteza.

**Etapa mesotérmica 2:** En esta etapa comienza el descenso de la temperatura hasta presentarse valores cercanos a la temperatura ambiente, junto con el agotamiento de nutrientes. En estos momentos se dice que el material se presenta biológicamente y se ha culminado el proceso. Esta etapa se conoce como etapa de maduración.

Sin embargo, no todos los materiales que han sido transformados aeróbicamente son considerados compost. El proceso de compostaje incluye diferentes etapas que deben cumplirse para obtener compost de calidad. La utilización de un material que no haya finalizado correctamente el proceso de compostaje puede acarrear riesgos como: fitotoxicidad, bloqueo biológico del nitrógeno, reducción de oxígeno radicular, exceso de

amonio y nitratos en las plantas, contaminación de fuentes de agua y aplicación de volteo (Román *et al.*, 2013) (ver Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Riesgos por la incorrecta manipulación del compost.

<b>RIESGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Fitotoxicidad</b>	En un material que no haya terminado el proceso de compostaje correctamente, el nitrógeno está más en forma de amonio en lugar de nitrato. El amonio en condiciones de calor y humedad se transforma en amoniaco, creando un medio tóxico para el crecimiento de la planta y dando lugar a malos olores. Igualmente, un material sin terminar de compostar contiene compuestos químicos inestables como ácidos orgánicos que resultan tóxicos para las semillas y plantas.
<b>Bloqueo biológico del nitrógeno, también conocido como “hambre de nitrógeno”.</b>	Ocurre en materiales que no han llegado a una relación varbono:nitrógeno equilibrada, y que tienen material mucho más rico en carbono que en nitrógeno. Cuando se aplica al suelo, los microorganismos consumen el C presente en el material, y rápidamente incrementan el consumo de N, agotando las reservas de N en el suelo.
<b>Reducción de oxígeno radicular</b>	Cuando se aplica al suelo un material que aún está en fase de descomposición, los microorganismos utilizarán el oxígeno presente en el suelo para continuar con el proceso, agotándolo y no dejándolo disponible para las plantas.

<b>RIESGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<p><b>Exceso de amonio y nitratos en las plantas y contaminación de fuentes de agua</b></p>	<p>Un material con exceso de nitrógeno en forma de amonio tiende a perderlo por infiltración en el suelo o volatilización y contribuye a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Igualmente, puede ser extraído por las plantas del cultivo, generando una acumulación excesiva de nitratos, con consecuencias negativas sobre la calidad del fruto (ablandamiento, bajo tiempo postcosecha) y la salud humana (sobre todo en las hortalizas de hoja).</p>
<p><b>Aplicación de volteo</b></p>	<p>La inocuidad biológica del compost, depende de la temperatura que alcance el material, pero también de la humedad, la aireación y el tamaño de partícula. En una pila con adecuada humedad, la actividad microbiana hace que la temperatura se incremente, siendo mayor en el interior que en el exterior. De esta forma, al airear la pila o al realizar el volteo, se homogeniza la temperatura y la humedad y se pueden eliminar patógenos.</p>

*Fuente: Elaboración propia en basado en Román et al., 2013.*

Fruto de esa actividad, se emiten durante el compostaje dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) en distintas proporciones dependiendo de diversos factores. El CO<sub>2</sub> es el principal producto del metabolismo microbiano que degrada la materia orgánica y de hecho, es un índice muy utilizado por los investigadores para estudiar la estabilidad o

madurez de un sustrato orgánico (menor tasa de emisión representa menor actividad biológica y viceversa). Sin embargo, este CO<sub>2</sub> de origen biológico no es considerado como GEI. El CH<sub>4</sub> se produce durante la degradación de la materia orgánica en ambientes de bajo contenido de oxígeno o anaerobiosis. Aunque el compostaje es un proceso aeróbico, suele ser común que se creen zonas de anoxia en las pilas de compostaje, sobre todo en la parte más profunda de las pilas que no se voltean frecuentemente (hay poca difusión del oxígeno). Para el caso del N<sub>2</sub>O, aunque se conocen varios procesos (como la desnitrificación), el principal responsable de la emisión del N<sub>2</sub>O durante el compostaje es la nitrificación, es decir, la transformación del amonio que viene del nitrógeno orgánico a nitrato (un proceso muy importante que limita el potencial agronómico de los compost obtenidos) (Tortosa, 2013).

#### 5.6.2. Sistemas utilizados

Los sistemas utilizados se pueden clasificar en dos grupos: abiertos y cerrados. En los primeros, el compostaje se realiza al aire libre, en pilas o montones que pueden ser estáticos o por volteo, mientras que en los segundos, la fase de fermentación se realiza en reactores que pueden trabajar en continuo o discontinuo (Agrowaste, 2013). A continuación se presentan las ventajas y desventajas en cuanto a su utilización:

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
-Baja inversión capital	-Elevado costo de energía asociada al suministro de oxígeno necesario.
-Ahorro en abonos.	-El control difícil de la aireación
-Ahorro en gestión de subproductos.	-Gran requerimiento de espacio y organización.
-Reducción de la contaminación, sana el material orgánico.	-En el transcurso del proceso se puede producir gases con olores desagradables si
-Formación de un producto final inodoro, parecido al humus, que es biológicamente	

VENTAJAS	DESVENTAJAS
estable. -Mejora las propiedades físicas del suelo y hace más fácil el manejo de este para el trabajo. -El compost neutraliza elementos tóxicos.	el proceso no se desarrolla de forma adecuada, especialmente durante los volteos. -Mal funcionamiento en condiciones climáticas lluviosos. -Costo de transporte hacia y desde la ubicación de la central de compostaje.

*Fuente: Agrowaste, 2013.*

La pulpa residual es un material óptimo para el composteo, ya que además de presentar un alto contenido de nitrógeno, es alta en azúcares, agua, fuentes de carbono y un tamaño de partícula adecuado. El único inconveniente que presenta son los bajos contenidos de fósforo, que deben ser suplidos con algunas otras fuentes (Meléndez y Molina, 2001).

### 5.6.3. Monitoreo durante el compost

Al ser el compostaje un proceso biológico llevado a cabo por microorganismos, se deben tener en cuenta los parámetros que afectan su crecimiento y reproducción. Estos factores incluyen el oxígeno o aireación, la humedad de sustrato, temperatura, pH y la relación C:N (Román *et al.*, 2013) (ver Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Parámetros que se deben controlar en un sistema de compostaje.

PARAMÉTRO	DESCRIPCIÓN
<b>Oxígeno</b>	El compostaje es un proceso aerobio y se debe mantener una aireación adecuada para permitir la respiración de los microorganismos, liberando a su vez, dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) a la atmosfera. Así mismo, la aireación evita que el material se compacte o se encharque. Las necesidades de oxígeno varían durante el proceso, alcanzando la mayor tasa

PARAMÉTRO	DESCRIPCIÓN
	de consumo durante la fase termofílica. La saturación de oxígeno en el medio no debe bajar del 5%, siendo el nivel óptimo el 10%. Un exceso de aireación provocaría el descenso de temperatura y una mayor pérdida de la humedad por evaporación, haciendo que el proceso de descomposición se detenga por falta de agua.
<b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	Durante el compostaje, el CO <sub>2</sub> se libera por acción de la respiración de los microorganismos y, por tanto, la concentración varía con la actividad microbiana y con la materia prima utilizada como sustrato. En general, pueden generarse 2 a 3 kilos de CO <sub>2</sub> por cada tonelada, diariamente. El CO <sub>2</sub> producido durante el proceso de compostaje, en general es considerado de bajo impacto ambiental, por cuanto es capturado por las plantas para realizar fotosíntesis.
<b>Humedad</b>	La humedad es un parámetro estrechamente vinculado a los microorganismos, ya que, como todos los seres vivos, usan el agua como medio de transporte de los nutrientes y elementos energéticos a través de la membrana celular. El rango óptimo de humedad para compostaje es del 45% al 60% de agua en peso de material base.
<b>Temperatura</b>	Es deseable que la temperatura no decaiga demasiado rápido, ya que a mayor temperatura y tiempo, mayor es la velocidad de descomposición y mayor higienización.
<b>pH</b>	El pH define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos de crecimiento y multiplicación. La mayor actividad bacteriana se produce a pH 6,0-7,5, mientras que la mayor actividad fúngica se produce a pH 5,5-8,0. El rango ideal es de 5,8 a 7,2.

PARAMÉTRO	DESCRIPCIÓN
<b>Relación carbono-nitrógeno (C:N)</b>	La relación C:N varía en función del material de partida y se obtiene la relación numérica al dividir el contenido de C (%C total) sobre el contenido de N total (%N total) de los materiales a compostar. Esta relación también varía a lo largo del proceso, siendo una reducción continua, desde 35:1 a 15:1.
<b>Tamaño de partícula</b>	La actividad microbiana está relacionada con el tamaño de la partícula, esto es, con la facilidad de acceso al sustrato. Si las partículas son pequeñas, hay una mayor superficie específica, lo cual facilita el acceso al sustrato. El tamaño ideal de los materiales para comenzar el compostaje es de 5 a 20 cm.

*Fuente: Román et al., 2013.*

### 5.7. Características indicadoras del potencial energético de los residuos

La producción de energía a partir de los residuos agrícolas representa una alternativa de elevado potencial debido a la disponibilidad y características caloríficas de la biomasa residual (Martínez, 2009). A continuación se presentan las características que se deben conocer para determinar el potencial energético de la pulpa de café:

**Cuadro 5.** Características determinantes en el potencial energético de la pulpa residual de café.

VARIABLE	CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN
Independiente	<b>Contenido de humedad</b>	Es la cantidad de agua existente en los residuos sólidos orgánicos, ya sea por sus características químicas o bien por condiciones externas que aumentan la humedad de los residuos, como es el caso de las precipitaciones. El grado de humedad de

VARIABLE	CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN
Dependiente		la biomasa puede afectar la eficiencia de su combustión y la operatividad de la planta de valoración energética.
	<b>Contenido y caracterización de cenizas</b>	Es la cantidad de cenizas que se generan tras calcinar una muestra de residuos a 800°C.
	<b>Poder calórico</b>	Esta propiedad se define como la energía que es posible obtener al quemar un kilogramo de una sustancia.
	<b>Contenido de sodio, potasio, cloruros, sulfatos y calcio de la ceniza</b>	Es el contenido de estos compuestos dentro de las cenizas. Su importancia radica en la determinación de metales dentro del residuo.
	<b>Porcentaje de cenizas</b>	Es la cantidad de cenizas generadas producto de la gasificación de la biomasa.
	<b>Porcentaje de alquitrán</b>	Es la cantidad de alquitrán generado producto de la gasificación de la biomasa.
	<b>Porcentaje de gases generados productos de la gasificación de la biomasa</b>	Se refiere a la cantidad de gases de combustión directamente relacionados con su capacidad de generación eléctrica.

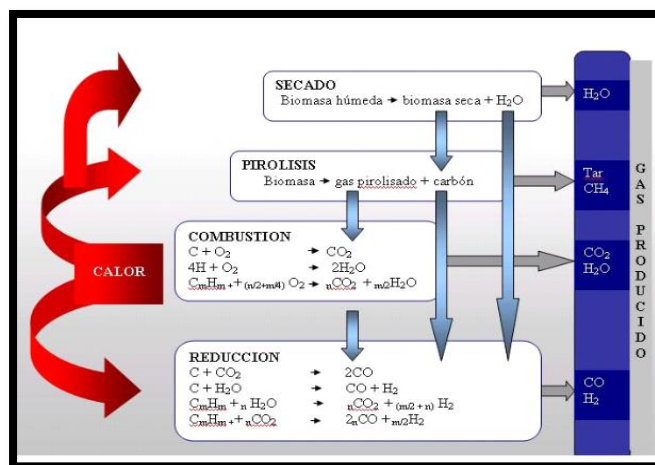
*Fuente: Elaboración propia basado en datos de Barquero y Cortés, 2011.*

En un estudio experimental la variable dependiente es la característica que se investiga y que siempre debe ser evaluada, mientras que la variable independiente es la característica que se puede medir por separado y que puede ser causa de la variable dependiente. Por lo tanto, si la variable independiente produce algún cambio significativo en la variable

dependiente, esta actividad requiere controlar estrictamente las condiciones experimentales de un estudio (Ávila, 2006).

### 5.8. Gasificación como alternativa de disposición

El proceso de la gasificación comienza cuando un material vegetal se somete a la aplicación de calor para su transformación, y luego ocurre un proceso conocido como termoconversión. La pirólisis es parte de este proceso, y consiste en la destilación destructiva del material orgánico en un ambiente libre o de bajo oxígeno y de relativa baja temperatura, formando carbón vegetal, alquitranes, aceites y gases. Una vez se ha llevado a cabo la pirólisis, se produce a continuación la gasificación de la biomasa, mediante la cual los productos volátiles reaccionan con oxígeno, vapor de agua, hidrógeno o una mezcla de estos gases para producir una mezcla gaseosa de bajo, medio o alto poder calorífico, según la relación de alimentación utilizada. Los principales subprocesos que se pueden identificar son el secado, la pirólisis, la oxidación estequiometria y la reducción (Meléndez *et al.*, 2006:3, 4) (ver Figura 4).



**Figura 4.** Proceso de formación del gas

*Fuente: Meléndez et al., 2006.*

Los subprocesos ocurren secuencial o simultáneamente, dependiendo del diseño del reactor y del material alimentado:

- Secado: Cuando la temperatura de alimentación se incrementa, el agua es el primer componente que se transforma a la fase gaseosa.
- Pirólisis: Posteriormente la temperatura aumenta y la pirólisis se lleva a cabo convirtiendo a la alimentación en carbón, volátiles y muy bajos niveles de acetilenos, olefinas, aromáticos y alquitranes.
- Combustión u oxidación: Las reacciones se llevan a cabo cuando el carbón y la alimentación seca se quema. Esta combustión produce cenizas (Velasco, 2011).
- Gasificación o reducción: Es el resultado de las reacciones químicas entre el carbón, vapor, dióxido de carbono e hidrógeno, según el agente incorporado.

Un gasificador se compone de un recipiente preparado para recibir el combustible sólido, de un compartimiento adecuado para quemarlo parcialmente, de medios de carga de combustible sólido y eliminación de cenizas, de elementos de reducción para el gas, tubería para permitir la entrada de aire u oxígeno, así como vapor de agua para el proceso y tubería de salida para el gas producido (Chacón, 2003) (ver Figura 5).

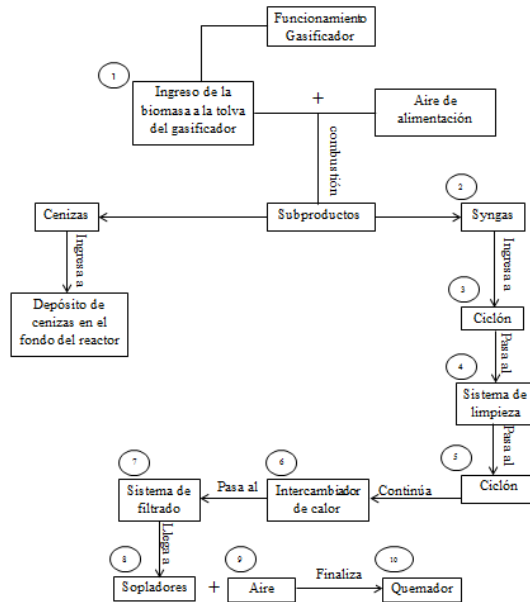


**Figura 5.** Componentes de un sistema Power Pellet: a) 1. Tolva de materia prima 2. Llama 3. Pila de escape 4. Válvulas para el gas de la llama y el motor. 5. Recipiente de recogida de cenizas - Este buque tiene suficiente capacidad para manejar 1 224 horas de tiempo de funcionamiento. 6. Filtro del gas. 7. PCU (Proceso de Control Unitario) 8. Panel de operaciones 9. Caja de control de la rejilla 10. Caja de configuración eléctrica 11. Generador. b) 1. Cubo de secado 2. Palanca de bloqueo de tapa del filtro de gas 3. Ventana de visualización del reactor de pirolisis 4. Gasificador 5. Válvula de retención de entrada de aire 6. Ciclones y cenizas ciclónicas 7. Tapón de drenaje del filtro de gas.

*Fuente: All Power Lab, 2009.*

Según el diagrama de procesos (ver Figura 6), se ingresa la biomasa a la tolva al gasificador con una humedad determinada, el aire de alimentación y salen el syngas producido hacia el ciclón y las cenizas del reactor hacia el depósito de cenizas en el fondo del reactor. A continuación el syngas ingresa al sistema de limpieza, donde pasa por el ciclón que captura las partículas finas que se arrastran, continúa a través de un intercambiador de calor, con el objetivo de enfriar el syngas y precalentar la biomasa, y en la última etapa de limpieza pasa por un sistema de filtrado donde deben quedar los alquitranes más pesados, así como

cualquier partícula remanente en el flujo de syngas. Finalmente el syngas llega a los sopladores, se mezcla con aire y finaliza en un quemador (Torres *et al.*, 2016).

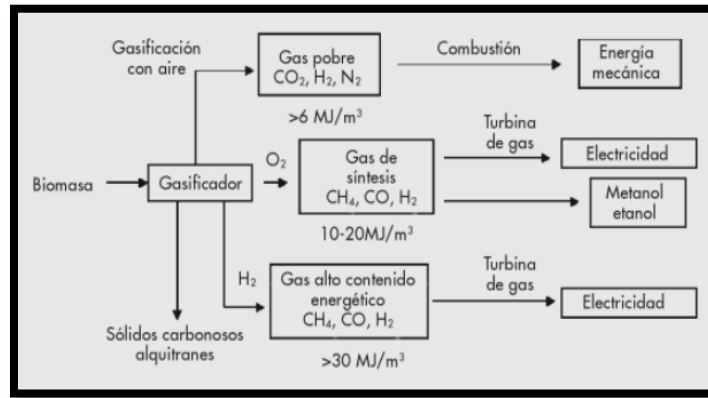


**Figura 6.** Diagrama de flujo del proceso de gasificación.

*Fuente: Elaboración propia basado en Torres et al., 2016.*

Para que se lleve a cabo la gasificación se debe utilizar un agente gasificante. Las posibilidades son varias: oxígeno, aire, vapor de agua, aire rico en oxígeno, entre otros (ver Figura 7). Si se emplea aire como agente gasificante, se obtiene un gas de bajo poder calorífico aprovechable con fines energéticos que se llama gas pobre y normalmente su poder calorífico no superará el 25% del gas natural. Al utilizar oxígeno enriquecido se obtiene un gas de mayor poder calorífico, el cual es un gas de mayor calidad que se puede emplear como combustible o en la síntesis de metanol y tendrá un poder calorífico mayor debido a la ausencia de nitrógeno, normalmente entre el 25% y el 40% del gas natural. Mientras que aplicando vapor de agua se obtiene un gas rico en H<sub>2</sub> y CO apto para la

síntesis de gasolinas y metanol. Por último, en el caso de emplear hidrógeno, se obtiene un gas con alto porcentaje de metano que puede llegar a sustituir al gas natural (Castells, 2012).



**Figura 7.** Esquema del proceso de gasificación utilizados diferentes agentes gasificantes.

*Fuente: Castells, 2012.*

Respecto a los gases asociados a la tecnología, a medida que se alcanzan determinados niveles temperatura, en un combustible de naturaleza compleja, se van liberando aquellas sustancias que son volátiles a esas temperaturas y que existen o se pueden formar. De este modo, se puede producir sustancias como agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ , etc., que son moléculas pequeñas y que por la elevada proporción de hidrógeno y oxígeno que contienen hacen que el residuo se enriquezca progresivamente en carbono, de tal manera que en un proceso lento el sistema final contendría en equilibrio una mezcla de los gases descritos y carbón. La incorporación de oxígeno en grandes cantidades conduciría a la formación de  $\text{CO}_2$  a su mezcla con  $\text{CO}$  (dependiendo de la temperatura final) y la inexistencia de carbón y la incorporación de cantidades limitadas -proporciones menores que las que define la relación de equivalencia- a mezclas de gases con proporciones apreciables de  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc. -condiciones de gasificación- que definen un gas combustible que puede ser utilizado en diversas aplicaciones (Chacón, 2003).

Según Cortés (2009) y Reto (2006), los estudios realizados demuestran que la gasificación no aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que la combustión de biomasa produce agua y CO<sub>2</sub>, pero la cantidad emitida de dióxido de carbono fue captada previamente por las plantas durante su crecimiento, es decir, el CO<sub>2</sub> forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación, por lo que no representa un incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Si los residuos orgánicos pueden sustituir combustibles fósiles, se presenta una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Según Velasco (2011), las ventajas de la tecnología de gasificación son:

- Produce un gas con características de combustible que puede ser usado para la generación de electricidad, calor o como materia prima para la manufactura de productos químicos.
- Reduce el volumen y la masa de residuos alimentados en cuanto a su disposición final.
- Concentración e inmovilización de componentes inorgánicos.
- Emite menores concentraciones de partículas, de óxidos de nitrógeno y de azufre, debido a la limpieza del gas de síntesis.
- Presenta una barrera para la formación de dioxinas y furanos debido a las siguientes razones: la alta temperatura y la falta de oxígeno en el reductor del gasificador previene la formación de cloro libre del ácido clorhídrico y limita la reacción del cloro con los precursores.

Entre las desventajas Velasco (2011) menciona:

- Implica altos costos de inversión y operación por su bajo nivel de comercialización.

- Requiere un tratamiento del residuo previo a la alimentación para asegurar buena calidad del gas de síntesis.

Esto es de suma importancia pues como parte de la ingeniería sanitaria del país se debe buscar e implementar tecnologías que reduzcan los impactos al medio ambiente y que a su vez disminuyan las afectaciones producto de las emisiones generadas de un proceso productivo tan fundamental a nivel nacional, como es el café.

El horno All Power Lab ® que será utilizado para el presente análisis correspondiente a la tecnología Power Pallet de la empresa All Power Labs, líder en gasificación a pequeña escala. Este trata de un sistema compacto y totalmente automatizado que permite la generación de energía a partir de la conversión de biomasa (Fundecooperación, 2015). El equipo es de tipo de lecho descendente, en el cual el aire de primera gasificación se introduce en la zona de oxidación del gasificador o por encima de esta. El gas pobre sale por el fondo del sistema de modo que el combustible y el gas se mueven en la misma dirección. En su camino hacia abajo, los productos ácidos y alquitranes de la destilación procedentes del combustible deben pasar a través de un lecho incandescente de carbón vegetal y se transforman por ello en gases permanentes de hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano (Chacón 2003) (ver Figura 8).

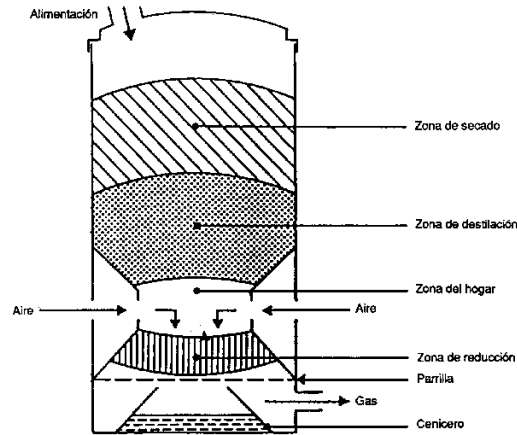


Figura 8. Esquema de un gasificador descendente o de tiro invertido

*Fuente: Chacón, 2003.*

### **5.9. Viabilidad del cambio a la tecnología de gasificación**

El país cuenta con métodos sistemáticos de evaluación de impactos ambientales como lo es la matriz de Leopold y la Matriz de Impactos Ambientales (MIA), diseñadas para la evaluación de impactos asociados con casi cualquier tipo de proyectos. La base de estos sistemas es la asignación de valores dependiendo de la magnitud del impacto en diferentes criterios. Sin embargo, para efectos del presente trabajo se hará énfasis en las matrices del manual de transferencia y adquisición de tecnologías sostenibles del Centro de Gestión Tecnología Industrial (CEGESTI 2005), pues esta permite obtener datos más cuantitativos de la viabilidad técnica, ambiental y económica de un proyecto.

La introducción de una tecnología a la empresa e institución no solo se refiere a su compra e instalación, sino que también incluye la identificación de las necesidades tecnológicas y de los proveedores de soluciones, así como de un análisis técnico, económico y ambiental las tecnologías adquiridas. El manual anteriormente mencionado brinda una matriz que permite valorar la adquisición de una tecnología nueva basándose en la introducción de

tecnologías menos contaminantes al sector productivo, mediante la incorporación de sistemas de gestión ambiental y buenas prácticas de producción más limpia.

## **6. Lineamientos metodológicos**

### **6.1. Tipo de investigación**

El enfoque metodológico de la presente investigación es de tipo mixto, pues se utiliza la integración de métodos a través de un proceso que recolecta, analiza y vincula de datos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio (Giráldez, 2010). Este enfoque va más allá, pues implica desde el planteamiento del problema mezclar lógica inductiva y deductiva (Hernández *et al.*, 2006).

La metodología incluye el enfoque cualitativo, pues en la obtención de datos del objeto en estudio se debe a profundidad analizarlos y comprenderlos (Hernández *et al.*, 2006), esta implicó la toma de datos vía encuesta de las diferentes técnicas de compostaje y percepción respecto a las limitaciones que implica su utilización. El enfoque cuantitativo se utilizó en el procesamiento de datos con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer patrones de comportamiento (Hernández *et al.*, 2006). Este se presenta en la toma de muestras en campo para su posterior análisis, los cuales arrojarán datos sobre las emisiones de gases efecto invernadero para ambas tecnologías en estudio: composteo y gasificación.

Este estudio se enfocó en analizar cuál es comportamiento de las emisiones de GEI en dos técnicas distintas para el tratamiento de los residuos de pulpa. La primera de ellas consistió en determinar los flujos de emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en sistemas de compostaje como técnica de tratamiento para los residuos de pulpa.

## 6.2. Fase I: Línea base de aspectos ambientales generados por las emisiones del compostaje de la pulpa de café

Como primer paso se realizó una encuesta diagnóstico a diferentes Beneficios del país con el fin de identificar cuales presentaban las condiciones óptimas de muestreo (Anexo 2).

### 6.2.1. Población y muestra

La unidad de análisis de esta investigación son los 210 Beneficios de café inscritos en el Instituto del Café de Costa Rica. Mediante la siguiente fórmula se determinó la muestra (Torres *et al.*, 2006):

$$n = \frac{k^2 N p q}{e^2 (N-1) + k^2 p q} \quad (1)$$

Donde:

$N$  = es cantidad total de Beneficios

$K$  = es una constante que depende del nivel de confianza que se asigne

$e$  = es el error muestral deseado

$p$  = es la proporción de Beneficios que cuentan con sistemas anaerobios y de aspersión

$q$  = es la proporción de Beneficios que no poseen sistemas anaerobios ni de aspersión

$n$  = es el tamaño de muestra.

En este caso se utilizaron los siguientes valores:

**Cuadro 6.** Valores utilizados para la determinación del tamaño de la muestra de investigación

<b>DATO</b>	<b>SÍMBOLO</b>	<b>VALOR</b>
<b>Población</b>	N	210
<b>Nivel de confianza</b>	K	1,15 (75%)
<b>Error muestral</b>	E	0,12 (12%)
<b>Proporción positiva</b>	P	0,5
<b>Proporción negativa</b>	Q	0,5
<b>Tamaño de muestra</b>	N	20

*Fuente: Elaboración propia.*

Aplicando dicha fórmula, el tamaño de la muestra resultó de 20 Beneficios, utilizando un nivel de confianza de 75% y un error muestral de 12%. Se usaron estos valores debido a la limitante del tiempo para el desarrollo del proyecto y el factor económico; ya que la aplicación en más de 20 Beneficios elevaría significativamente los costos del proyecto, así como su extensión.

#### 6.2.2. El tipo de muestreo

El muestreo que se realizó en esta investigación fue un muestreo estratégico por conveniencia, por medio del cual se pudiera garantizar (no así en un muestreo aleatorio) que en la muestra se tomará en cuenta las principales variables que presentan los diferentes Beneficios en el país. Los factores que se consideraron para elegir los Beneficios que conforman la muestra son:

- **Zona geográfica del país:** De acuerdo con las ocho regiones cafetaleras en las que está dividido el país, a saber: Valle Central, Valle Occidental, Guanacaste, Tres Ríos, Turrialba, Orosi, Brunca y Tarrazú.

- **Altitud de la zona:** Los Beneficios seleccionados debían estar presentes en las diferentes altitudes: Alta, Media y Baja.
- **Tipo de sistema de tratamiento de pulpa de café:** en este caso se incluye como requisito la aplicación de técnicas de composteo.
- **Capacidad de procesamiento:** Es la cantidad de fanegas de café que procesa al año cada Beneficio, la cual es muy diversa y puede variar de los micro-Beneficios con aproximadamente 1 500 fanegas/año o Beneficios de gran tamaño, que procesan 250 000 fanegas/año.

### 6.2.3. Sitio de estudio

Los 20 Beneficios seleccionados bajo las condiciones anteriormente mencionadas para la aplicación de las encuestas diagnóstico se detallan en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Muestra de Beneficios de café seleccionado para determinación de las variables del presente trabajo de investigación.

NOMBRE	UBICACIÓN	ZONA
CoopeCerroazul R.L., planta Montes de Oro	Montes de Oro Puntarenas	BAJA
Café de Altura San Ramón Especial	San Ramón	MEDIA
CoopeAtenas R.L.	Atenas	MEDIA
Aquiaries	Turrialba	BAJA
El Cántaro	Naranjo	MEDIA
CoopeAgri R.L.	Pérez Zeledón	BAJA
CooproSan Vito R.L.	San Vito Coto Brus	BAJA
Juan Diego Hidalgo Umaña	San Lorenzo Tarrazú	ALTA
Beneficio Lola	San Rafael Heredia	MEDIA
MicroBeneficio Vista del lago	San Carlos Tarrazú	ALTA
MicroBeneficio La Casona	San Marcos Tarrazú	ALTA

<b>NOMBRE</b>	<b>UBICACIÓN</b>	<b>ZONA</b>
CoopeTarrazú R.L.	San Marcos Tarrazú	ALTA
Las Lajas	Sabanilla Alajuela	MEDIA
Biocafé Oro Tarrazú S.A.	Santa María de Dota	ALTA
Unión Zonal Platanares Pérez Zeledón	Pérez Zeledón	BAJA
Pagua	Pérez Zeledón	BAJA
Cerro Yacare S.A.	Siquirres de Limón	BAJA
Beneficio La Campiña	Juan Viñas	BAJA
Beneficio La Guaria	San Pedro de Poás	MEDIA
Beneficio Las Marías	Santa Bárbara de Heredia	MEDIA

*Fuente: Icafé, 2015.*

#### 6.2.4. Encuesta diagnóstico en campo

Previamente a la selección de los Beneficios por muestrear, se aplicó una encuesta diagnóstico a los encargados de los Beneficios de café (ver anexo 3). El alcance de esta etapa fue conocer aspectos como: descripción del proceso empleado en la elaboración del compost, tipos de residuos por compostear, sustancias empleadas para eliminación de humedad y aceleración de procesos de descomposición, realización de volteos y su frecuencia, limitantes detectadas en el composteo. Además de la cantidad de fanegas de café esperadas para la presente cosecha, esto con el fin de realizar un promedio de la cantidad de pulpa de la que se dispondrá bajo dicha tecnología.

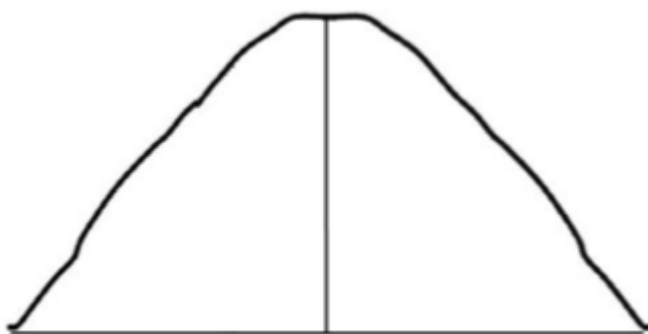
Para el desarrollo de toda la logística que conllevó la aplicación de la encuesta en los veinte Beneficios, en cuanto a transporte y viáticos correspondientes, se contó con el apoyo del Icafé y el Laboratorio de Análisis Ambiental.

Posteriormente, se realizó una segunda selección de los Beneficios con base en los resultados obtenidos respecto a las condiciones óptimas de muestro, al proceso de compostaje empleado (realización de volteo), características del sitio y cercanía del

Beneficio. Además, se tomó en cuenta la disponibilidad de mano de obra para efectuar el trabajo de campo, en la infraestructura y de equipamiento con el que cuenta el LAA-UNA para hacer frente tanto a los trabajos de campo como al análisis de muestras y al procesamiento de los resultados.

#### 6.2.5. Medición de las emisiones en el composteo

Para la ejecución de las mediciones de flujos de emisión de metano, dióxido de carbono y óxido nitroso en los diez Beneficios seleccionados se solicitó a cada uno de ellos la colaboración para la construcción de un montículo de forma de cono truncado y de un peso de 500 kg de pulpa (ver Figura 9).



**Figura 9.** Diagrama esquemático del diseño experimental para el muestreo del montículo de pulpa residual de café.

*Fuente: LAA, 2016.*

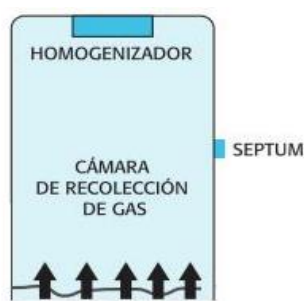
La condicionante para cada Beneficio correspondió a que cada montículo en estudio debía replicar todo aquel tratamiento que se ejecutará en el resto de pulpa generada en la cosecha. El material debió permanecer hasta que se diera por finalizado el proceso de compost, y sobre el cual no se adicionó material fresco una vez que se iniciaron las mediciones; únicamente se adicionaron, como ya se mencionó, aquellos materiales o sustancias que actuaron como complemento propio de cada Beneficio en el proceso de elaboración de

compost. Para esto fue necesaria la entrega a cada Beneficio de una bitácora, donde se anotará datos del día del volteo y sustancias aplicadas, con el fin de evaluar la relaci3n de estas con el proceso de volteo.

Para realizar las mediciones fue necesario cubrir el montículo de compost con una lona de vinil, impermeable al gas, de tal manera que el flujo de emisi3n fuera canalizado a la parte superior, donde fue capturado por el medio de una campana de homogenizaci3n garantizando que no existirán fugas entre la abertura del cobertor y la campana (ver Figura 6.b).

Esta última fue construida a partir de recipientes cilíndricos de polietileno de alta densidad con un diámetro medio de 36 cm y una altura efectiva de 50 cm, generando un volumen de acumulaci3n de aproximadamente 0,05 m<sup>3</sup>.

Esto permiti3 la captura de los gases que difunden del montículo a la atm3sfera. Cada una de las campanas estaba equipada con un ventilador ubicado en la parte superior y acondicionado con una batería seca con el fin de asegurar una mezcla de aire adecuada dentro de la misma, así como de un puerto de muestreo lateral (ver Figura 10.a.b).



(a)



(b)

**Figura 10.** Representaci3n esquemática de la campana para la captura de gases (a). Imagen del sistema empleado para la cuantificaci3n de flujos de emisi3n de GEI (b).

Las muestras fueron tomadas en períodos de 30 minutos, durante los cuales fueron tomadas cuatro submuestras a los 0, 10, 20 y 30 minutos. En estos sistemas, se realizaron mediciones tres veces al día con el fin de evaluar el comportamiento de los flujos de emisión por cambios de temperatura. En total se tomaron 12 muestras por montículo en cada Beneficio con duplicado para cada tiempo de muestreo, y esto tres veces al día.

La finalización de las mediciones estuvo en función de cada uno de los métodos de preparación utilizados por los Beneficios seleccionados, así como de la disminución de la temperatura y el proceso de descomposición observado en el material. Para esto se llevó un registro tanto de la temperatura interna del montículo como de la temperatura ambiental durante cada toma de muestra. La toma de la muestra se llevó a cabo por medio de una jeringa de 10 mL a través de la cual se succionó una porción del gas acumulado en los períodos de tiempo anteriormente descritos (ver Figura 11.a), y fue almacenada en tubos de vidrio al vacío, los cuales fueron debidamente identificados y trasladados al LAA, donde fueron almacenados en frío y analizados por cromatografía de gases (ver Figura 11.b). Es importante mencionar que antes de introducir la porción de gas se realizan enjuagues al recipiente. Además según el procedimiento establecido dentro del LAA, las muestras son almacenadas en refrigeración hasta un máximo de 30 días, esto con el fin de asegurar su estabilidad química.

En el caso del dióxido de carbono se efectuó el muestreo con un analizador automático marca Extech Instruments Modelo CO250 que funciona con detector infrarrojo no dispersivo, el cual tiene una capacidad de detección hasta 9999 ppm y una precisión de  $\pm 50$  ppm.



(a)



(b)

**Figura 11.** Método utilizado para la succión de la muestra del flujo de gas de GEI acumulado en la campana (a). Tubos utilizados para la captura del flujo de gas y su respectiva rotulación (b).

Para el análisis se prepararon curvas de calibración cuyo coeficiente de correlación debió ser mayor a 0,995 con al menos cinco patrones de un estándar certificado; además se inyectó una muestra de concentración conocida, que estuviese dentro del ámbito lineal de la curva, como mecanismo de control de calidad. Una vez analizadas las muestras, se procedió con la determinación de la concentración de los gases en la muestra en  $\mu\text{mol/mol}$  ( $\text{ppm}_v$ ), interpolando directamente en la curva de calibración ajustada linealmente por mínimos cuadrados simples. Se construyó una gráfica de dispersión de concentración del gas en  $\text{ppmv}$  vrs tiempo en minutos, para las muestras tomadas a diferentes tiempos, y se aplicó una regresión lineal a los puntos para obtener el valor de la pendiente. Los flujos de emisión  $J$  ( $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2}\text{h}^{-1}$ ) se determinaron empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Flujo}_{\text{emisión}} = \left( \frac{m \times \frac{P \times M}{R \times T} \times V_{\text{Cámara}}}{A_{\text{Cámara}}} \right) \times 1,44 \quad (2)$$

*Fuente: LAA, 2017.*

Donde:

Flujo<sub>emisión</sub>: Flujo de emisión de área de la fuente ( $\text{mg}/\text{m}^2 \times \text{día}$ )

M= masa molar del contaminante ( $\text{mg mol}^{-1}$ )

P= presión atmosférica en el sitio de muestreo (Pa)

T= Temperatura absoluta registrada durante el muestreo (K)

V<sub>Cámara</sub>= volumen de la cámara ( $\text{m}^3$ )

A<sub>Cámara</sub>= Área superficial de la cámara ( $\text{m}^2$ )

1,44= constante para conversión de unidades

Es importante mencionar que la metodología empleada en el laboratorio para el análisis de muestras de metano y óxido nitroso se encuentra acreditada ante el Ente Costarricense de Acreditación bajo la Norma INTE-ISO 17025:2005 (ver alcance V03 LE 024 en [www.eca.cr](http://www.eca.cr)).

6.2.2.1. Medición de los gases que se acumulan en el interior del montículo de pulpa de café

Bajo los escenarios en los cuales se trabajó se utilizaron tres variantes para determinar el punto de culminación del proceso del compost: la disposición normal de los montículos originales, el descenso de la temperatura y la degradación externa e interna de la materia orgánica. Sin embargo, en los Beneficios donde no se aplicó volteo se formó una estructura externa seca y dura de alrededor de 5 a 6 cm de grosor aproximadamente, la cual cubre la parte húmeda y no degradaba de la materia. Por esta razón se implementó una segunda

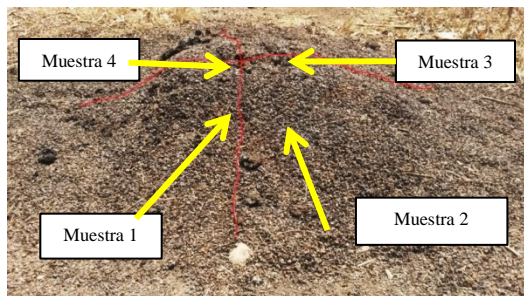
técnica de muestreo cuyo diseño experimental se basó Chen *et al.*, 2015, adoptado a las condiciones del montículo.

De este modo, se diseñó una sonda de bronce con un diámetro interno de 0,32 cm. Esta fue unida a una cámara cilíndrica de 6 cm de largo y 1 cm de diámetro interno, la cual posee 24 orificios en su superficie de forma equidistante (ver Figura 12), de manera tal que al ser introducida dentro del compost a cierta distancia, los gases retenidos pudieran ser extraídos.



**Figura 12.** Sonda utilizada para capturar gases efecto invernadero en el interior de un montículo de pulpa residual de café (elaboración propia, 2016).

La toma de las muestras se inició con la realización de un cuarteo en el montículo (ver Figura 13.a), de tal forma que se pudieran efectuar cuatro puntos de muestreo. Sin embargo, no todos los montículos poseían una forma cónica definida. Estos presentaban mucho material disperso en sus alrededores, por lo que se eliminó dichas partes y se procedió a la toma únicamente en dos puntos del montículo (ver Figura 13.b).



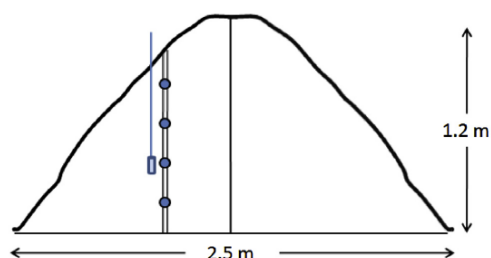
(a)



(b)

**Figura 13.** Cuarteo realizado para la toma de la muestra de GEI en los montículos de pulpa residual de café en los cuales no se aplicó volteo. División en cuatro puntos de muestreo (a) División en dos puntos de muestreo (b).

La sonda se recorrió por la sección transversal del montículo de compost, tal y como se muestra en Figura 14. La concentración de los gases se tomó cada 30 cm según la profundidad respectiva de cada montículo, la cual no superaba en la mayoría de los casos los 50 cm.



**Figura 14.** Diagrama esquemático del diseño experimental para el muestreo interno del montículo de pulpa residual de café sin volteo.

*Fuente: Chen et al., 2015.*

Un jeringa hermética (volumen 50 ml) se conecta al otro extremo de la tubería para eliminar el “volumen muerto” en las sondas. En cada toma de muestras en el sistema se purgó un volumen de 53 ml. Seguidamente, se recogió y se inyectó una

muestra de 10 ml en un tubo al vacío, de manera independiente, las cuales fueron identificadas y trasladadas al LAA para su posterior análisis por cromatografía de gases.

#### 6.2.2.2. Experimento de compostaje controlado para la comparación de resultados obtenidos en los diferentes Beneficios

A raíz de lo observado en las vistas realizadas a los diferentes Beneficios, se evidenció que no existió un control adecuado de los montículos por parte de los Beneficios, los cuales no llevaron control detallado de las bitácoras. Por lo tanto, se consideró necesaria la realización de un experimento controlado de gases efecto invernadero (GEI) en dos montículos de pulpa de café, que sirvieran como referencia y punto de comparación con los resultados obtenidos. Este se realizó en las instalaciones del Icafé, San Pedro de Barva de Heredia.

Para esto se pesó dos montículos de 500 kg respectivamente mediante una balanza electrónica de marca Ocony, en los cuales a uno de ellos se le aplicará volteo manual una vez por semana y el otro se mantendrá sin movimiento (ver Figura 15). Esto con el fin de replicar las dos condiciones predominantes observadas en los diez Beneficios visitados. Las mediciones de GEI se ejecutaron una vez por semana hasta la culminación del proceso de compostaje, utilizando para esto los parámetros anteriormente mencionados. Se llevó un control periódico de la temperatura y la humedad relativa pues el instituto cuenta con una estación meteorológica. Para la toma de las muestras se siguió el procedimiento de la sección 6.2.5.



**Figura 15.** Montículos utilizados para el análisis comparativo de las emisiones de GEI con respecto a las obtenidas en los diez Beneficios seleccionados.

### 6.3. Fase II: Caracterización del potencial de la pulpa residual de café como fuente de energía

En esta fase se realizó una caracterización de las propiedades químicas y del potencial energético de la pulpa residual de café, donde se determinó los siguientes parámetros: contenido de nitrógeno, carbono, calcio, potasio, humedad, cenizas y poder calorífico. Para esto se contó con la colaboración del Laboratorio de suelos forestales y tejidos vegetales del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR) y el Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQUAT), ambos pertenecientes a la Universidad Nacional. El primero se llevaron a cabo los siguientes análisis: contenido de nitrógeno, carbono, calcio, potasio, determinación de la humedad y cenizas en base seca. En el segundo se realizó la determinación del poder calorífico de las muestras.

Para esto se procedió, en cada visita a los Beneficios, a tomar una muestra de pulpa de 100 gramos aproximadamente, la cual fue etiquetada y trasladada en frío en una hielera hermética al LAA. Esta de igual manera fue almacenada bajo congelación hasta su traslado a los diferentes laboratorios para su posterior análisis. La frecuencia de la toma de la muestra dependió de las condiciones de almacenamiento del laboratorio, así como de la frecuencia

de visita y duración del proceso de compostaje en cada Beneficio, por lo tanto la recolección de las muestras fue de tipo aleatorio asegurando como mínimo dos muestras en el proceso de compostaje.

A continuación se detallan las metodologías por emplear para cada una de ellas.

### 6.3.1. Determinación de variables dependientes

#### 6.3.1.1. Metodología para determinar el contenido de humedad

Para la determinación de la humedad el INISEFOR utilizó el procedimiento NMX-AA-016-1984: Protección al ambiente-contaminación del suelo-residuos sólidos municipales-determinación de humedad.

El procedimiento por seguir en el laboratorio consiste en la colocación de la muestra en una caja abierta y su tapa en la estufa a 393K (120°C) durante dos horas, transcurrido ese tiempo, se tapa la caja dentro de la estufa, e inmediatamente se pasa al desecador durante dos horas como mínimo o hasta obtener peso constante. Posteriormente, se vierte la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la caja. Finalmente se pesa con la caja cerrada y se introduce destapada a la estufa a 333K (60°C) durante 2 horas, se deja enfriar y se pesa nuevamente. Esta operación se repite las veces que sea necesario hasta obtener peso constante (se considera peso constante cuando entre dos pesadas consecutivas la diferencia es menor al 0,01%).

Según dicha norma el porcentaje de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{G-G_1}{G} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

H = Humedad en %

G = Peso de la muestra humedad en g

G<sub>1</sub> = Peso de la muestra seca en g

#### 6.3.1.2. Metodología para determinar el contenido de las cenizas

Para determinación del contenido de cenizas igualmente el INESEFOR se utilizó la norma NMX-AA-18-1984: “Protección al ambiente-contaminación de suelo residuos sólidos municipales-determinación de cenizas”. El procedimiento por seguir consta de la medición de una muestra al ser calcinada en la mufla a 1073 K (800°C) hasta obtener peso constante se deja enfriar en un desecador y se pesa.

Según dicho procedimiento el porcentaje de cenizas en base seca se calcula con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{G_3 - G_1}{G_2 - G_1} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

C = Porcentaje de cenizas en base seca

G<sub>1</sub> = Peso del crisol vacío en g

G<sub>2</sub> = Peso del crisol más la muestra seca en g

G<sub>3</sub> = Peso del crisol más la muestra calcinada en g

#### 6.3.1.3. Metodología para determinar el poder calorífico

El análisis del poder calorífico se realizó siguiendo el protocolo PC-03-004 del Laboratorio de Química de la Atmósfera, basado en el método ASTM D-4809, descrito por la Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales. El análisis se realizó utilizando una bomba calorimétrica marca IKA, modelo 200.

La incertidumbre expandida reportada se obtuvo multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura de  $k=2$ , que para una distribución normal corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95% de confianza.

#### 6.3.1.4. Metodología para determinar el contenido de nitrógeno, carbono, potasio y calcio

Para la determinación de carbono, calcio y potasio, el INESEFOR basó el análisis en la Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero de Díaz y Hunter (1982).

Por otra parte, el análisis de nitrógeno se efectuó con la metodología analítica propuesta por Briceño y Pacheco (1984) para el estudio de suelos y plantas, donde se realiza por tratamiento de la muestra con ácido sulfúrico en presencia de catalíticos como el sulfato de sodio, sulfato de cobre, selenito de sodio, sulfato de cobre, selenito de sodio, óxido de mercurio, etc. Este proceso, llamado digestión, produce anhídrido carbónico, agua, anhídrido sulfuroso y sulfato de amonio. Para esto se utiliza la siguiente fórmula:

$$\%N = \frac{cc \times N \times 0,014 \times 100}{M} \quad (5)$$

Donde:

cc= mL de solución tipo de ácido sulfúrico.

N= normalidad de la solución tipo de ácido.

0,014= miliequivalente de nitrógeno.

M= peso de la muestra en gramos.

#### 6.4. Fase IV: Medición de gases efecto invernadero en el gasificador piloto

La segunda técnica de tratamiento que formó parte de este proyecto de investigación es la gasificación. El objetivo fue determinar cuáles son las emisiones de GEI generadas al someter la pulpa a un proceso de gasificación, en el cual se genera un gas de síntesis (syngas) que es aprovechado para la generación eléctrica.

Las pruebas de combustión se realizaron en un horno prototipo ubicado en el Icafé en Barva de Heredia, por parte del personal del CELEQ-UCR. Las muestras de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso fueron tomadas durante un ciclo de operación del gasificador. Las determinaciones se realizaron en dos escenarios de condiciones de combustión designados por la entidad anteriormente mencionada.

La metodología por seguir se encuentra acreditada por el Laboratorio de Análisis Ambiental bajo la Norma INTE-ISO 17025:2005. Para lograr dicha determinación, es necesario efectuar el muestreo en condiciones de flujo laminar, para lo cual se debe cumplir con lo establecido en el método 1 de la USEPA. En el caso del CO<sub>2</sub> la muestra fue tomada y analizada con un analizador automático llamado Testo 340, el cual es un instrumento de medición portátil para el análisis profesional de gases de combustión.

Una vez efectuado el muestreo, se procederá con los cálculos de la siguiente manera:

En el caso del dióxido de carbono, se calcula a partir de los datos de muestreo de la siguiente forma:

$$F_{Emisión} = C_{GEI} \times Q \times F \times 1000 \quad (6)$$

Donde:

$F_{\text{Emisión}}$  = Flujo de emisión de CO<sub>2</sub> (g/día)

$C_{\text{GEI}}$  = Concentración de GEI de interés en el ducto (mg/Nm<sup>3</sup>)

$Q$  = Caudal normalizado de los gases (Nm<sup>3</sup>/h)

$F$  = Factor de ajuste temporal por el número de horas de operación por día natural

La determinación de metano y óxido nitroso como emisión de fuentes fija está basada en el método 18 de la USEPA y será una modificación al método PMA-046 “Determinación de compuestos orgánicos volátiles en emisiones de fuentes”, el cual se encuentra acreditado por el Laboratorio de Análisis Ambiental bajo la Norma INTE-ISO 17025:2005. Dicha modificación consistirá en acoplar al final del sistema de medición de gases, un contenedor evacuado (al vacío) con una bolsa *tedlar*, en la cual se capturará una muestra de gas. Las muestras serán tomadas de forma independiente y serán debidamente identificadas y trasladadas al Laboratorio para su posterior análisis por cromatografía de gases.

Para la determinación se prepararán curvas de calibración con al menos cinco patrones de un estándar certificado cuyo coeficiente de correlación debe ser mayor a 0,995; además se inyectará una réplica de un patrón como mecanismo de control de calidad. Una vez analizadas las muestras se procederá con la determinación de la concentración del gas en la muestra en ppm, interpolando directamente en la curva de calibración ajustada linealmente por mínimos cuadrados simples.

Por último se calculará la emisión a partir de la siguiente ecuación:

$$Cn_{emisi3n} = \left( \frac{\left( m \times \frac{P \times M}{R \times T} \right) \times V_{bolsa}}{Q_{std}} \right) \quad (7)$$

Donde:

$Cn_{emisi3n}$  = Concentraci3n de la emisi3n ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$m$  = pendiente de la regresi3n lineal ( $\mu\text{mol}/\text{mol}/\text{min}$ )

$P$  = Presi3n ambiente (Pa)

Molar del gas.  $\text{MN}_2\text{O}$ = 44,0128 g/mol y  $\text{MCH}_4$ = 16,04246 g/mol

$R$  = constante de los gases ideales, 8,314

$T$  = Temperatura ambiente (K)

$V_{bolsa}$  = Volumen de la c3mara ( $\text{m}^3$ )

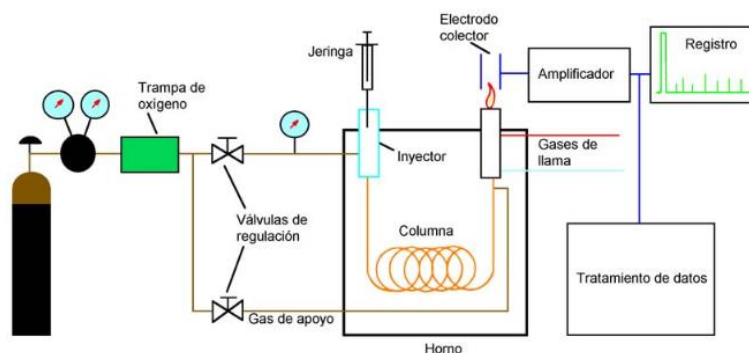
$Q_{std}$  = Caudal est3ndar de muestreo ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

6.4.1. Condiciones cromatogr3ficas empleadas en la determinaci3n anal3tica de las concentraciones de di3xido de carbono, metano y 3xido nitroso en ambas tecnolog3as

Para los an3lisis en cualquiera de los sistemas descritos se utilizar3 un cromat3grafo de gases marca Agilent, modelo 7890A, el cual cuenta con un detector de ionizaci3n de llama (FID) para el an3lisis de metano y con un micro-detector de captura electr3nica ( $\mu\text{ECD}$ ) para el 3xido nitroso.

La muestra es introducida por el puerto de inyecci3n, el cual se trata de una c3mara situada a la entrada de la columna, calentada independientemente de esta, y que suele tener una membrana de caucho a trav3s de la cual se introduce la muestra con la ayuda de una

microjeringa hipodérmica. Dentro del horno, la columna se conecta en un extremo al puerto de inyección y en el otro al detector. Los detectores son dispositivos que indican y miden los solutos en la corriente del gas acarreador, convirtiendo una señal no medible directamente en una señal elaborable de una propiedad física. Esta señal es elaborada por una comparación entre el gas acarreador puro (blanco) y el mismo gas llevando cada uno de los componentes previamente separados en la columna, esto es traducido en una señal eléctrica que es amplificada y registrada al momento de salir de la columna (registro) (Olguín y Rodríguez, 2004) (ver Figura 16).



**Figura 16.** Esquema de utilización del cromatógrafo de gases

*Fuente: García y Silva, 2006.*

El sistema operó bajo las condiciones que se detallan a continuación:

**Cuadro 8.** Descripción de las condiciones cromatográficas utilizadas para la determinación de la concentración de metano y óxido nitroso.

Condición	Metano	Óxido nitroso
Temperatura del puerto de inyección (°C)	200	200
Columna capilar	Agilent HP-PLOTQ	Agilent HP-PLOTQ

Condición	Metano	Óxido nítrico
Temperatura del horno (°C)	35	35
Detector	FID	Mecd
Temperatura del detector (°C)	300	250
Flujo del gas de arrastre (mL/min)	12	6

*Fuente: LAA, 2016.*

### 6.5. Incertidumbre de los resultados

Los datos utilizados fueron mediciones directas, por lo que la propagación del error se calculó con una incertidumbre combinada, la cual se obtiene de los valores de otras cantidades, y es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos. Las varianzas o covarianzas de estas otras cantidades ponderadas es de acuerdo con cómo el resultado de la medición varía con cambios en estas cantidades (Harris, 2007).

Para determinarla se aplica las siguientes fórmulas:

- Suma y resta:  $y = a + b + c + \dots$

$$u_{(y)} = \sqrt{u_{(a)}^2 + u_{(b)}^2 + u_{(c)}^2} \dots \quad (9)$$

- Productos y cocientes:  $y = abc$  ó  $y = a/bc$

$$u_{(y)} = \sqrt{u_{(a)}/a^2 + u_{(b)}/b^2 + u_{(c)}/c^2} \dots \quad (10)$$

- Exponentes:  $y = a^n$

$$\frac{u_{(y)}}{Y} = n \left( \frac{u_{(a)}}{a} \right) \quad (11)$$

Es importante destacar que los resultados analizados en los laboratorios se calculan con una incertidumbre que posee un límite de repetitividad multiplicado por 2 para un nivel de confianza del 95%.

#### 6.6. Fase IV: Análisis de viabilidad de la conversión del sistema actual a la gasificación de pulpa residual

Se realizó un análisis comparativo entre ambas tecnologías (compost y gasificación) en cuanto a tres variables: técnica, económica y ambiental. Para esto se efectuó una adaptación de la matriz de Evaluación de Alternativas Tecnologías y la matriz de Comparación de Costos de Tecnologías del Manual de Transferencias y Adquisición de Tecnologías Sostenibles (CEGESTI 2005), con el fin de establecer un índice comparativo que incluya la variable técnica, ambiental y económica. En el Anexo 1 se encuentra la modificación realizada. Para esto se tomó como referencia el Instituto de café, el cual realiza compostaje y además adquirió un gasificador Power Lab.

Para poder evaluarlo, se le asignó color azul a los criterios de evaluación que representaban un aspecto positivo respecto a la otra y con color rojo la que representaba un aspecto negativo. Esto se evaluó con respecto a criterios de magnitud, costo e impacto en el ambiente. Además, se le asignó un porcentaje a cada aspecto positivo dependiendo de la cantidad de total de aspectos por evaluar y se le asignó un “Cero” a cada aspecto negativo. Esto con el fin de determinar numéricamente cuál de las dos tecnologías genera beneficios en términos técnicos, ambientales y económicos. Añadido a esto, para las variables no comparables entre ambas tecnologías se realizó la determinación de ventajas y desventajas de ambos sistemas.

La temporalidad de la comparación dependió de las unidades de tiempo en que fuera reportada la información de los kilogramos de residuo y litros de gas producido por ambas tecnologías.

## **7. Presentación y análisis de resultados**

### **7.1. Determinación de línea base de impactos ambientales del tratamiento actual de la pulpa residual de café**

Esta fase estuvo conformada por dos etapas, una etapa diagnóstica y otra experimental. La primera de ellas consistió en la visita a 20 Beneficios pertenecientes a seis regiones cafetaleras, en la cual se aplicó una encuesta de diagnóstico, que permitió identificar aquellos que presentarán las condiciones aptas para el muestreo de GEI. En la segunda, se realizó la extracción en campo de muestras de GEI en montículos de pulpa residual de café construidos en los Beneficios seleccionados. Ambas etapas se presentan a continuación.

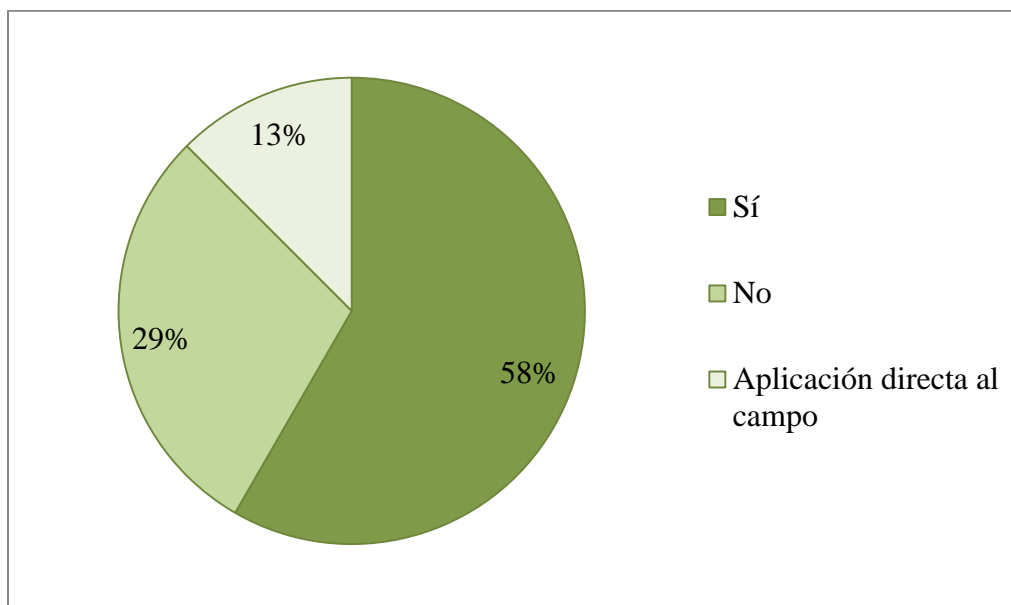
#### **7.1.1. Datos obtenidos de la aplicación de encuestas a la muestra de Beneficios**

En el apéndice 1, el cual es de elaboración propia, se presentan los resultados obtenidos de las encuestas aplicadas a los Beneficios seleccionados del Valle Central, Valle Central Occidental, Orosi, Tarrazú, Turrialba y Brunca. Estos datos permitieron aportar información sobre la gestión de los residuos de pulpa de café, las sustancias aplicadas para su secado y aceleración del proceso de degradación y condiciones del sitio de disposición en cada uno de ellos. Esto con el fin de determinar las variantes y metodologías empleadas, las cuales sirvan de guía para la selección de Beneficios con condiciones óptimas de muestreo.

#### **7.1.2. Beneficios seleccionados para el muestreo de GEI**

A partir de las encuestas realizadas se determinó que el 58% de los Beneficios realizan volteo, mientras que el 29% dispone el residuo en un sitio dentro del cafetal y cuando

termina la cosecha lo aplica al campo. El 13% aplica la pulpa directamente al campo después de su generación (ver Gráfico 2).



**Gráfico 2.** Porcentaje de Beneficios que realizan volteo como método de tratamiento de la pulpa residual, 2015.

Como se mencionó en la etapa metodológica 6.2.1., se realizó una segunda selección de Beneficios basada en las condiciones óptimas de muestreo, al proceso de compostaje empleado (realización de volteo), características del sitio y cercanía del Beneficio. En el Cuadro 9, se muestran los Beneficios seleccionados, donde se incluyó el sector Valle Occidental, Turrialba y Orosi.

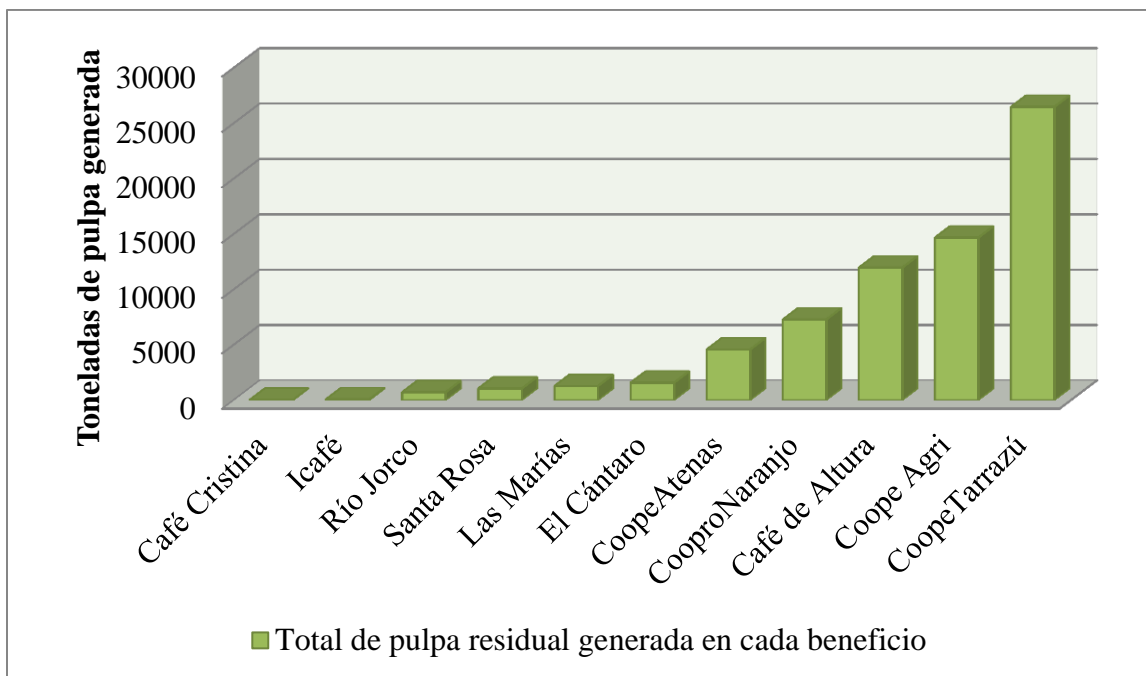
**Cuadro 9.** Beneficios seleccionados para la determinación de los flujos de emisión de GEI en sistemas de compostaje como método de tratamiento de los residuos de pulpa

<b>Beneficio</b>	<b>Zona productiva</b>	<b>Altitud de la zona de producción (msnm)</b>
CoopeTarrazú	Alta	1 374
Río Jorco	Alta	1 308
El Cántaro	Media	1 190
CooproNaranjo	Media	1 086
CoopeAtenas	Media	742
Las Marías	Media	1 264
Café de Altura	Media	1 016
Café Cristina	Media	1 300
Santa Rosa	Baja	825
CoopeAgri R.L.	Baja	712

*Fuente: Icafé, 2015.*

Es importante destacar que el Icafé cuenta actualmente con más de 270 Beneficios inscritos, esto significa que la muestra de estudio fue de aproximadamente un 5% en función de la cantidad de miembros; no obstante, si se compara en términos de la cantidad de producción, represente alrededor del 60% del total.

En el Gráfico 3, se puede observar la cantidad de pulpa generada en cada uno de los Beneficios seleccionados según el café reportado por Beneficio para la cosecha 2015- 2016. Esto se realizó con base en datos aportados por el Icafé (2015), en el cual se establece que una fanega procesada genera 0,12 toneladas de pulpa residual. Esto sirvió de insumo para tener un estimado de la cantidad de pulpa que llegó a los patios de composteo en cada Beneficio.



Fuente: Elaboración propia basado en datos del Icafé (2016).

**Gráfico 3.** Producción promedio de pulpa residual por cosecha en los Beneficios seleccionados para el muestreo de Gases Efecto Invernadero, período 2015-2016.

### 7.1.3. Emisiones de GEI generadas a partir del compostaje como sistema de tratamiento de los residuos de pulpa de café

La segunda etapa para la determinación de la línea base de impactos ambientales del compostaje, consistió en la medición del flujo de GEI: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso. Esto se realizó durante el proceso de degradación para cada uno de los sistemas de compostaje de los Beneficios seleccionados. En el Cuadro 10, se presenta un resumen detallado de las metodologías, características y variables controladas en los Beneficios seleccionados.

**Cuadro 10.** Detalle de las principales características y variables controladas en los muestreos realizados en cada uno de los Beneficios seleccionados.

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
Las Marías	Región Central	527.31	Aire libre-superficie de suelo	6 semanas	4	48	Sí	1	50.9	26.04	38.69	Ninguna	-	-
Coopro-Naranjo	Región Central Occidental	853.328	Aire libre-superficie de suelo	12 semanas	9	112	No	Ninguno	50.1	26	38.03	Microorganismo en el tornillo	No especificada	A la tercera semana se encontró el montículo en otro lugar, sin embargo esto no fue anotado en la bitácora

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
														entregada
<b>El Cántaro</b>	Región Central Occidental 1	518.63	Aire libre-superficie de suelo	4 semanas	3	12	Sí	18	49	22	33.72	Microorganismo en el tornillo Cal	No especificada 126 kg	-
<b>Café de Altura</b>	Región Central Occidental 1	853.33	Bajo techo-superficie de cemento	7 semanas	6	144	No	Ninguno	61.50	26.30	38.22	Microorganismo en el tornillo Lodos de la STAR	No especificada Por cuatro paladas de broza aplican una de lodos.	A la tercera semana del muestreo se encontró el montículo con pisadas, por lo que se decidió

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
Coope-Atenas	Región Central Occidental 1	519.13	Aire libre-superficie de suelo	12 semanas	8	96	Sí	4	58.40	33.90	38.28			descartarlo y empezar de nuevo el experimento.
												Bacteria ENVIRON OC-501	1 onza	Este fue cambiado a sitio bajo techo replicando condiciones de los montículos
												Aserrín	media palada	originales.
												Abono preparado	media palada	Además, a la semana

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
														cuatro se encontró el montículo con huellas de vehículo.
<b>Café Cristina</b>	Región Orosi	513.06	Bajo techo-superficie de pulpa	11 semanas	8	84	No	Ninguno	49.10	23.40	37.58	Ninguna	-	-
<b>Coope-Tarrazú</b>	Región Tarrazú	504.36	Aire libre-superficie de cemento	11 semanas	7	88	No	Ninguno	47.10	16.00	38.88	Cipermatrina (insecticida superficial)	No especificada	Se atomizó con insecticida a superficie al veinte veces en todo el proceso de

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
														muestreo
<b>Río Jorco</b>	Región Tarrazú	513.67	Aire libre-sobre plástico	9 semanas	8	100	No	Ninguno	47.50	19.00	38.57	Ninguna	-	-
<b>Santa Rosa</b>	Región Turrialba	518.63	Bajo techo-superficie de suelo	4 semanas	3	12	Sí	5	37.00	16.00	35.66	Ninguna	-	-
<b>Coope-Agri</b>	Región Brunca	428.49	Bajo techo-superficie de suelo	12 semanas	9	108	Sí	1	51.10	16.00	37.05	Microorganismos Cachaza de caña de azúcar	No especificada	-
<b>Instituto de Café</b>	Región Central Occidental	500	Aire libre-superficie de cemento	8 semanas	8	96	Sí	6	65.26	29.18	41.99	Ninguna	-	Experimento controlado con volteo.

Beneficio	Región cafetalera	kg del montículo de pulpa	Sitio	Tiempo de degradación	N* muestreos	Total muestras	Volteo	Cantidad de volteos	T <sub>máx</sub> ** del montículo (°C)	T <sub>mín</sub> del montículo (°C)	T <sub>prom</sub> del montículo (°C)	Sustancias agregadas	Proporción	Otros
		500	Aire libre-superficie de cemento	8 semanas	8	96	No	Ninguno	58.06	31.60	41.79	Ninguna	-	Experimento controlado o sin volteo.
<b>TOTAL</b>					<b>81</b>	<b>996</b>								

\*N: Número

\*\*T máx, mín, prom: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Las variables en el Cuadro 10 fueron de suma importancia para el conocimiento del comportamiento del compostaje y las metodologías aplicadas en cada uno de los Beneficios. En este se puede observar que la duración del proceso de compostaje fue variado en la mayoría del Beneficios seleccionados, y fue proporcional a la degradación de la materia orgánica y la disminución de la temperatura interna del montículo. Esto estuvo directamente relacionado con la cantidad de volteos realizados y la aplicación de sustancias específicas en cada uno de ellos, lo cual permitió la aceleración del proceso de degradación.

Como mencionan Contreras y Rivas (2014), las prácticas de volteo adecuadas constituye el principal factor que genera altas velocidades de descomposición y estabilización de los productos. En cuanto a la temperatura de la biomasa, cuando se alcanza la etapa de maduración esta descenderá paulatinamente hasta presentarse en valores muy cercanos a la temperatura ambiente. En estos momentos, se dice que el material se presenta estable biológicamente y se da por culminado el proceso (Robles, 2015).

Unido a esto, la incorporación de aditivos o inoculantes mejora la composición química y la estructura del compost, facilita la biotransformación de los residuos orgánicos, incrementan la población de microorganismos en los primeros días y aceleran dicho proceso permitiendo disminuir el tiempo de compostaje (Salazar, 2014).

El proceso más corto se llevó a cabo en cuatro semanas, en el Beneficio El Cántaro, ubicado en la Región Occidental y perteneciente a la zona media de producción cafetalera. Por otra parte, los procesos con mayor duración fueron los de los Beneficios Coopro-Naranja, Coope-Atenas y Coope-Agri ubicados en zona media y baja de producción respectivamente. Los muestreos fueron realizados una vez por semana hasta dar por

finalizado este proceso. En el Cuadro 10, se puede apreciar la cantidad de volteos y sustancias aplicadas que generaron la variación del proceso de compostaje.

El peso de la biomasa utilizada para la construcción del montículo por muestrear también fue diverso en cada sitio, este se encontró entre 428 y 427 kg, a excepción de dos montículos que por las características del material fue necesario utilizar 853 kg. Los pesos variaron respecto a lo planteado en la metodología, pues dependiendo del tratamiento aplicado, estos poseían mayor o menor humedad, lo que implicó la modificación en la cantidad pesada de material en cada Beneficio.

También existió una variación, en cuanto a la característica del volteo identificada en la etapa diagnóstica, pues todos los Beneficios habían reportado la realización de volteo como parte del tratamiento de pulpa de café. Sin embargo, en el momento en que se efectuaron los muestreos algunos de ellos no realizaban las prácticas reportadas en las encuestas. Por lo tanto, se decidió replicar en el montículo experimental las prácticas reales realizadas por cada Beneficio.

Respecto a los dos sistemas de tratamientos encontrados, el Beneficio que realizó una mayor cantidad de volteos fue El Cántaro, con 18 volteos en un período de cuatro semanas. Según López y Mendoza (2012), la aireación no debe ser excesiva, ya que se puede enfriar el material y reducir la actividad metabólica de forma prematura. Asimismo, llega un momento en que el volteo no permite un incremento de la temperatura por encima de los valores ambientales. Lógicamente, a partir de ese momento, someter la pila a más volteos sería completamente inútil. Asimismo, la aireación excesiva puede acelerar el escape de los

gases desde el centro de la pila, teniendo como resultado la disminución de la temperatura, pérdida de la humedad y de la energía (Jiang *et al.*, 2015).

En cuanto a las emisiones de GEI para ambos sistemas (volteo y no volteo), en el Cuadro 11 se puede apreciar que los flujos de emisión de dióxido de carbono fueron superiores a los flujos de metano y óxido nitroso. El comportamiento de dichas emisiones fue variado, sin embargo si se evidencian las diferencias. Por ejemplo, en aquellos Beneficios que aplicaron volteo, se obtuvieron mayores emisiones de dióxido de carbono, lo cual está directamente relacionado con la aireación (oxigenación) del sistema, lo que favorece una descomposición de tipo aerobia (Ahn *et al.*, 2011).

Por el contrario, en aquellos donde el volteo no constituyó una práctica, se tuvieron mayores emisiones de metano, lo cual responde a una descomposición con limitada disponibilidad de oxígeno (baja aireación). Esto conlleva a una degradación del tipo anaerobia (Ahn *et al.*, 2011), ambos efectos se ilustran en los Gráficos 4 y 5. Como mencionan Jiang *et al.*, (2015) en su estudio, cuanto mayor sea la frecuencia de aireación, las emisiones de metano va a ser menores.

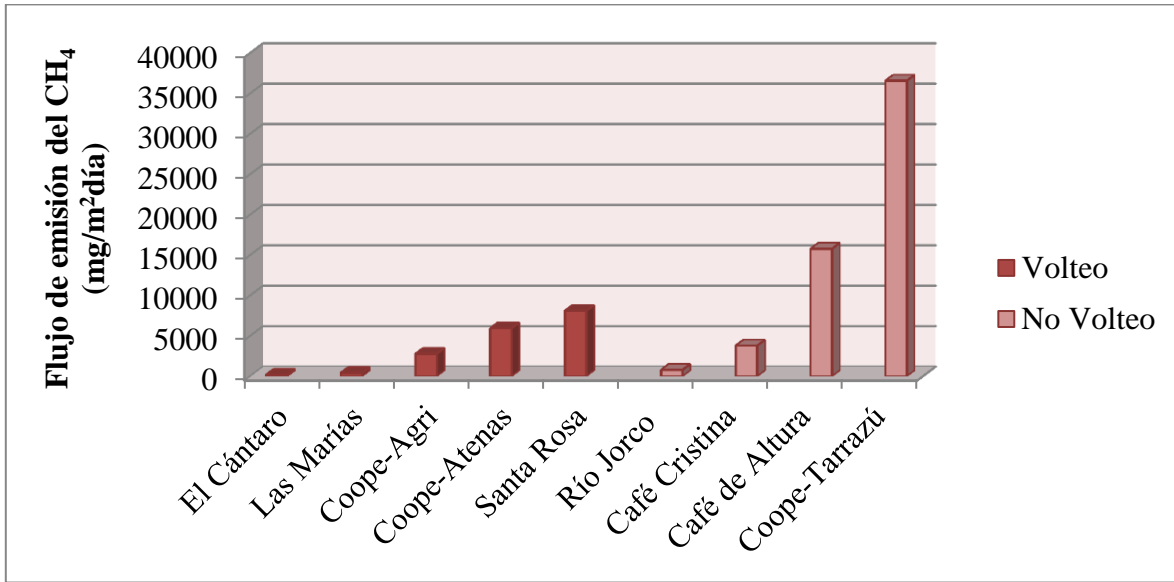
En procesos no aireados, la concentración de oxígeno que puede detectarse en los espacios intersticiales de la pila irá disminuyendo desde los valores cercanos al 21% (concentración a la que se encuentra el O<sub>2</sub> en el aire a presión atmosférica) al comienzo del proceso. Por el contrario, en procesos aireados, la concentración de CO<sub>2</sub> se incrementa como consecuencia del metabolismo microbiano desde 0,03% (concentración de CO<sub>2</sub> en el aire) al comienzo del proceso de compostaje, pudiendo alcanzar valores del 5% al final del proceso (López y Mendoza, 2012).

**Cuadro 11.** Resultados obtenidos de para las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxidos nitroso en los sistemas de composteo para los Beneficios seleccionados

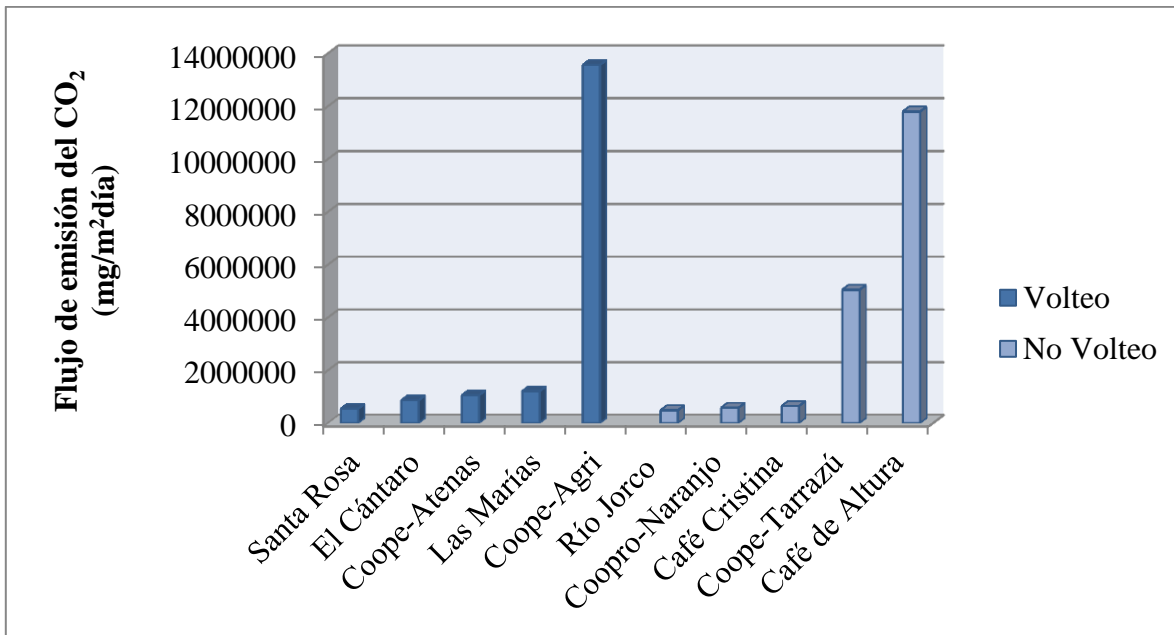
Beneficio	Peso pulpa (kg)	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>2</sup> día)	CH <sub>4</sub> (kg/m <sup>2</sup> día)	N <sub>2</sub> O (kg/m <sup>2</sup> día)	Período de compostaje (días)	CO <sub>2</sub> (mg CO <sub>2</sub> /kg pulpa)	CH <sub>4</sub> (mg CH <sub>4</sub> /kg pulpa)	N <sub>2</sub> O (mg N <sub>2</sub> O/kg pulpa)	CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /F.P. °)	CH <sub>4</sub> (kg CH <sub>4</sub> /F.P. °)	N <sub>2</sub> O (kg N <sub>2</sub> O/F.P. °)
Las Marías <sup>a</sup>	527.31	1,21 ± 0,18	0,417 ± 0,091	0,0319 ± 0,0090	38	87 ± 13	30,1 ± 6,6	2,30 ± 0,65	9,2 ± 1,4	3,16 ± 0,69	0,242 ± 0,068
Coopro-Naranjo <sup>b</sup>	853.328	0,58 ± 0,12	20,6 ± 1,4	0,60 ± 0,26	79	53 ± 11	1905 ± 129	56 ± 24	5,7 ± 1,2	200 ± 14	5,9 ± 2,5
El Cántaro <sup>a</sup>	518.63	0,86 ± 0,12	0,172 ± 0,055	0,257 ± 0,026	29	48,2 ± 6,7	9,6 ± 3,1	14,3 ± 1,5	5,07 ± 0,71	1,01 ± 0,33	1,51 ± 0,16
Café de Altura <sup>b</sup>	853.33	11,8 ± 1,5	15,8 ± 3,2	0,521 ± 0,064	30	415 ± 53	555 ± 112	18,3 ± 2,2	43,6 ± 5,6	58 ± 12	1,93 ± 0,23
Coope-Atenas <sup>a</sup>	519.13	1,053 ± 0,030	5,94 ± 0,28	1,60 ± 0,47	78	158,2 ± 4,5	893 ± 42	240 ± 71	16,65 ± 0,47	93,9 ± 4,4	25,3 ± 0,83
Café Cristina <sup>b</sup>	513.06	0,65 ± 0,11	3,81 ± 0,26	0,49 ± 0,16	77	97 ± 16	571 ± 39	73 ± 24	10,2 ± 1,7	60,1 ± 4,1	7,7 ± 2,5
Coope-Tarrazú <sup>b</sup>	504.36	5,05 ± 0,62	36,6 ± 1,4	6,01 ± 0,26	75	751 ± 92	5439 ± 208	894 ± 39	79,0 ± 9,7	572 ± 22	94,1 ± 4,1
Río Jorco <sup>b</sup>	513.67	0,49 ± 0,11	0,80 ± 0,15	0,208 ± 0,069	59	56 ± 13	92 ± 17	23,9 ± 7,9	5,9 ± 1,4	9,6 ± 1,8	2,51 ± 0,83
Santa Rosa <sup>a</sup>	518.63	0,542 ± 0,067	8,1 ± 2,0	29,6 ± 1,4	32	33,4 ± 4,1	501 ± 124	1836 ± 87	3,52 ± 0,43	53 ± 13	193,1 ± 9,2
Coope-Agri <sup>a</sup>	428.49	13,6 ± 2,1	2,78 ± 0,23	2,68 ± 0,36	84	2659 ± 411	545 ± 45	526 ± 71	280 ± 43	57,3 ± 4,7	55,4 ± 7,5
Instituto de Café <sup>a</sup>	500	0,80 ± 0,18	< 0,012	< 0,040	50	80 ± 18	< 0,1	< 0,1	8,4 ± 1,9	< 0,01	< 0,01
Instituto de Café <sup>b</sup>	500	1,05 ± 0,28	25,1 ± 4,2	1,26 ± 0,48	50	105 ± 28	2506 ± 419	126 ± 48	11,1 ± 3,0	264 ± 44	13,3 ± 5,1

Nota: <sup>a</sup> Se le aplicó volteo, <sup>b</sup> no se le aplicó volteo, <sup>c</sup> Fanega Procesada.

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en el Laboratorio de Análisis Ambiental (2016).

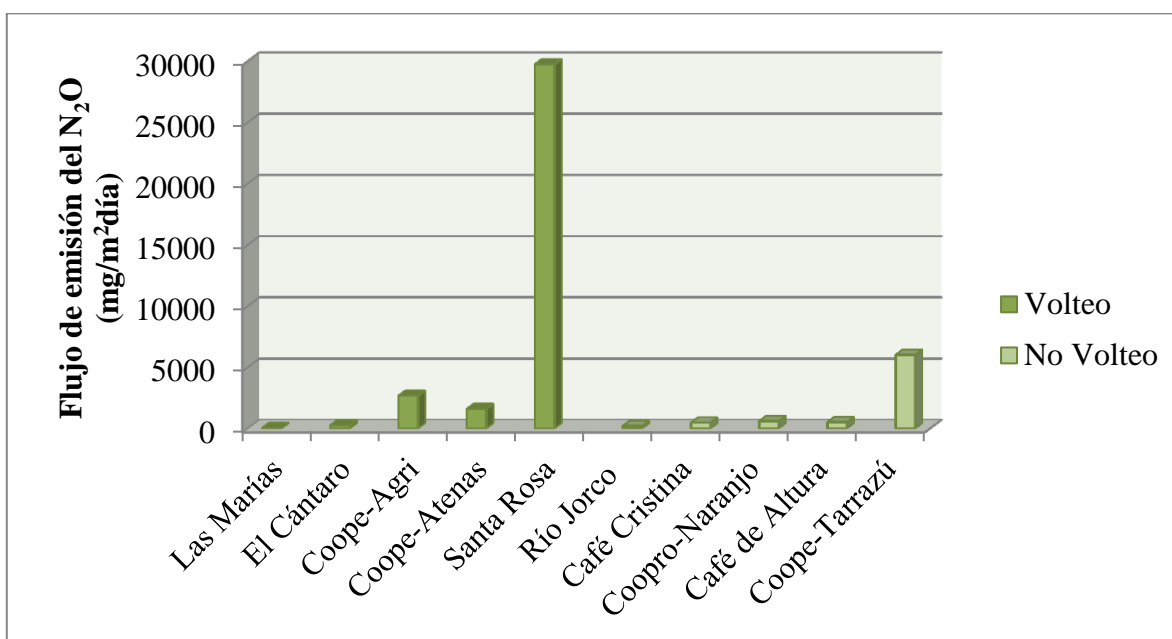


**Gráfico 4.** Comparación de los flujos de emisión de metano en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis



**Gráfico 5.** Comparación de los flujos de emisión de dióxido de carbono en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis.

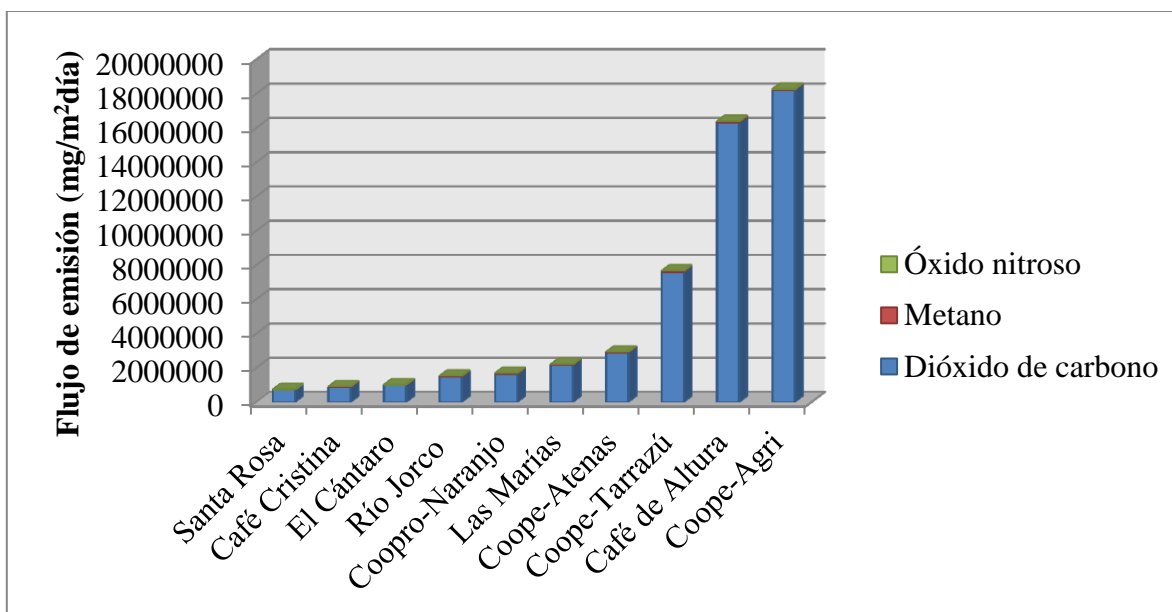
Las emisiones de cada GEI en términos generales presentaron una ligera tendencia en aumento en aquellos sistemas que aplicaron volteo, a excepción del metano el cual se ve favorecido por condiciones anaeróbicas. En la Figura 5 también se observa la tendencia al aumento del óxido nitroso en los sistemas aeróbicos (aquellos donde se aplicó volteo). Dichos resultados están relacionados con una mayor eficiencia de mezclado que a su vez aumenta la eficiencia de degradación, pero además aporta un aumento en la porosidad de las capas superiores e intersticiales del material, lo cual permite una mayor difusión de los gases en el interior del montículo hacia la atmósfera (Ahn *et al.*, 2011).



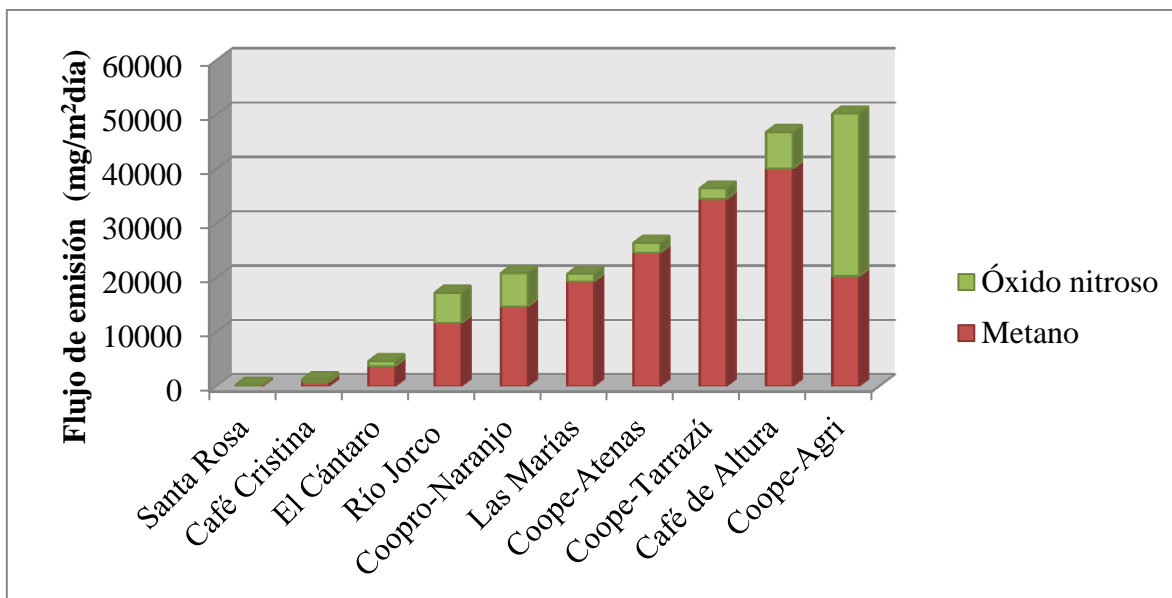
**Gráfico 6.** Comparación de los flujos de emisión de óxido nitroso en la pulpa residual de café en los dos sistemas de compostaje predominantes en los Beneficios en análisis.

En el Gráfico 7 se muestra el comportamiento de los flujos de emisión de los tres contaminantes en análisis durante el proceso del compostaje en cada Beneficio. En este se puede apreciar que en todos predomina como mayor emisor a lo largo del proceso el Dióxido de carbono, destacándose los Beneficios Coope-Agri y Café de Altura, con 18 219

680 y 16 335 805 mg/m<sup>2</sup>día respectivamente. En cuanto a los otros dos contaminantes en estudio existió una tendencia a una mayor emisión de metano en comparación del óxido nitroso, sin embargo en el Beneficio Coope-Agri no existió dicha condición pues el óxido nitroso representó el 59,64% de las emisiones (ver Gráfico 8).



**Gráfico 7.** Comportamiento de las emisiones de gases efecto invernadero en la pulpa residual de café en los Beneficios en análisis.



**Gráfico 8.** Comportamiento de las emisiones de óxido nítrico y metano gases efecto invernadero en la pulpa residual de café en los Beneficios en análisis.

7.1.3.1. Comportamiento de las emisiones de GEI en sistemas de compostaje sin volteo: aplicación del método de sonda

Una de las particularidades que presentaron los sistemas a los cuales no se les aplicó volteo, es que en la parte externa del montículo se generó una capa de material que se endureció y actuó como una especie de cobertor (ver Figuras 17 y 18). Como se puede observar, esta estructura limita la difusión de los gases, mantiene la humedad y conserva la temperatura interna del montículo. Por esta razón fue necesario generar una segunda metodología descrita en la sección 6.2.2.1., la cual permitió evaluar la concentración dentro de los montículos a los cuales no se les aplicó volteo y con ello determinar de manera aproximada las emisiones de GEI tras el rompimiento de esa capa rígida externa.



**Figura 17.** Estructura interna e externa formada en el montículo utilizado para la toma de muestras de gases efecto invernadero en el Beneficio Coope-Tarrazú, 2016.

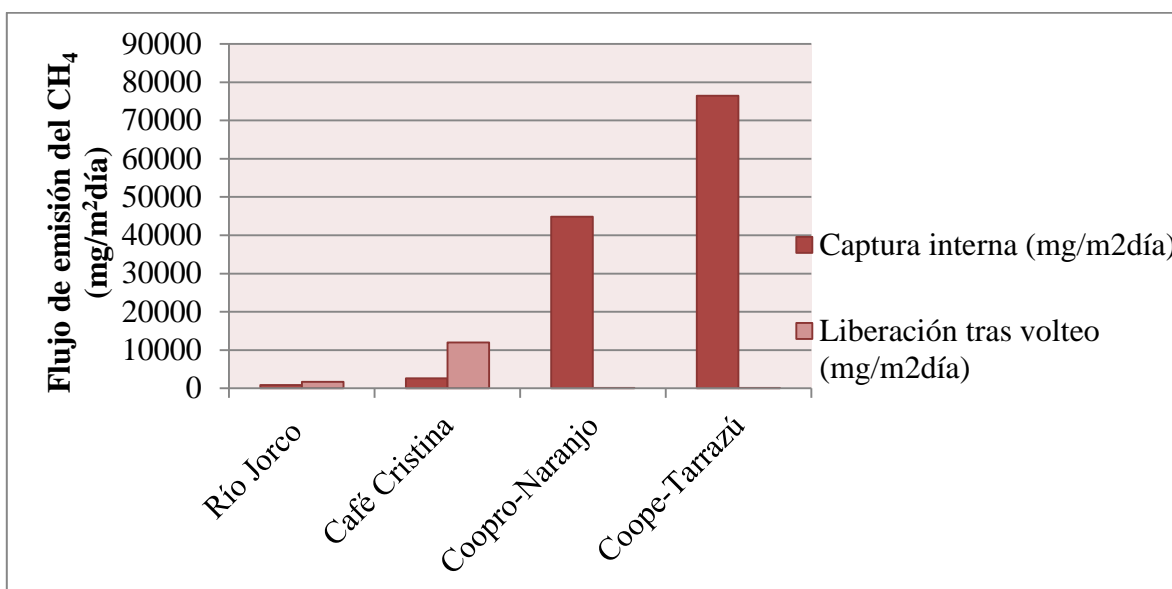


**Figura 18.** Estructura interna e externa formada en un montículo original en el Beneficio Río Jorco, 2016.

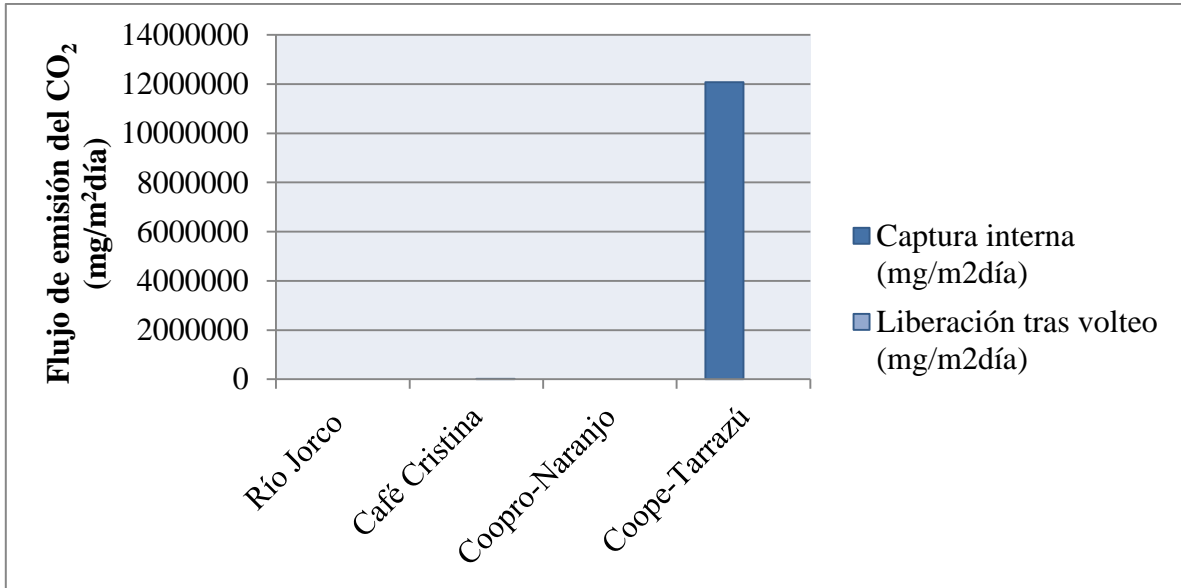
Estos trabajos de campo presentaron un grado de complejidad puesto que cualquier manipulación pudo significar una pérdida del gas acumulado en el interior del montículo. Es importante recordar que tras la aplicación del método de sonda se empleó un volteo intenso para consecutivamente ejecutar el método de campana. Esto con el fin de determinar la diferencia de gas acumulado. En los Gráficos 9, 10 y 11 se presentan los resultados obtenidos en la captura interna (con el método de sonda) y tras la liberación (con el método de campana) para cada uno de los contaminantes de GEI.

En estos se puede observar que existe una tendencia a disminuir el flujo de emisión tras la manipulación del montículo, lo cual se puede asociar con la liberación súbita de los gases

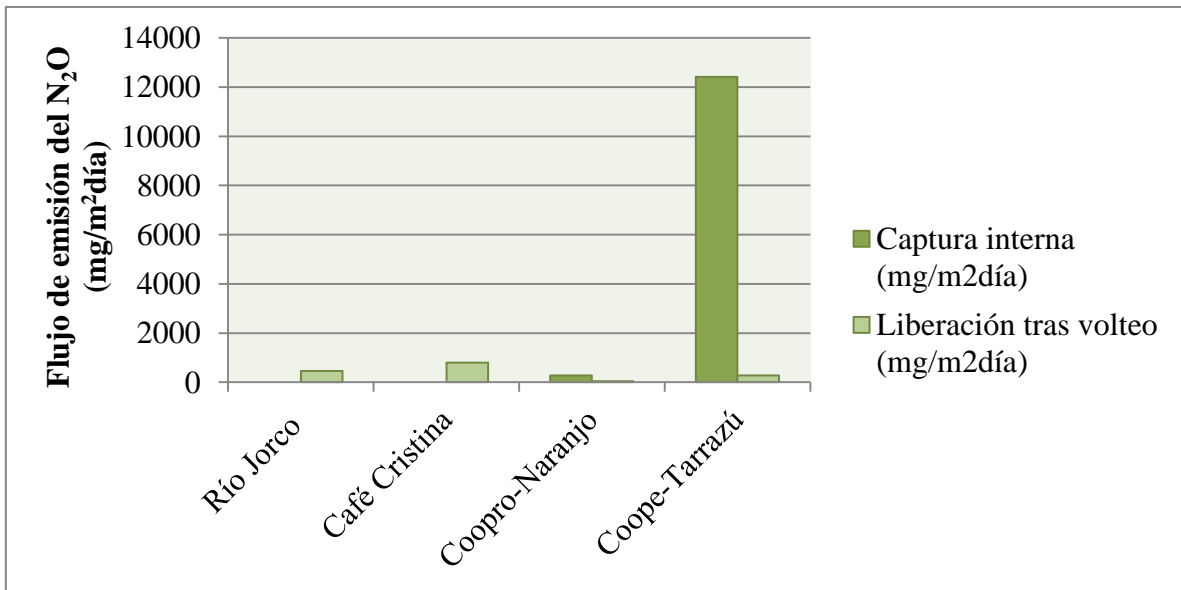
retenidos dentro de ellos. Además, se evidencia la alta concentración de emisiones de GEI que se obtuvo en el Beneficio Coope-Tarrazú. Según la información recolectada vía bitácora de su tratamiento no puede ser relacionada y explicada con alguna situación en especial presentada en comparación con los otros Beneficios. No obstante, la única variante fue la aplicación de 20 atomizaciones superficiales con un insecticida conocido como “cipermetrina”, además las condiciones ambientales durante los muestreos registraron temperaturas de hasta 40 °C.



**Gráfico 9.** Comportamiento de las emisiones de metano al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo



**Gráfico 10.** Comportamiento de las emisiones de dióxido de carbono al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo.



**Gráfico 11.** Comportamiento de las emisiones de óxido nitroso al aplicarle el método de sonda y consecutivamente el método de campana en los Beneficios que no realizaban volteo.

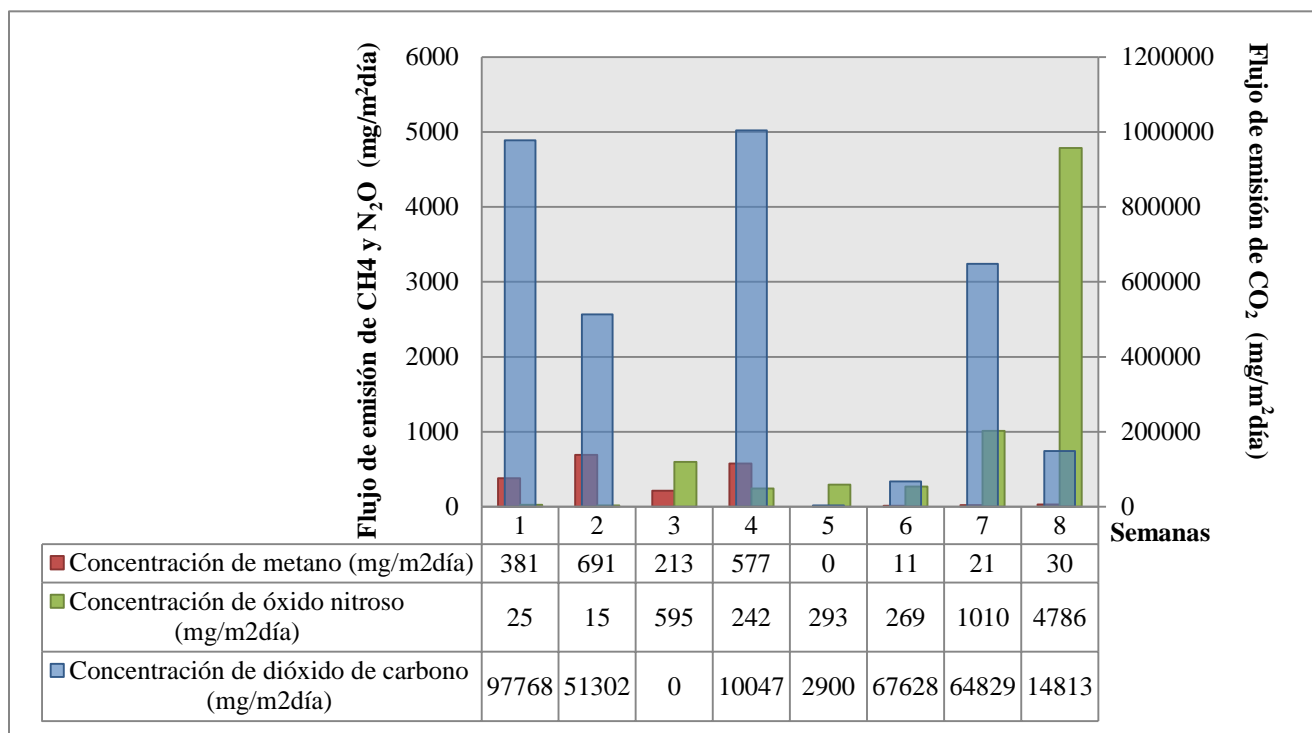
### 7.1.3.2. Emisiones generadas en el experimento de compostaje controlado: Icafé

Este experimento consistió en replicar la metodología seguida en todos los Beneficios pero en condiciones que permitieran un mayor control de las variables y un mayor registro de la aplicación de volteo. Esto con el fin de poder comparar las emisiones con los resultados obtenidos en los Beneficios seleccionados. Para eso se construyó montículos que representarán los dos sistemas predominantes en los Beneficios, uno sin volteo y otro con volteo.

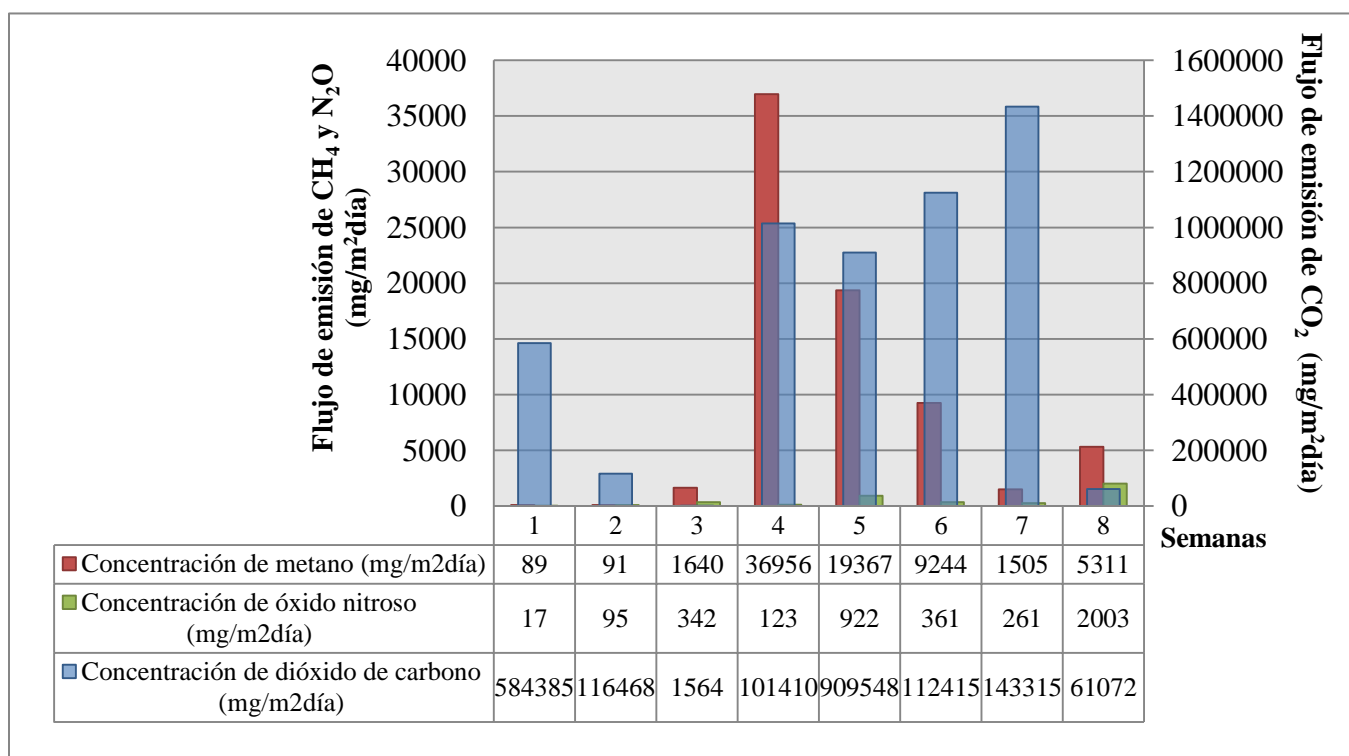
Los resultados obtenidos sirvieron de punto de comparación, pues presentó, al igual que en los Beneficios en análisis, emisiones de CH<sub>4</sub> favorecidas en el montículo al cual no se le aplicó volteo, generando condiciones anaerobias propicias para la producción de dicho gas (ver Gráficos 12 y 13). Por otra parte, las emisiones de CO<sub>2</sub> se mantuvieron en un ámbito similar para ambos montículos, mientras que el N<sub>2</sub>O presentó una tendencia a ser mayor hacia el final del proceso y presentó mayor emisión en el montículo al cual sí se le aplicó volteo.

El comportamiento de las emisiones de óxido nitroso muchas veces es difícil de explicar, debido a que no solo depende del mezclado del material, sino que existen otros factores que cobran mayor importancia. Entre estos se encuentra el contenido de nitrógeno, la forma libre en que se encuentra este en el material (reducida u oxidada) y el tipo de microorganismo presente en el sistema (Mulbry, 2014). Esto difiere significativamente en la degradación del carbono, el cual se encuentra más fácilmente disponible y en mayores cantidades en relación con el nitrógeno.

Es importante mencionar que ambos montículos estuvieron expuestos desde la semana seis a lluvias a lo largo de las semanas, por lo tanto se tomó la decisión de dar por finalizados los muestreos. Aunque no existe una relación directa relacionada con los valores cero del Gráfico 12, las condiciones climáticas pudieron afectar los flujos de emisión.



**Gráfico 12.** Comportamiento de las emisiones de GEI generadas en el montículo de pulpa residual de café desarrollado en el experimento controlado en el Icafé aplicando volteo.



**Gráfico 13.** Comportamiento de las emisiones de GEI generadas en el montículo de pulpa residual de café desarrollado en el experimento controlado en el Icafé aplicando volteo

## 7.2. Resultados de la caracterización de la pulpa residual de café

En esta sección se realizó la caracterización de la pulpa residual en cuanto a su contenido de nitrógeno, carbono, potasio y cenizas. Esto mediante la toma de una muestra a varios periodos de tiempo, con el fin de determinar propiedades a lo largo del proceso. Además se determinó el poder calorífico de una muestra inicial, para evaluar si este constituye un material óptimo para la combustión en un gasificador. Esto se considera de suma importancia, ya que como indica un estudio realizado por la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica (Torres *et al.*, 2016), el análisis composicional determina

directamente la calidad, las aplicaciones potenciales y los posibles problemas ambientales relacionados con cualquier combustible. Los resultados obtenidos se encuentran en los Apéndices 2, 3 y 4.

Como se mencionó en el marco teórico, el rango óptimo de humedad para compostaje es del 45% al 60% de agua en peso de material base. En este aspecto, como se puede observar en el apéndice 2, se obtuvieron valores de humedad del 12% -85,5% m/m. Los valores al finalizar el proceso en los Beneficios se encontraron entre 53-85,13% m/m. En aquellos casos donde se puede apreciar la tendencia a aumentar a lo largo del proceso, se debe a que los montículos se encontraban en espacios al aire libre y por lo tanto expuesto a precipitaciones y condiciones climáticas que pudieron afectar el contenido real de humedad.

Unido a esto, la humedad es un factor determinante para mantener la temperatura idónea dentro montículo, la cual permita la reactivación de la actividad microbiana dentro del compostaje, si existe un exceso de esta la temperatura tiende a descender. Según Moreno (2008) por la evolución de la temperatura se puede juzgar la eficiencia y el grado de estabilización a que ha llegado el proceso, ya que existe una relación directa entre la temperatura y la magnitud de degradación de la materia orgánica. Asimismo, existe una relación directa entre la degradación y el tiempo durante el cual la temperatura ha sido alta. En muchas ocasiones la temperatura puede llegar a ser tan alta que inhibe el crecimiento de los propios microorganismos.

En el Apéndice 3 se puede apreciar la temperatura interna del montículo correspondiente a cada día de muestreo y su emisión de GEI asociada. Es importante destacar Beneficios tales

como Café Cristina, en el cual se reportan los valores más altos de humedad 85,45% m/m y las temperaturas internas del montículo por debajo de la temperatura de reacción 25 °C. Esto permite ejemplificar que a una alta humedad la temperatura desciende y a su vez se da inhibición de proceso.

En cuanto a la incidencia de la humedad en la combustión dentro del gasificador, se obtuvieron valores de humedad entre 68,87-82,33% m/m, en una muestra recién generada de pulpa para cada uno de los Beneficios seleccionados. Por lo tanto, según Torres *et al.*, (2016), previo a su utilización como biomasa en un proceso termoquímico, deben ser sometidas a un pretratamiento que involucre un proceso de secado y reducción de tamaño de partícula. Esto debido a que el gran contenido de agua presente en la broza de café tiende a ocasionar una reducción importante en la temperatura dentro del gasificador, puesto que sería necesario destinar una gran cantidad de energía para evaporar la humedad previamente a la etapa de gasificación o combustión. Además, Choudhury *et al.* (2015), citado por Torres et al (2016), establecen que un contenido de humedad superior al 30 % puede dificultar la ignición del gasificador y reducir el poder calorífico del gas generado en el proceso, como consecuencia del incremento en la producción de hidrógeno y metano.

El análisis de cenizas determinó que en una muestra inicial de pulpa, los valores se encuentran entre 9-35% m/m. Según lo establecido en la literatura, el contenido recomendado de cenizas para evitar los problemas operacionales, tales como la corrosión, formación de escorias, emisiones de partículas indeseadas y la deposición o acumulación de material en las paredes del reactor del gasificador, debe ser inferior a 5-6 %, dado que la formación severa de escorias y los problemas de acumulación dentro del reactor se

observan para combustibles que presentan contenidos de ceniza superiores al 12 % (Torres *et al.*, 2016).

El poder calorífico es un parámetro determinante en el potencial energético de un material, como lo establece Basu (2013) citado por Torres *et al.*, (2016) el poder calorífico de la broza de café se encuentra dentro de un intervalo de 15 MJ/kg y 20,5 MJ/kg. Los resultados obtenidos se encuentran dentro de este rango, ya que el promedio del poder calorífico de las muestras es de 16 MJ/kg (ver Apéndice 4). En comparación con el combustible que originalmente debe utilizarse para el equipo y para el cual está diseñado (la madera), el poder calorífico en seco de la madera de diferentes especies varía en un intervalo muy reducido, de 10 a 20 MJ/Kg (Francescato *et al.*, 2008), por lo tanto, el rendimiento de la pulpa en términos de poder calorífico se encuentra cercana a la madera. Además, como se puede observar en el Cuadro 12, los valores de poder calorífico se encuentran cercanos a la cascarilla de café y aserrín.

**Cuadro 12.** Poder calorífico de distintas fuentes de biomasa en comparación con la obtenida para la pulpa de café

<b>Biomasa</b>	<b>Energía Producida (MJ/kg)</b>
<b>Madera</b>	10 a 20
<b>Pellets de madera</b>	20,3
<b>Aserrín</b>	11
<b>Pellets de aserrín</b>	20,3
<b>Cáscara de café</b>	16
<b>Pulpa de café</b>	15 a 20,5

*Fuente: Forero et al., 2013.*

En cuanto a las emisiones de GEI, según Jiang *et al.* (2015), estudios sugieren que durante el proceso del compostaje alrededor del 0,1% y 9,9% del nitrógeno total puede ser emitido en forma de N<sub>2</sub>O. Además se ha mostrado que entre el 0,01% y el 0,03% del carbono orgánico inicial puede perderse en forma de CH<sub>4</sub> en pilas de compost propiamente manejado. En el Apéndice 7 se puede observar este comportamiento en los Beneficios seleccionados, en el cual un rango de 0,01-0,53% del carbono es emitido en forma de metano, mientras que el nitrógeno se libera en forma de óxido nitroso en rangos menores entre 0,0000006-0,0006%.

En el caso de dióxido de carbono, López y Mendoza (2012) aseguran que su producción, indicativa de la tasa máxima de biodegradación, ocurre en temperaturas situadas en un rango de 55-65 °C. Esto se presentó en Beneficios como Las Marías, Café de Altura y Coope-Atenas, donde se alcanzaron temperaturas dentro del montículo de hasta 61,5 °C, asociados como se mencionó anteriormente, a la mayor emisión de este contaminante a lo largo del proceso de compostaje en cada uno de ellos.

### **7.3.Emisiones de GEI en los sistemas de gasificación como tratamiento alternativo de la pulpa residual de café**

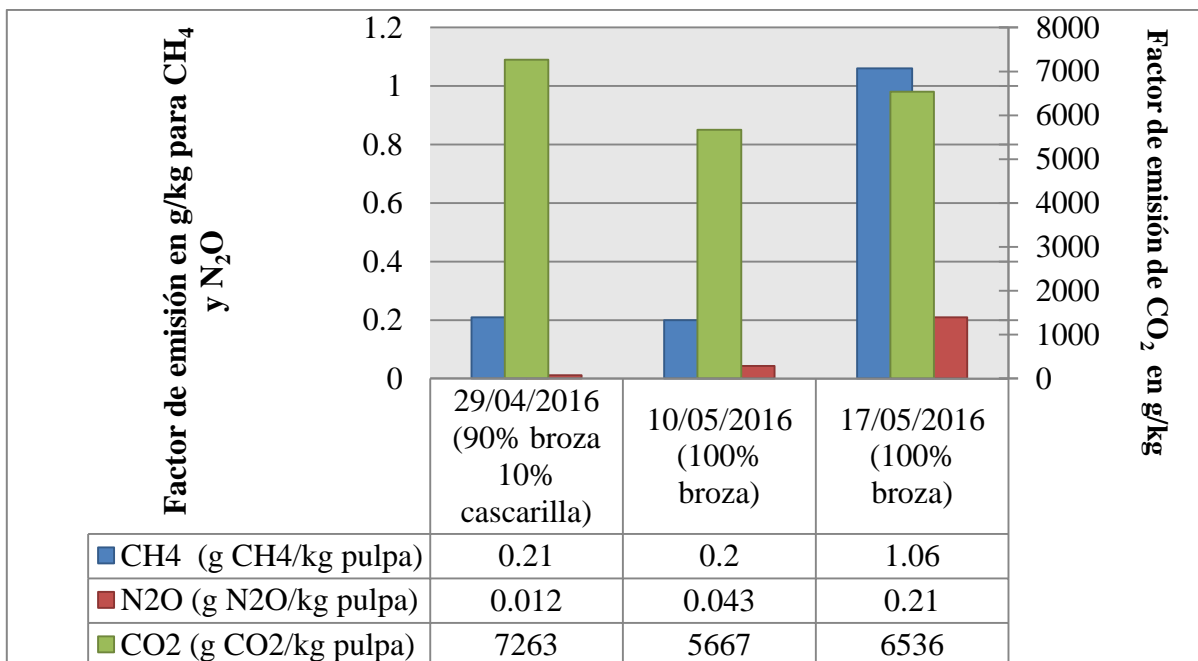
Una alternativa planteada en el Icafé para el manejo de los residuos de pulpa de café es el aprovechamiento de estos en un gasificador. Este proceso inicia cuando los residuos son secados, reduciendo su contenido de humedad en un 85%, posteriormente, la broza seca es mezclada con cascarilla en proporción 90:10 (variable entre 0% y 20% de cascarilla). Esta mezcla es introducida por una máquina que produce comprimidos de broza (o pellets), que son ingresados a un gasificador, donde la materia orgánica es transformada en un gas combustible con un alto contenido de hidrógeno conocido con el nombre de gas de síntesis

o Syngas. Finalmente, dicho gas es quemado en un motor que transforma la energía química generada en energía eléctrica (CICA, 2016).

En este estudio se analizaron las emisiones de GEI asociadas al aprovechamiento de dicho Syngas como combustible para la generación de energía eléctrica a partir de un motor de combustión, utilizando como materia prima pulpa de café residual con diferentes combinaciones de cascarilla. Esto con el fin de comparar las emisiones generadas con el tratamiento de compostaje.

Para lograrlo se efectuaron cuatro mediciones de emisiones gaseosas basadas en los métodos CTM-022 y CTM-034 de la USEPA referentes al análisis de los gases de combustión y el método 18 modificado igualmente de la USEPA, para el análisis de GEI, en este caso se analizaron específicamente los gases metano y óxido nitroso. Las combinaciones de biomasa fueron: 10% cascarilla-90% pulpa y 100% pulpa de café residual.

Los resultados de dichas mediciones se muestran en el Apéndice 6. Es importante aclarar que de las cuatro mediciones efectuadas, la primera llevada a cabo el 26 de abril del año 2016, se descartó debido a que se reportó una contaminación importante con cal en la biomasa utilizada durante esa corrida. En el Gráfico 14 se muestran gráficamente dichos resultados. En este se puede apreciar que las emisiones de dióxido de carbono se encuentran por encima de las emisiones de metano y óxido nitroso, estas últimas se encuentran en el ámbito de 0 a 1,2 gramos de GEI por kilogramo de biomasa húmeda, mientras que los primeros se encuentran en el ámbito de 5 000 a 7 500 gramos de GEI por kilogramo de biomasa húmeda.



**Gráfico 14.** Factores de emisión obtenidos para el sistema de gasificación en cual se emplearon las siguientes mezclas de biomasa: (1) 90% broza y 10% de cascarilla, (2) 100% broza y (3) 100% broza.

Cabe destacar que según el coeficiente de correlación de Pearson, la humedad de la biomasa presenta una relación inversa (inversamente proporcional) con las emisiones de CH<sub>4</sub> ( $r = -0,9987$ ) y N<sub>2</sub>O ( $r = -0,9945$ ), con una representatividad del 99,7% y el 98,9% respectivamente. En contraste, la humedad en la biomasa parece no tener ninguna relación con las emisiones de CO<sub>2</sub>, presentando un coeficiente de correlación de Pearson igual - 0,0098 con una representatividad del 0,0%; en el Cuadro 13 se muestran los datos a partir de los cuales se derivan los resultados antes descritos.

**Cuadro 13.** Condiciones de muestreo y factores de emisión obtenidos en las diferentes corridas del sistema de gasificación.

<b>Prueba</b>	<b>Mezcla</b>	<b>Flujo de entrada biomasa (kg/h)</b>	<b>Desviación estándar (kg/h)</b>	<b>Humedad en la biomasa (%)</b>	<b>Desviación estándar (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (g CH<sub>4</sub>/kg pulpa)</b>	<b>N<sub>2</sub>O (g N<sub>2</sub>O/kg pulpa)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (g CO<sub>2</sub>/kg pulpa)</b>
<b>2</b>	90% broza 10% cascarilla	17,1	0,01	16,69	0,09	0,21 ± 0,01	0,012 ± 0,001	7 263 ± 37
<b>3</b>	100% broza 0% cascarilla	27,3	0,03	16,66	0,02	0,20 ± 0,04	0,043 ± 0,009	5 667 ± 24
<b>4</b>	100% broza 0% cascarilla	20,74	0,01	16,05	0,09	1,06 ± 0,09	0,21 ± 0,01	6 536 ± 27

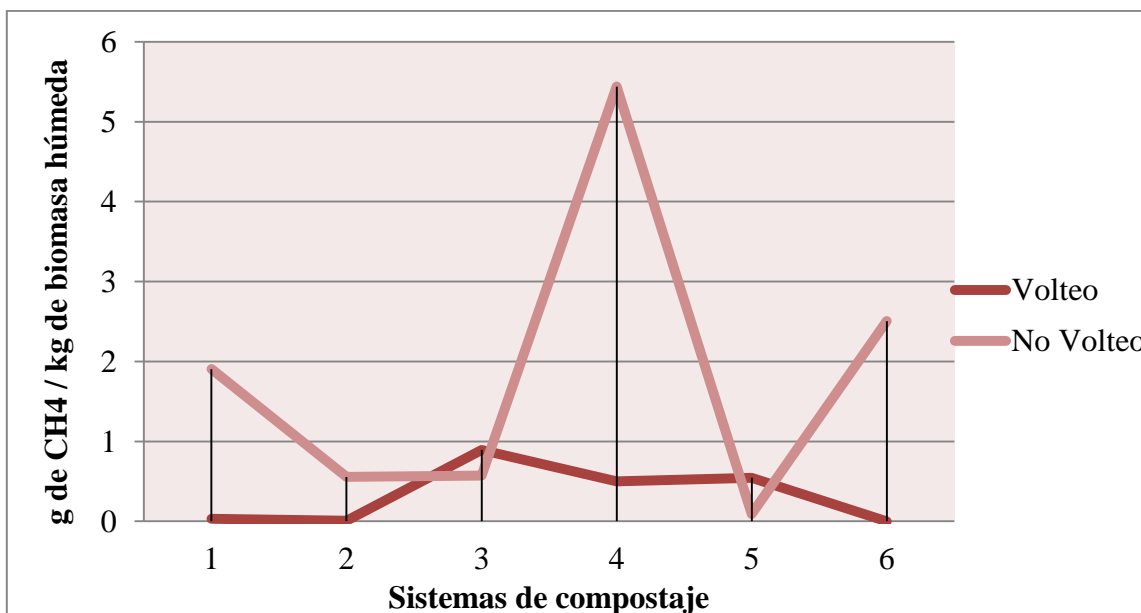
Notas: <sup>1</sup> Las pruebas se efectuaron en las siguientes fechas: 29/04/2016, 10/05/2016 y 17/05/2016. <sup>2</sup> Se recuerda que la prueba N°1 efectuada el 22/04/2016 fue descartada debido a una contaminación de la biomasa. <sup>3</sup> Datos suministrados por equipo de trabajo de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.

### **7.3.1. Comparación de las emisiones de GEI generadas a partir del tratamiento de la pulpa residual de café en un sistema de compostaje y por gasificación**

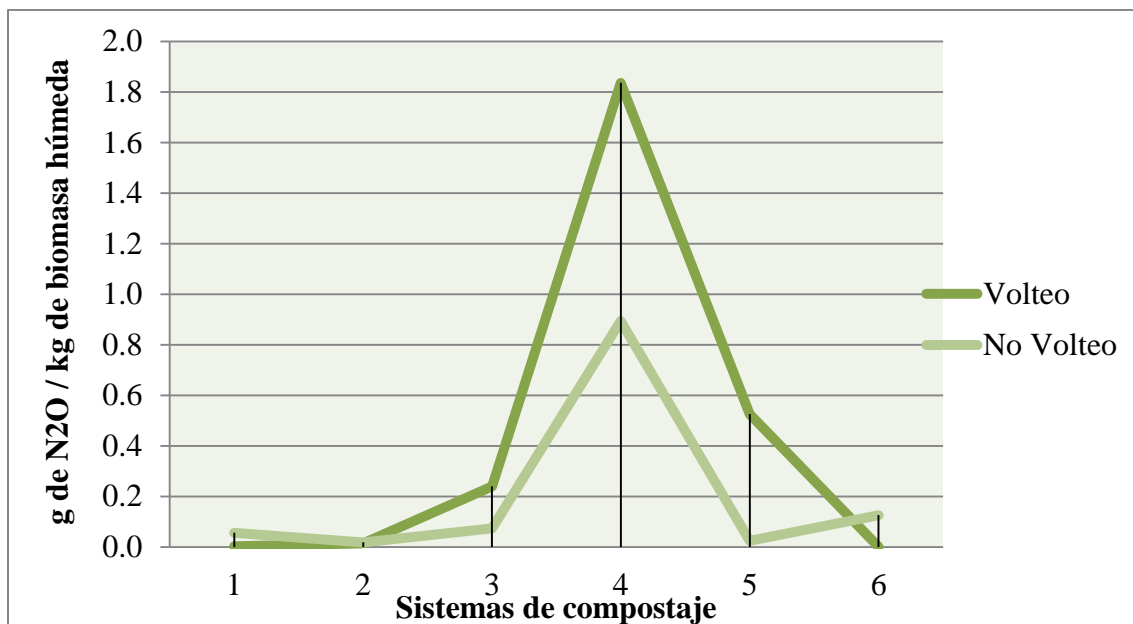
Como parte del tercer objetivo de la presente investigación se planteó realizar la comparación de los dos sistemas estudiados para el tratamiento de la pulpa residual de café. Para esto se llevó a cabo un estudio estadístico de los resultados, de tal manera que se pueda generar una comparación y que a su vez permita la toma de decisiones. Este permitió

determinar cuál tecnología presenta un menor impacto al ambiente en términos de las emisiones de GEI por cantidad de material tratado.

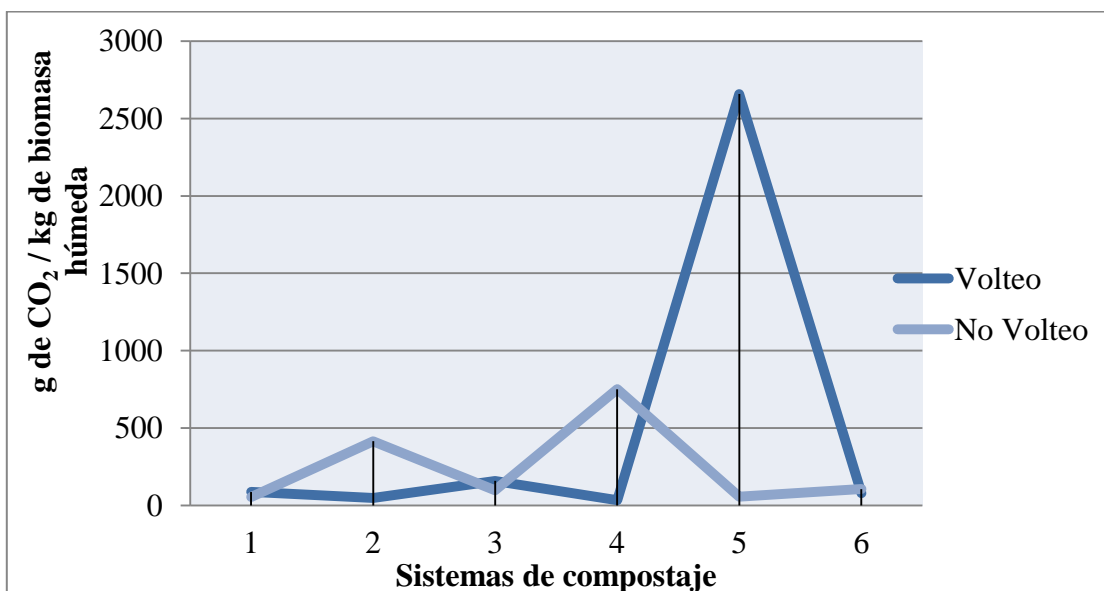
En el Gráfico 15 se refuerza lo mencionado en párrafos anteriores, donde se observa sobre el comportamiento de los flujos de emisión en sistemas en los que se aplicó volteo como una de las prácticas en el proceso de elaboración del compost, y en los que no se practica el mezclado. El comportamiento fue el mismo en términos de factores de emisión, observándose una mayor emisión de metano en los sistemas que no practican volteo, esto debido al favorecimiento de las condiciones anaerobias que propician una degradación metanogénica, provocando la reducción de la materia orgánica que da origen a la formación de  $\text{CH}_4$  (Ahn, 2011).



(a)



(b)



(c)

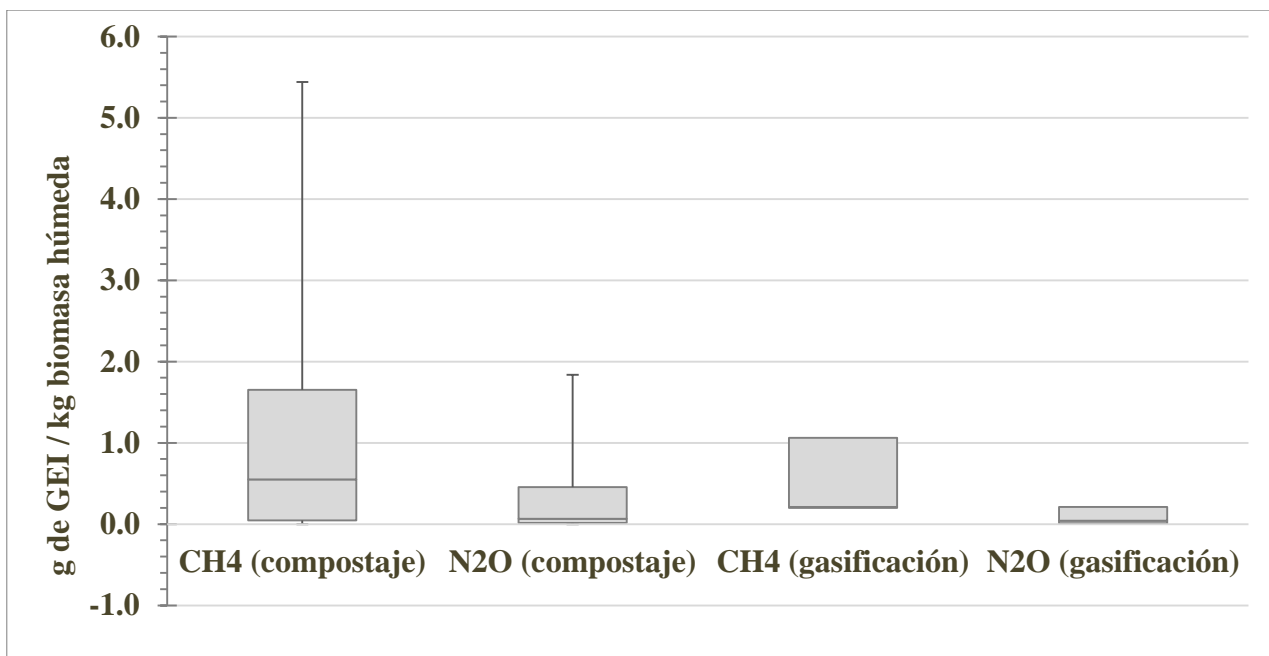
**Gráfico 15.** Comportamiento de los factores de emisión de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> en sistemas de compostaje, con volteo y sin volteo. En las figuras (a) y (b) se muestran los resultados obtenidos para CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, mientras que en la Figura (c) se muestran los resultados para las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El óxido nitroso, en términos generales, es el que presenta las menores tasas de emisión, con valores que oscilan entre 0,0 y 2,0 gramos por kilogramos de biomasa húmeda, en contraste con el metano, que presenta valores entre 0,0 y 6,0 gramos por kilogramo de biomasa húmeda. Se puede apreciar que la formación de  $N_2O$  se ve favorecida en condiciones aerobias (ver Gráfico 15.b.), esto debido a que el volteo en los montículos promueve el transporte de oxígeno hacia las cavidades anaeróbicas del compost, impidiendo la transformación de  $N_2O$  a  $N_2$ , y así aumentando la producción de  $N_2O$  por desnitrificación (Chen, 2015).

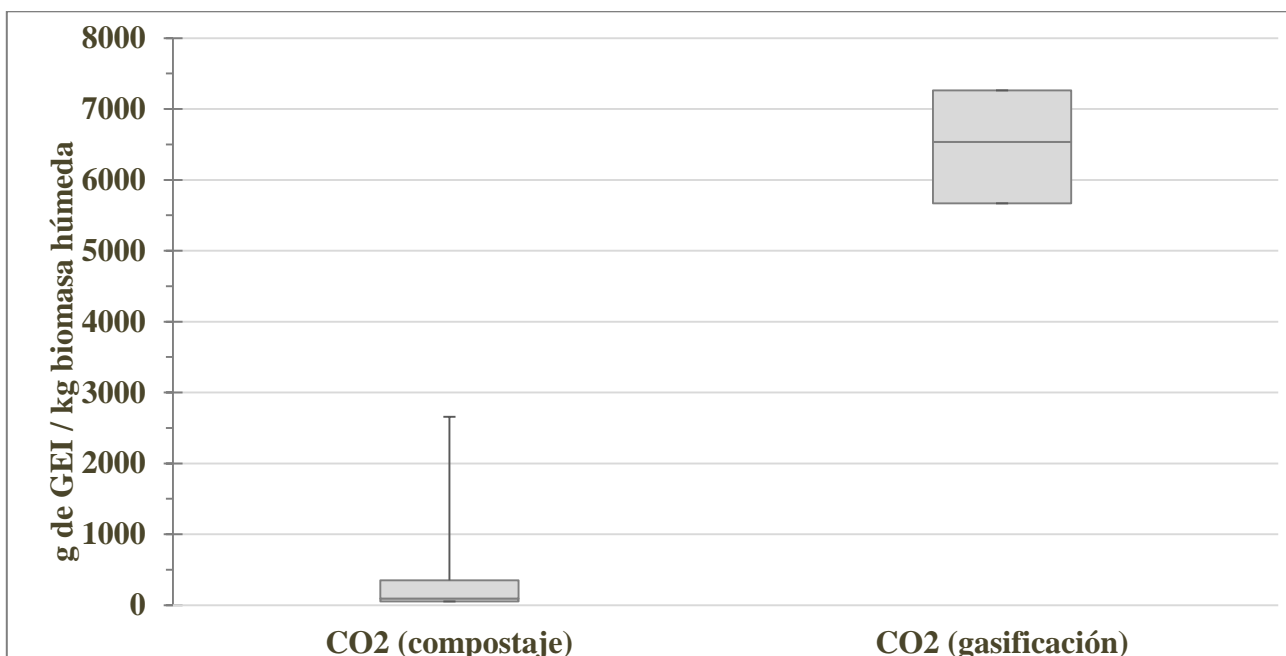
El dióxido de carbono presenta valores muy superiores, debido a que la oxidación del carbono presente en la materia orgánica se lleva a cabo con mayor facilidad en comparación con los procesos reductivos (Wade, 2004). Esto hace más difícil poder relacionar la emisión de  $CO_2$  con los procesos aerobios (volteo) o anaerobios (no volteo), ya que aún en los procesos anaerobios hay disponibilidad de oxígeno producto de la difusión del gas por el gradiente de concentración que se establece entre el montículo de compost y la atmósfera (Ermolaev, 2014), lo que quiere decir que aún en condiciones de no volteo, puede haber cantidades de oxígeno suficientes como para generar  $CO_2$ . Asimismo, es importante recalcar que los procesos degradativos en sí mismos, también dan paso a la formación de dióxido de carbono producto de la oxidación de la materia orgánica (Mathews, 2002). Así, los factores de emisión de dióxido de carbono presentaron valores en un ámbito de entre 0,0 y 3 000 gramos por kilogramo de biomasa húmeda; entre 500 y 1 500 veces superior a las de  $CO_2$  y  $N_2O$  respectivamente.

En el Gráfico 16 se puede apreciar mediante factores de emisión dado en unidades de gramos de GEI/biomasa húmeda, el comportamiento de los factores de emisión obtenidos

tanto para la técnica de composteo como para la técnica de gasificación. Esta permite evaluar, en términos de GEI, cuál de ellas genera menor impacto ambiental.



(a)



**Gráfico 16.** Comparación de los factores de emisión de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub> obtenidos para las técnicas de composteo y gasificación como método de tratamiento de los residuos sólidos

de broza de café. (a) Diagrama de bloques para los factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O. (b) Diagrama de bloques para los factores de emisión de CO<sub>2</sub>.

Así, se determinó que el 50% de los FE de metano en sistemas de compostaje se encuentran entre 0,04 y 1,7 gramos por kilogramo de biomasa húmeda, con un máximo de 5,5 g/kg de biomasa, mientras que la emisión de este mismo contaminante, pero en el sistema de gasificación, osciló entre 0,2 y 1,1 gramos por kilogramos de biomasa húmeda, evidenciando un margen de emisión más estrecho (menor dispersión) en el sistema de gasificación, alcanzando reducciones entre un 35% y un 80% respecto al percentil 75 y al valor máximo para ese contaminante, respectivamente.

El óxido nitroso presentó un comportamiento menos marcado debido a las bajas tasas de emisión, de modo que los factores de emisión para los sistemas de compostaje presentaron magnitudes entre 0,01 y 0,5 g/kg de biomasa, con máximos de hasta 1,9 g/kg. En contraste, los FE obtenidos para este contaminante con la técnica de gasificación, se encontraron entre 0,01 y 0,25 g/kg de biomasa húmeda, donde los máximos obtenidos fueron muy cercanos al percentil 75 de la muestra (0,25 g/kg). Esto significa que para el caso del N<sub>2</sub>O se alcanzaron reducciones entre un 50% y 87% respecto al percentil 75 y al valor máximo para ese contaminante, respectivamente.

El dióxido de carbono presenta un comportamiento muy diferente a los dos anteriores, esto debido a que el sistema de gasificación es mucho más eficiente en cuanto al proceso de transformación de carbono presente en la biomasa. De hecho, según datos del equipo de investigadores de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica (Torres *et al.*, 2016), tras el proceso de gasificación se obtuvieron concentraciones alrededor de un 15 %v/v de metano (valor promedio, 11,46 – 17,36 %v/v); y si se toma como base de

cálculo un contenido de carbono en la biomasa de alrededor de 35 %m/m, se obtendría una conversión cercana al 83% (esto sin cerrar el balance de cálculo asociado al contenido de carbono en la cenizas).

Lo anterior explica por qué se obtuvieron factores de emisión muchos más altos, específicamente en el ámbito de 5 600 y 7 300 g por kilogramo de biomasa húmeda, con valores muy estables, y donde los máximos y los mínimos coincidieron con los percentiles 25 y 75, respectivamente. Mientras tanto, en los sistemas de compostaje se obtuvieron valores en el ámbito de los 33 a los 350 gramos por kilogramo de biomasa húmeda, con un máximo de hasta 2 700 g/kg de biomasa. Esto significa que la técnica de gasificación presenta factores de emisión entre 16 y 21 superiores en relación con el percentil 75 obtenido para los sistemas de compostaje.

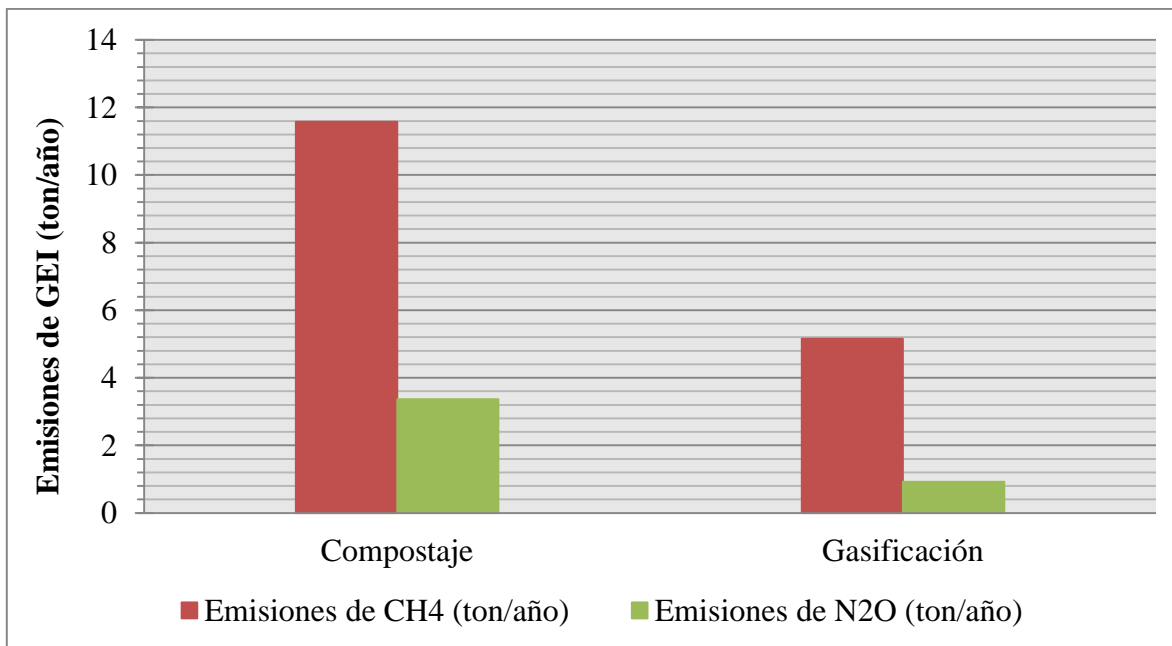
Por consiguiente, las emisiones provenientes del sistema de gasificación presentan reducciones bastante significativas en cuanto a metano y óxido nitroso se refiere. A modo comparativo, considérese un Beneficio hipotético que procese alrededor de 100 000 fanegas en una temporada de beneficiado, esto significaría que este estaría generando alrededor de 10 520 toneladas de broza de café residual. Si se considera que el 100% de este material se procesará por medio de algunas de las técnicas estudiadas en este proyecto, se obtendrían los siguientes escenarios (ver Cuadro 14 y Gráfico 17).

**Cuadro 14.** Tabla comparativa de las emisiones de GEI individuales y en términos de CO<sub>2</sub> eq para un caso hipotético de un proceso de beneficiado de café.

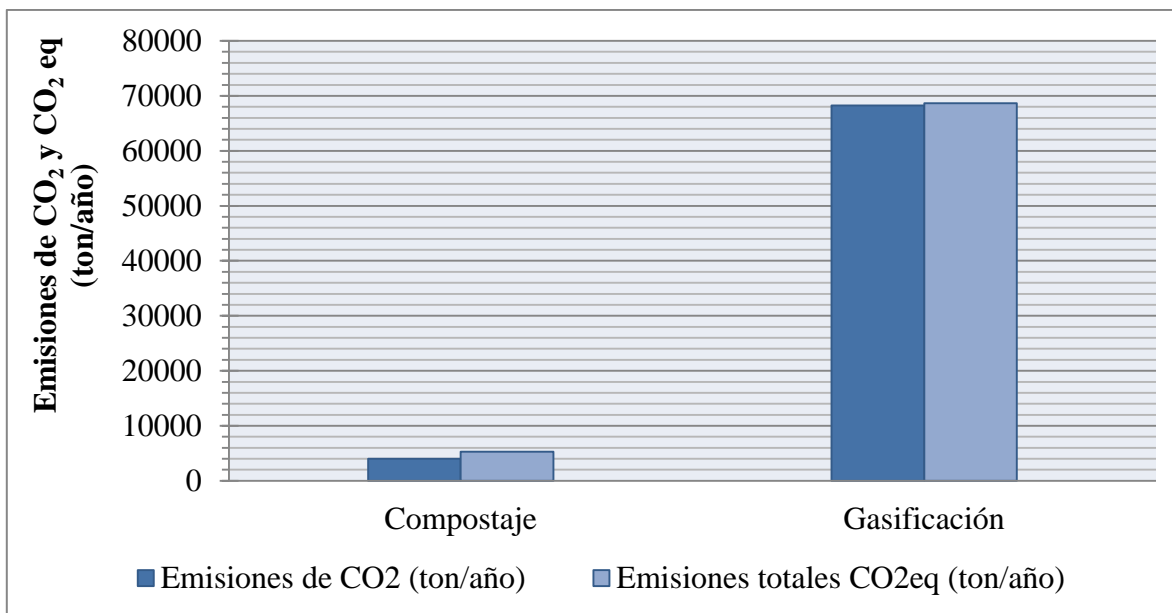
Descripción	Compostaje	Gasificación
Café procesado (fc <sup>1</sup> )	100 000	100 000
Residuos de broza por	10 520	10 520

Descripción	Compostaje	Gasificación
<b>Residuos de broza por temporada (ton)</b>	10 520 000	10 520 000
<b>Residuos de broza por temporada (kg)</b>		
<b>FE de CH<sub>4</sub> (g/kg de pulpa)<sup>2</sup></b>	1,1	0,49
<b>FE de N<sub>2</sub>O (g/kg de pulpa)<sup>2</sup></b>	0,32	0,088
<b>FE de CO<sub>2</sub> (g/kg de pulpa)<sup>2</sup></b>	379	6489
<b>Emisiones de CH<sub>4</sub> (ton/año)</b>	11,57	5,15
<b>Emisiones de N<sub>2</sub>O (ton/año)</b>	3,37	0,93
<b>Emisiones de CO<sub>2</sub> (ton/año)</b>	3 987	68 264
<b>Emisiones totales CO<sub>2</sub>eq (ton/año)</b>	<b><u>5 274</u></b>	<b><u>68 660</u></b>

<sup>1</sup> Fanega de café, <sup>2</sup> Factores de emisión promedio



(a)



(b)

**Gráfico 17.** Comparación entre las emisiones de GEI para un caso donde un Beneficio hipotético produce alrededor de 10 500 toneladas de pulpa de café residual al año. (a) Comparación de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O para las técnicas de compostaje y gasificación. (b) Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> y las emisiones totales para el Beneficio en términos de CO<sub>2</sub> eq.

#### **7.4. Análisis de viabilidad de la conversión a la tecnología de gasificación de la pulpa de café en Costa Rica**

Como anteriormente se ha señalado, una de las alternativas para el tratamiento y disposición final de la pulpa residual de café es por medio de la gasificación. Este se presenta como un mecanismo de mitigación del efecto de su descomposición inadecuada en patios de compostaje, y a su vez, generar beneficios energéticos de su combustión. Sin embargo, es importante considerar como parte de la decisión para cada uno de los Beneficios, una serie de variables técnicas, ambientales y económicas que le permitan establecer al sector una visión más amplia de las implicaciones que conlleva la adquisición

de la tecnología. Es por esa razón que en el último apartado de la presente investigación se realiza un análisis de dichas variables.

Es importante recordar que para el abordaje de este objetivo se toma como base el gasificador All Power Lab ® que se encuentra en las instalaciones del Instituto del Café en Barva de Heredia y el compostaje ahí realizado.

En el Apéndice 7 se encuentra el análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión del sistema de compostaje (alternativa A) a la tecnología de gasificación (alternativa B). En el Cuadro 15 se presentan las ventajas y desventajas para ambos sistemas. En este se incluyó las variables cualitativas que no pudieron ser valoradas en la matriz de viabilidad. En el Cuadro 15 se puede observar un las ventajas y desventajas presentadas para ambos sistemas.

En cuanto a la variable técnica, 71,43% de los criterios de evaluación obtuvieron un puntaje de viabilidad a favor de la tecnología gasificación. En este, se puede observar aspectos como un área menor requerida, un menor número de días de capacitación y en cuanto a operación, el gasificador como tal requiere un menor control de las características externas e internas del equipo.

Respecto a la variable ambiental, el compostaje presenta una diferencia en generación de GEI entre los 98,59-99,99% respecto al gasificador, siendo así ese último el mayor generados en los tres contaminantes evaluados. Además, en comparación con el compostaje, el gasificador genera residuos en el sistema que implica la gestión de estos. Por lo tanto, el compostaje presenta un puntaje de viabilidad del 85, 71% a favor respecto de un 14,29% obtenido para la gasificación.

En el aspecto económico, es importante mencionar que la instalación del gasificador con su respectivo generador se plantea dentro del régimen de autoconsumo y no para la venta de energía eléctrica, esto por dos razones; la primera es que la venta de energía eléctrica se considera un servicio público y por lo tanto se debe participar en un proceso sumamente engorroso para poder optar a esta opción, y la segunda razón es que la cantidad de energía producida no siempre llega a dejar excedentes, de hecho, si llega a haber o no un exceso de energía eléctrica, tiene que ver con la vida útil de la biomasa para su uso en los meses fuera de la cosecha. En general se esperaría que la mayoría de la energía se use para autoconsumo dejando solo pequeños excedentes en algunos meses (Torres *et al.*, 2016).

Respecto a la variable económica (ver Apéndice 7), la valoración en la matriz arrojó un 49,98% de puntaje de viabilidad a favor del compostaje, pues el gasificador implica una inversión inicial de 86 229 806,7 (CRC) y modificaciones internas al equipo que conllevan gastos alrededor de 1 171 607,52 (CRC). Sin embargo, este también está asociado a la generación de ingresos con la generación de electricidad para el secado de café (generación alrededor de 580 kWh a una potencia de 11 kW), venta de pellets y residuos de proceso ricos en nutrientes.

En términos de porcentaje, para esta sección el compost resulta con un 58,31%, pues la única inversión sería el acondicionamiento del sitio para la realización del tratamiento, con una inversión aproximada 80 749 200 CRC para poder tratar las 1000 fanegas de café producidas en el Icafé. Según datos proporcionados por Chacón (2017), la tasa de retorno del gasificador dependerá del uso que se le dé al equipo, si solo se utiliza 72 horas al mes todo el año, sería rentable para empresas que procesen al menos 100 000 fanegas por cosecha, la tasa interna de retorno es de 14%, y se recupera la inversión la inversión en 5,1

años. Además, es importante destacar que según el estudio financiero realizado por la escuela de Ingeniería química de la Universidad de Costa Rica (Torres y Urvina 2017) el equipo de gasificación posee una vida útil de operación de 10 años.

**Cuadro 15.** Ventajas y desventajas encontradas en el análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión del sistema de gasificación respecto a las condiciones encontradas en el Beneficio Icafé

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<b>Técnicas</b>	<p>✓ No es necesaria un área de almacenamiento, el producto es regalado inmediatamente cuando es producido.</p> <p>✓ No es necesario repuestos ni soporte técnico.</p> <p>✓ No se identificaron modificaciones técnicas en el</p>	<p>✗ El Icafé considera que para que el proceso sea eficiente y óptimo deben contar con equipo de maquinaria industrial que les facilite en un tiempo determinado tratar la pulpa generada. Además, de instrumentos para medir la temperatura interna del montículo. Además, de un sitio bajo techo que no altere la humedad de la pulpa.</p>	<p>✓ Generación de electricidad: Durante la operación del sistema se obtuvo un rendimiento de 1,5 kg de syngas/kg de pellet (prensada al 16% de humedad) y una energía interna del syngas cercana a los 9MJ/Nm<sup>3</sup> (Icafé, 2016).</p>	<p>✗ Para el almacenamiento de los pellets de broza de café se necesita un sitio de un área aproximada de: 4 m<sup>3</sup>. Además el pellet debe ser almacenado en bolsas tipo grainpro.</p> <p>✗ En una investigación realizada por el Instituto del Café (Chacón, 2017) respecto a la disponibilidad de repuestos, no fue posible ubicar dos repuestos específicos en el país: pasta de grafito para sellar fugas en el equipo y ventiladores centrífugos.</p>

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
	<p>proceso de compostaje realizado en el Icafé.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Requiere transporte de la pulpa del sitio de generación al sitio de tratamiento.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Se deben realizar cambios en el sistema del gasificador All Power Lab ®, pues al estar diseñado para operar con pellets de madera, presenta problemas de caída de presión, acumulación de alquitranes y cenizas en la tubería, filtros y otros componentes del sistema. Además, se debe realizar el cambio del relleno del filtro, pues es poco eficiente en términos de adsorción (Torres et al., 2016).</li> <li>✗ El proceso de gasificación no constituye un proceso continuo en su funcionamiento durante una jornada, ya que al ser un equipo alimentado manualmente, este debe ser apagado constantemente</li> </ul>

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
				<p>para su alimentación (Chacón, 2017).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Los pellets se deben tamizar, ya que el tamaño debe ser mayor a dos pulgadas, pues los residuos en polvo colapsan el gasificador.</li> <li>✗ En cuanto a requerimientos específicos, se considera necesario una prensa y una peletizadora (Urvina y Torres, 2017).</li> </ul>
<b>Ambientales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No requiere un gasto energético.</li> <li>✓ No requiere consumo de agua.</li> <li>✓ No se genera ningún residuo,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Generación de lixiviados implica la necesidad de un tratamiento o disposición. En el caso del Icafé, esta es tratada vía aspersión a pasto estrella.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El equipo no requiere de energía extra para su funcionamiento (Chacón, 2017).</li> <li>✓ No requiere consumo de agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✗ Al requerir una peletizadora, esta tiene un gasto energético asociado. Para una taza de pelletizado cercana a los 300 kg/h de broza prensada, se consume 66,7 kWh/t de electricidad (Icafé,</li> </ul>

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
	<p>todo el material es aprovechado para el tratamiento.</p> <p>✓ En comparación con los valores obtenidos en la tecnología de gasificación, las concentraciones de GEI son menores en el sistema de compostaje, presentando una diferencia de generación de un 99,95-99,99%, 99,20-99,5% y 98,59-98,90% en</p>	<p>* La presencia de lluvias puede ocasionar un aumento de la humedad y generar a su vez malos olores.</p> <p>* Un volteo inadecuado puede generar ambientes anaerobios en la estructura interna del montículo, lo que puede incrementar la producción de metano.</p>		<p>2016).</p> <p>* Se generan cuatro tipos de residuos en el proceso de tratamiento: cenizas, carbón, ceniza bituminosa y alquitrán.</p> <p>* En cuanto a la producción de GEI, en comparación con el compostaje, la tecnología de gasificación genera, respecto a las tres mediciones efectuadas, una mayor emisión.</p> <p>* En el caso del Icafé, la pulpa se prensa antes de convertirla en pellets, lo cual genera 0,02 m<sup>3</sup>/fanega de lixiviado (Icafé, 2017).</p>

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
	cuanto a la producción de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono, respectivamente, siendo el gasificador el mayor emisor entre ambas tecnologías.			
<b>Económicas</b>	✓ No presenta ventajas económicas.	✗ El abono no es aprovechado dentro del Icafé sino que es regalado, por lo que no perciben ganancias del tratamiento.	✓ Ingresos por certificados de carbono. ✓ Venta de cenizas y biochar como abono. ✓ Ahorro en el reemplazo de la sustitución de los pellets de madera, los cuales deben ser	✗ La inversión del equipo supera los 86 229 806,7 (CRC). ✗ Las modificaciones internas que deben ser realizadas al equipo significan un monto de 1 171 607, 52 (CRC). ✗ El funcionamiento continuo genera gastos en limpieza y

Factor	Alternativa A		Alternativa B	
	Compostaje		Gasificación	
	Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
			<p>comprados, por la elaboración de los pellets de broza de café.</p> <p>✓ Ingresos por venta de pellets.</p> <p>✓ Al ser utilizada la energía producida en el secado de café, significa ahorros en la factura de electricidad.</p>	<p>mantenimiento.</p> <p>✗ Compra de maquinaria para secado y pelletizado.</p>

## 8. Conclusiones

- El volteo constituye una práctica con un efecto positivo en la generación de GEI, pues la aireación del sistema favorece una descomposición de tipo anaerobio, lo que incentiva la generación de dióxido de carbono, no siendo así en sistemas en los cuales no se aplica volteo, donde un ambiente anaerobio genera la producción de metano.
- Con la aplicación del método de sonda se pudo determinar que dentro de los montículos a los cuales no se les aplica volteo se concentra gran cantidad de metano, que al ser volteado se libera en grandes cantidades a la atmósfera.
- La comparación en términos de GEI generados por ambas tecnologías arrojó disminuciones en generación para el sistema de gasificación, en los contaminantes metano y óxido nitroso, no siendo así en el caso del dióxido de carbono. Sin embargo, como indica la Norma ISO 14064-1:2006 este debe ser cuantificado por separado, por lo que no se incluirían dentro de las emisiones totales de los Beneficios, siendo así el sistema de gasificación la técnica que representa menor contaminación en términos de gases efecto invernadero.
- Respecto a los factores de emisión obtenidos, se presenta una diferencia significativa en comparación con el factor de emisión nacional, pues este último es un valor general para compostaje de residuos. Esto implica diferencias en el reporte de las emisiones GEI para los Beneficios seleccionados.
- El poder calorífico de la pulpa residual se encuentra dentro de los valores de los materiales comúnmente utilizados en los hornos del beneficiado, por lo que representa un material con potencial energético.

- La pulpa residual de café constituye un material que puede ser utilizado en un proceso de combustión, generando así electricidad óptima para el secado de café. Sin embargo, para su utilización en un gasificador Power Lab ® se debe realizar un control estricto de la humedad de la broza y la generación de cenizas dentro del reactor.
- En cuanto a la viabilidad de la conversión de la técnica de compostaje a gasificación en el Instituto del Café, la variable técnica presenta condiciones favorables para el gasificador, mientras que en cuanto a las emisiones, se generaron en el compostaje valores muy por debajo del gasificador. Por último, en la variable económica, el gasificador genera una inversión inicial de hasta 86 229 806,7 (CRC); sin embargo, este puede significar un ahorro en el secado de café al generar aproximadamente 580 kWh a una potencia de 11 kW con un consumo de pellets de 19 kg/h.
- La rentabilidad del equipo de gasificación va a estar en función de las fanegas procesadas en cada Beneficio, pues sería solo rentable en el caso de procesar al menos 100 000 fanegas por cosecha y con un funcionamiento mensual de 72 horas.

## **9. Recomendaciones**

- En cuanto a los dos sistemas observados, volteo y no volteo, se considera de suma importancia el establecimiento de pautas de manejo comunes que guíe a los Beneficios en la aplicación de buenas prácticas ambientales y así mismo contribuya a la reducción de gases efecto invernadero.
- Respecto a la disminución de gases efecto invernadero en el proceso de compostaje es recomendable incentivar al sector a utilizar la técnica de volteo, pues con esta se

genera un ambiente aerobio dentro del material que disminuye la cantidad del contaminante metano emitido a la atmósfera.

- Se recomienda a cada Beneficio realizar una valoración de las posibilidades de infraestructura y espacio para darle un tratamiento óptimo a la pulpa recién generada, que evite la mala disposición de lixiviados, el aumento de plagas y la disminución de las propiedades químicas dentro del material. Esto con el fin de generar un producto rico en nutrientes.
- Se debe realizar control de variables dentro del material, como lo es la temperatura, humedad y relación carbono/nitrógeno, que permitan generar un real proceso de compostaje y obtener un producto rico en nutrientes.
- Se sugiere ampliar el número de mezclas utilizadas como materia prima para el proceso de gasificación, y aumentar el número de réplicas para cada una de ellas, de tal modo que se pueda obtener mejores resultados en cuanto a la valoración de la mejor opción en términos de eficiencia y de generación de GEI.
- Establecer una mayor coordinación y difusión de la información en el sector, de la elaboración de dichos proyectos, para así poder lograr un mayor involucramiento.

## **10. Literatura citada**

Agrowaste. (2013). Compostaje (en línea). Consultado el 13 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/COMPOSTAJE.pdf>

Ahn, H.; Mulbry, J.; White, S. y Kondrad, S. (2011). Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting dairy manure. *Bioresource Technology*. Vol (102):2904-2909.

Ávila, H. (2006). Introducción a la metodología de la investigación (en línea). Consultado el 7 de mayo del 2015. Universidad de Guadalajara, México. Disponible en <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/eureka/pudgvirtual/introduccion%20a%20la%20metodologia%20de%20la%20investigacion.pdf>

All Power Lab. (2009). Manual de funcionamiento del gasificador All power Lab.

Balseca, D.A.; Cabrera, J.C. (2011). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café (en línea). Consultado el 24 de noviembre del 2014. Disponible en <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/454/1/T3217.pdf>

Barquero, D.; Cortés, M. J. (2011). Análisis del rendimiento energético obtenido aplicando la técnica de gasificación con residuos de astillas de madera y broza de café. Tesis de Licenciatura.

Castells, X. (2012). Tratamiento y valoración energética de los residuos. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A.

CEGESTI (Centro de Gestión Tecnología Industrial). (2005). El manual de transferencia y adquisición de tecnologías sostenibles. Consultado el 14 de mayo del 2015. Disponible en <http://www.cnpml.org.pa/images/nosotros/centro-de-informacion/manualtt.pdf>

Cenicafé (Centro Nacional de Investigación). 2016. Beneficio de café. Consultado el 15 de abr. 2017. Colombia. Disponible (en línea): [http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/beneficio](http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio)

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2013). Informe de la reunión de expertos sobre la integración de medidas de adaptación en planes nacionales de

mitigación: una exploración técnica del NAMA café de Costa Rica. Consultado el 17 de abril del 2014. Disponible en

<http://www.cepal.org/mexico/noticias/documentosdetrabajo/0/51690/2013-046->

[Inf.Reu.Exp. NAMA Cafe CR-L.1129.pdf](#)

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. 211p. Disponible (en línea):

<http://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>

Chacón, R. 2003. Aplicación de la tecnología de gasificación utilizando pulpa de café. Proyecto de graduación MSc. Instituto tecnológico de Costa Rica.

Chacón, R. (2017). Viabilidad de la conversión del sistema de compostaje a la gasificación (entrevista). Heredia, Costa Rica.

Chen, R.; Wang, Y.; Wang, W.; Shiping, W.; Zhongwang, J.; Xiangui, L. (2015). N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen transformation during windrow composting of dairy manure. Journal of Environmental Management.

CICA (Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental). (2016). Medición de emisiones producto de gasificación y producción de energía a base de broza de café. Universidad de Costa Rica, San José.

Contreras, S.; Rivas, J. (2014). Efectos de la Frecuencia de Volteo sobre las Propiedades Físico Químicas de Compost a Base de Eichhornia Crassipes L. (en línea). Consultado el 12 de setiembre del 2016. Disponible en

<http://www2.unesur.edu.ve/serbiunesur/images/tesis/ingenieria/frecuencia.pdf>

Colomer Mendoza, F.J.; Gallardo Izquierdo, A. (2007). Tratamiento y gestión de los residuos sólidos. D.F., MX: Editorial Limusa. Universidad Politécnica de Valencia. 328 p.

Cortés, M.J. (2009). Generación de energía a partir de residuos biomásicos mediante la técnica de gasificación: alternativa para la reducción de la contaminación por residuos sólidos y la emisión de gases efecto invernadero Costa Rica (en línea). Tesis, Ms. San José, Costa Rica. Universidad para la Cooperación Internacional. Consultado el 22 de febrero del. 2015. Disponible en <http://www.uci.ac.cr/Biblioteca/Tesis/PFGMLGA6.pdf>

Coto, O. (2013). Prácticas Actuales de Tratamiento y Disposición de los Residuos Agrícolas Orgánicos en Costa Rica (en línea). Consultado el 23 de febrero del. 2015. Disponible en <http://www.mag.go.cr/proyectos/proy-residuos-agricolas-org/productos/Informe%20RAO%20CR%20Producto%201.pdf>

Del Rosario, M. Rodríguez, J. 1994. Impacto ambiental del procesamiento del café en Costa Rica. Consultado el 15 de abr. 2017. Disponible (en línea): [http://www.mag.go.cr/rev\\_agr/v18n02\\_217.pdf](http://www.mag.go.cr/rev_agr/v18n02_217.pdf)

Ermolaev *et al.* (2014). Greenhouse gas emissions from home composting in practice. Bioresource Technology, Vol. 151 (174-182).

FIAGRO (Fundación para la Innovación Tecnológica Agropecuaria). (s.f.), Estudio Sobre La Reconversión Energética Para Beneficiadores de Café en El Salvador. [http://www.cnpm.org.sv/UCATEE/ee/docs/Estudio\\_sobre\\_la\\_Reconversion\\_Energetica\\_p ara\\_Beneficiadores\\_de\\_Cafe\\_en\\_El\\_Salvador.pdf](http://www.cnpm.org.sv/UCATEE/ee/docs/Estudio_sobre_la_Reconversion_Energetica_para_Beneficiadores_de_Cafe_en_El_Salvador.pdf)

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2010). Los subproductos del café: fuentes de energía renovable. Consultados el 15 de abril del 2017. Disponible (en línea): <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/351/1/avt0393.pdf>

Food & Agriculture. (1993). Prevención de la contaminación del agua por la agricultura y actividades afines. Pág. 118

Francescato, V.; Zuccoli, L.; Antonini, E. Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa (AVEBIOM). (2008). Manual de combustibles de madera: producción, requisitos, calidad y comercialización. Consultado el 7 de mayo de. 2017. Disponible (en línea): [www.biomassradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf\\_vsebine/...pdf](http://www.biomassradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf_vsebine/...pdf)

Fundecooperación. Fondo Multilateral de Inversiones Miembro del Grupo BID. Icafé (Instituto del Café de Costa Rica). Hacia un sector de Café de Bajo Carbono en Costa Rica: Experiencias Nacionales e Internacionales. (2015) Holiday Inn. San José, Costa Rica.

Giráldez, A. (2010). Música: Investigación, innovación y buenas prácticas. Barcelona, España. 137 p.

García, L. E. (2011). Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo (en línea). Tesis, Mag. Bogotá, Colombia. Universidad de Colombia. Consultado el 18 de marzo del 2015. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/4133/1/291461.2011.pdf>

GIZ (Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear). (2015). NAMA Café de Costa Rica – Una herramienta para el

desarrollo bajo en emisiones (en línea). Consultado el 23 de octubre del 2015. Disponible en [http://www.nama-facility.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/NAMA\\_Facility\\_factsheet\\_Costa\\_Rica\\_version\\_larga.pdf](http://www.nama-facility.org/fileadmin/user_upload/pdf/NAMA_Facility_factsheet_Costa_Rica_version_larga.pdf)

Harris, D. (2007). Análisis químico cuantitativo. Barcelona, España: Editorial Reverté, S.A. Pág. 52

Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, P. Metodología de la investigación (en línea). McGraw Hill. 4 ed. Consultado el 23 de octubre del 2015. Disponible en [https://competenciashg.files.wordpress.com/2012/10/sampieri-et-al-metodologia-de-la-investigacion-4ta-edicion-sampieri-2006\\_ocr.pdf](https://competenciashg.files.wordpress.com/2012/10/sampieri-et-al-metodologia-de-la-investigacion-4ta-edicion-sampieri-2006_ocr.pdf)

Icafé (Instituto del Café de Costa Rica). (2012). NAMA Café: Una herramienta para el desarrollo bajo en emisiones (en línea). Consultado el 22 de febrero del 2015. Disponible en <http://fundecooperacion.org/wp-content/uploads/2012/11/Caso-NAMA-Caf%C3%A9.pdf>

Icafé (Instituto del Café de Costa Rica). (2013). Plan Estratégico 2014-2023. Consultado el 15 de abril del 2015. Disponible en [http://www.icafe.go.cr/icafe/plan\\_estrategico/Plan%20Estrategico%20ICAFE-2014-2023.pdf](http://www.icafe.go.cr/icafe/plan_estrategico/Plan%20Estrategico%20ICAFE-2014-2023.pdf)

Icafé. (2015). Regiones cafetaleras de Costa Rica. Consultado el 14 de octubre del 2015. Disponible en <http://www.icafe.go.cr/>

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2012). La agricultura tropical frente al cambio climático: El caso Costa Rica NAMA Café: una herramienta para

el desarrollo bajo en emisiones (en línea). Consultado el 22 de febrero del 2015.

Disponible en [http://www.iica.int/Esp/prensa/Documents/NAMA\\_cafe.pdf](http://www.iica.int/Esp/prensa/Documents/NAMA_cafe.pdf)

IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2012. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono. Disponible (en línea):

<http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventariogei-2012.pdf>

INTECO (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica). 2011. Sistema de gestión para demostrar la C-neutralidad (en línea). Consultado el 26 de noviembre del 2014. Disponible

en <http://www.inteco.or.cr/doc/Normalizaci%C3%B3n/2011/PN%20INTE%2012-01->

[06%20MAYO%202011%20CP.pdf](http://www.inteco.or.cr/doc/Normalizaci%C3%B3n/2011/PN%20INTE%2012-01-06%20MAYO%202011%20CP.pdf)

IPCC (Panel Gubernamental de cambio climático). 2008. Cambio climático 2007: Informe de síntesis (en línea). Consultado el 2 de abril del 2015. Disponible en

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)

IPCC (Panel Gubernamental de cambio climático). 2015. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Resumen para responsables políticos. Disponible (en línea):

[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5\\_SPM\\_brochure\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/WG3AR5_SPM_brochure_es.pdf)

López, R.; Mendoza, N. (2012). Aspectos biológicos de la estabilización aeróbica. Tomo II Capítulo 1. Mundi-Prensa Libros. Pág. 34

Jiang, T.; Guoxue, L.; Qiong, T.; Xuguang, M.; Wang, G.; Schuchardt, F. (2015). Effect of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces on pilot scale. Journal of environmental sciences Vol. 31:124-132

Martínez, S. (2009). Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña (en línea). Tesis. Doc. Universidad de Gorina, España. Consultado el 7 de mayo Del 2015. Disponible en <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7920/tsm11de1.pdf?sequence=1>

Mathews, C. V. (2002). Bioquímica. Madrid, España: Pearson Education.

MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2010). Manual de buenas prácticas de manufactura en Beneficio asociación de productores de café sostenible de Tarrazú. Consultado el 24 de setiembre del 2017. Disponible en [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual/bibliotecavirtual/a00203.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00203.pdf)

MIDEPLAN (Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica). 2010. Plan Nacional de Desarrollo: 2011-2014 (en línea). Consultado el 10 de junio del 2015. Disponible en <http://documentos.mideplan.go.cr/alfresco/d/d/workspace/SpacesStore/122fed1c-53a7-47a7-a0ad-84cac6f1d7b9/PND-2011-2014-Maria-Teresa-Obregon-Zamora.pdf>

Meléndez, J. B.; Rodríguez, A. E.; Urrutia, M. A. (2006). Implementación de la Tecnología de la gasificación para operar en los Beneficios de café (en línea). Tesis, Bach. San Salvador, El Salvador. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas. Consultado el 18 de marzo del 2015. Disponible en [http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis\\_descargables/gasificacion\\_Beneficios\\_cafe.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/gasificacion_Beneficios_cafe.pdf)

Meléndez, G.; Molina, E. (2001). Fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica. Consultado el 23 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilidad%20de%20Suelo>

[s.pdf](#)

Monge, L. F. (1999). Manejo de la nutrición y fertilización del cultivo de café orgánico en Costa Rica. Consultado el 23 de octubre del 2015. Disponible en [http://www.mag.go.cr/congreso\\_agronomico\\_XI/a50-6907-III\\_175.pdf](http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_XI/a50-6907-III_175.pdf)

Moreno, J. (2008). Compostaje. Mundi-Prensa Libros. Pág. 96.

Mulbry, W. A. (2014). Greenhouse gas emissions during composting of dairy manure: Influence of the timing of pile mixing on total emissions. *Biosystems Engineering*, Vol. 126, 117-122.

Plaza, M. G.; González, A. S.; Pevida, C.; Pis, J.J.; Rubiera, F. (2012). Valorización de los cultivos de café como adsorbentes de CO<sub>2</sub> para aplicaciones de captura de postcombustión. Base de datos Science Direct (en línea). Consultado el 17 de mayo del 2015. Disponible en <http://www.sciencedirect.com.una.idm.oclc.org/science/article/pii/S0306261912004011#>

Ramírez, F.; Carazo, E.; Roldán, C.; Villegas, G. (2007). Ministerio de Ambiente y Energía. Encuesta de oferta y consumo energético\_Nacional a partir de la biomasa en Costa Rica: Año 2006 (en línea). Consultado el 22 de febrero del 2015. Disponible en <http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/02Estadisticas/encuestaBiomasa2008.pdf>

Rincón, S.; Gómez, A.; Klose, W. (2011). Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial (en línea). Bogotá, Colombia. Universidad de Colombia. Consultado el 18 de marzo del 2015. Disponible en <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-950-4.volltext.frei.pdf>

Reto, S. (2006). Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera,

cafetalera y azucarera de Costa Rica: considerando el mecanismo de desarrollo limpio. Consultado el 19 de marzo del 2015. Disponible en <http://ley8839.go.cr/blog/wp-content/uploads/2006/04/UTILIZACION-ENERGETICA-RESIDUOS-ORGANICOS-EN-COSTA-RICA-VERSION-FINAL-Junio-2006-Anhang.pdf>

Robles, M. (2015). Evaluación de parámetros de temperatura, pH y humedad para el proceso de compostaje en la planta de tratamiento de residuos sólidos orgánicos de la municipalidad provincial de Leoncio Prado (en línea). Disponible en [http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades\\_academicas/EVALUACION%20DE%20PARAMETROS%20DE%20TEMPERATURA,%20PH%20Y%20HUMEDAD%20PARA%20EL%20PROCESO%20DE%20COMPOSTAJE%20EN%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS%20ORGANICOS%20DE%20LA%20MUNICIPALIDAD%20PROVINCIAL%20DE%20LEONCIO%20PRADO.pdf](http://www.unas.edu.pe/web/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/EVALUACION%20DE%20PARAMETROS%20DE%20TEMPERATURA,%20PH%20Y%20HUMEDAD%20PARA%20EL%20PROCESO%20DE%20COMPOSTAJE%20EN%20LA%20PLANTA%20DE%20TRATAMIENTO%20DE%20RESIDUOS%20SOLIDOS%20ORGANICOS%20DE%20LA%20MUNICIPALIDAD%20PROVINCIAL%20DE%20LEONCIO%20PRADO.pdf)

Rodríguez, N.; Zambrano, D. A. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable (en línea). Consultado el 14 de abril del 2015. Disponible en <http://www.cenicafe.org/es/publications/avt0393.pdf>

Rojas, GE. 2000. Café, ambiente y sociedad en la cuenca del río Virilla, Costa Rica (1840-1955). Editorial Universidad de Costa Rica. Pág.: 61

Rojas, J. CEGESTI. (2014). Residuos sólidos y calentamiento global (en línea). Consultado el 2 de abril del 2015. Disponible en [http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion\\_254\\_310314\\_es.pdf](http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_254_310314_es.pdf)

Román, P.; Martínez, M.; Pantoja, A. Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura. (2013). Manual de compostaje del agricultor: experiencias en América Latina. Consultado el 18 de octubre del 2015. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/019/i3388s/i3388s.pdf>

Rosique, M.G. (2016). Gestión de los residuos y suelos contaminados provenientes de la minería metálica: aspectos técnicos, problemas ambientales y marco normativo. Consultado el 24 de setiembre del 2017. Disponible en <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5397/mgrl.pdf?sequence=1>

Salazar, T. (2014). Actividad microbiana en el proceso de compostaje aerobio de residuos sólidos orgánicos (en línea). Consultado el 12 de setiembre del 2016. Revista de Investigación Universitaria. Vol. 3 (2): 74-84. Lima, Perú. Disponible en <http://revistascientificas.upeu.edu.pe/index.php/riu/article/view/524/545>

Sánchez, E. (2015). Proyectos relacionados con el café (entrevista). Universidad Nacional de Costa Rica. Heredia, Costa Rica.

Steiner, R. (2006). Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica (en línea). Consultado el 26 de noviembre del 2014. Disponible en <http://ley8839.go.cr/blog/wp-content/uploads/2006/04/UTILIZACION-ENERGETICA-RESIDUOS-ORGANICOS-EN-COSTA-RICA-VERSION-FINAL-Junio-2006.pdf>

Torres, C.; Molina, D.; Hernández, N. (2016). Informe: Análisis de la incidencia geográfica en la composición de la broza de café y potencial influencia en los procesos de gasificación. Universidad de Costa Rica.

Torres, C. Urvina, L. (2017). Informe: Evaluación financiera de la Gasificación de broza de café. Universidad de Costa Rica.

Torres, M.; Karim, P.; Salazar, F. (2006). Tamaño de una muestra para una investigación de mercado (en línea). Universidad Rafael Landívar, GT. Consultado el 25 noviembre del 2014. Disponible en: [http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL\\_02\\_BAS02.pdf](http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_02_BAS02.pdf)

Tortosa, G. 2013. Emisión de gases de efecto invernadero durante el compostaje de alperujo. Consultado el 26 de Abr.17. Disponible (en línea): <http://www.compostandociencia.com/2013/03/emision-de-gases-de-efecto-invernadero-html/>

Varona, J. (2012). Análisis de las características técnicas y sociales asociadas a procesos de compostaje comunitario (en línea). Consultado el 13 de agosto del 2015. Disponible en <http://www.compostaenred.org/documentacion/ProyectoJavierVarona.pdf>

Velazco, A. (2011). Propuesta conceptual de un sistema de gasificación de residuos sólidos urbanos integrado a un sistema de generación de energía. Tesis, Mag. Universidad Nacional Autónoma de México. Pág. 18

Wade, L. (2004). Química Orgánica. Madrid, España: Pearson Education.

## **11. Apéndices**

**Apéndice 1.** Diagnóstico realizado a la muestra de Beneficios seleccionados para el muestreo de gases efecto invernadero en pulpa residual de café, 2015.

### **SECTOR VALLE CENTRAL**

El Valle Central está conformado por las provincias San José, Heredia y Alajuela. La región se extiende desde los 800 hasta los 1.600 metros sobre el nivel del mar, sin embargo más del 80% de los cafetos se cultivan entre 1.000 y 1.400 metros. Las subregiones están distribuidas entre zonas bajas: de menos de 1.000 metros, donde el café es más liviano y las zonas altas, superiores a los 1.200 metros, con café más fuerte o más ácido y también más aromático (Icafé, 2015). En esta zona fueron visitados los Beneficios: Coope Libertad, Hermanos Vargas Hidalgo, Las Marías y La Guaria. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

#### **A. Coope Libertad**

**Ubicación:** La Isla, Moravia.

**Período:** Setiembre a marzo

**Características:** Se realiza volteo dos veces por semana. Se le agrega cal, ceniza, granza, demagram (enzima) con el objetivo de eliminar humedad y acelerar el proceso de degradación (ver Figuras 20 y 19).

**Limitante:** no se encontró limitante.



*Figura 20. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual de café en el Beneficio Coope Libertad, 2015.*



*Figura 19. Sitio de tratamiento de la pulpa residual de café en el Beneficio Coope Libertad, 2015.*

#### B. Hermanos Vargas Hidalgo

**Ubicación:** Los Ángeles, Sabanilla, Alajuela.

**Período de cosecha:** Setiembre a Febrero.

**Características:** Se trata bajo composteo únicamente la pulpa, este es trasladado del sitio de generación a un patio al aire libre. Este no recibe volteo, por lo que a final de cosecha se aplica al campo. Todo el abono se utiliza en la finca. Es importante destacar, que a dicho material le agrega el lodo de la planta de tratamiento de aguas y una bacteria para acelerar el proceso de descomposición.

**Limitante:** Al no recibir volteo, este no puede ser considerado como un tratamiento de compostaje según lo expuesto en el cuadro 2. Por lo que, no presenta las condiciones óptimas para el muestreo.

#### C. Las Marías

**Ubicación:** Santa Bárbara, Heredia.

**Período:** Octubre a marzo.

**Características:** Los residuos destinados a este tratamiento son la pulpa y miel. Una parte es tratada por medio de compost en un patio, donde se le aplica volteo de manera mecánica cada quince días (ver Figuras 21 y 22). Del 10 al 12% se aplica directamente al campo inmediatamente después de generado. El abono generado a partir del composteo también es usado en la finca.

El sitio de disposición se encuentra al aire libre y posee una pendiente con el fin de canalizar los lixiviados a una fosa, la cual es enriquecida con un hongo de la especie *trichoderma* y es aplicada de nuevo al compost como método para acelerar el proceso de degradación (ver Figura 23).

**Limitante:** no toda la cantidad de pulpa residual es tratada bajo compost, parte es aplicada directamente al campo, lo cual no puede ser considerada como composteo, pues según Sancho (2015), esta es considerada como una enmienda al suelo, en la cual se realiza un aporte rico de nitrógeno, sin embargo no conlleva un tratamiento como tal. Por lo tanto para el muestreo se tomará en cuenta únicamente el 88% que es tratada en los patios de compost.



*Figura 21. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Las Marías, 2015.*



*Figura 22. Maquinaria utilizada para el volteo en el Beneficio Las Marías, 2015.*



*Figura 23. Fosa de almacenamiento de los lixiviados generados por el compost en el Beneficio Las Marías, 2015.*

#### D. La Guaria

**Ubicación:** San Rafael de Poás, Alajuela.

**Período:** Setiembre a febrero.

**Características:** En la Figura 24., se puede observar el sitio donde la pulpa residual cae una vez conducida por medio del tornillo del despulpado del café. En este es almacenada y cuando hay una suficiente cantidad se traslada para ser aplicada directamente al campo.

**Limitante:** Esta es aplicada directamente al campo después de su generación por lo que no recibe ningún tratamiento como compost, por lo tanto puede ser incluida en la muestra.



*Figura 24. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio La Guaria, 2015.*

### **SECTOR VALLE CENTRAL OCCIDENTAL**

La región Valle Central Occidental comprende los pueblos de San Ramón, Palmares, Naranjo y Grecia. En el Valle Occidental se unen las condiciones casi ideales para el cultivo del mejor grano: suelos volcánicos muy fértiles, humedad del 81%, temperaturas estables de 21.5 °C y adecuada luz solar todo el año de 48 a 52%, con un promedio de 2.250 horas anuales (Icafé, 2015). En esta región se realizó la visita del Beneficio La Eva, Café de Altura, Coopro Naranjo, El Cántaro y Coope Atenas.

#### **A. La Eva**

**Ubicación:** Sarchí Norte, Valverde Vega, Alajuela.

**Período:** Setiembre a marzo.

**Características:** No se pudo observar el tratamiento de composteo, pues este es delegado a una empresa llamada LH Bio Sur. En este se trata tanto la pulpa como lodos. Se le aplica microorganismos (La Meca), sin embargo la persona encuestada desconoce el tratamiento completo de esta.

**Limitante:** Es tratada por un tercero, lo que implica complicaciones en el muestreo en cuanto a logística y disposición.

#### B. Café de Altura

**Ubicación:** San Ramón, Alajuela.

**Período:** Noviembre a marzo.

**Características:** Poseen dos sitios para el tratamiento de la pulpa y un sitio de almacenamiento bajo techo, en el cual es destinado para disminuir la mayor cantidad de humedad (ver Figura 25). Luego es sacado en proporciones a los patios en donde se le emplea volteo diario (ver Figura 26). Se utiliza microorganismos (La Meca) para acelerar el proceso de degradación y durante el proceso se realizan mediadas de temperatura y humedad, sin embargo no se encuentra documentado.

El lixiviado de los sitios de almacenamiento son contenidos en una caja de registro y son bombeados al sistema de tratamiento de aguas residuales y dispersos posteriormente en el pasto estrella. En abono se destruye entre los socios y otra parte se vendido.

**Limitante:** no presenta limitante, posee condiciones óptimas de muestreo.



*Figura 26. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café de Altura, 2015.*



*Figura 25. Volteo realizado en el patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café de Altura, 2015.*

### C. Coopro-Naranjo

**Ubicación:** Naranjo, Alajuela.

**Período:** Octubre a febrero.

**Características:** Poseen ocho sitios para el tratamiento de la pulpa y el mucílago al aire libre, el cual miden en total aproximadamente 7000 m<sup>2</sup> (ver Figura 27). La pulpa es transportada a las terrazas, se le da volteo cada ocho días para posteriormente ser aplicado al campo. El lixiviado es canalizado al tratamiento de aguas mediante tubería. Es importante recalcar que los lodos de la laguna son mezclados con el compost.

**Limitante:** no presenta limitante, posee condiciones óptimas de muestreo.



*Figura 27. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Coopro- Naranjo, 2015.*

### D. El Cántaro

**Ubicación:** La Candelaria, Naranjo.

**Período:** Noviembre a febrero.

**Características:** Poseen tres sitios al aire libre de un área de 1110.72 m<sup>2</sup> (ver Figura 30). Se le aplica en el tornillo de conducción de la pulpa dos tipos de microorganismos: La Meca y Bioprotection a base de camarón (ver Figura 31). Posteriormente es conducida a los

patios, donde se le aplica volteo cada ocho días. Se trata bajo este método tanto la pulpa como la miel.

**Limitante:** no presenta limitante, posee condiciones óptimas de muestreo



Figura 31. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio El Cántaro, 2015.



Figura 30. Microorganismos aplicados en el Beneficio El Cántaro, 2015.

#### E. Coope-Atenas (Beneficio El Diamante)

**Ubicación:** Atenas.

**Período:** Setiembre a marzo.

**Características:** Poseen un patio para el tratamiento de la pulpa al aire libre de aproximadamente 3041 m<sup>2</sup> (ver Figura 32). Se deposita bajo techo el mismo día de generación y hasta que termine la cosecha se le empieza a dar movimiento. Van sacando porciones de 50 m<sup>3</sup> para tratarlos por medio de volteo cada hora.

El lixiviado es colectado por medio de tubería, el cual es conducido al sistema de tratamiento de aguas (ver Figura 33). El abono generado del compost se utiliza para hacer almácigos y otra parte se entrega a los asociados.

**Limitante:** no presenta limitante, posee condiciones óptimas de muestreo.



*Figura 33. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Atenas, 2015.*



*Figura 32. Tuberías utilizadas para captar el lixiviado en el patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Atenas, 2015.*

## SECTOR OROSI

La zona cafetalera de Orosi produce café en fincas con altitudes que van de los 1.000 a los 1.400 metros; Cachí entre los 1.000 y 1.300 y Paraíso de 1.200 a 1.350 metros (Icafé 2015). En esta región se visitó únicamente Café Cristina, en seguida se detallan las características encontradas.

### A. Café Cristina

**Ubicación:** Birrisito, Paraíso, Cartago.

**Período:** Octubre a febrero.

**Características:** poseen un el sitio de tratamiento bajo techo, de 200 m<sup>2</sup> (ver Figura 34), en este se dispone únicamente la pulpa residual. Se le agrega Zinc, Boro, Calcio, Carbón, Gallinaza, EM (microorganismos) y PT (microorganismos). Además se le aplica volteo cada 15 días. El abono lo utilizan en la finca. 20% se destina a lombricompost.

**Limitante:** no presenta limitante, posee condiciones óptimas de muestreo.



*Figura 34. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Café Cristina, 2015.*

## SECTOR DE TARRAZÚ

La región de Tarrazú comprende los cantones de San Pablo de León Cortés, San Marcos de Tarrazú y Santa María de Dota. En esta se cultiva en alrededor de 22.000 hectáreas compuestas por pequeñas fincas con un tamaño promedio de 2.5 hectáreas. La producción de café promedio es de 780 000 fanegas por año (Icafé, 2015). En esta zona fueron visitados los Beneficios: La Casona, Juan Diego Hidalgo, Coope Tarrazú, Vista del Lago, Monte Copey, Juanajute, La Violeta y Río Jorco. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

### A. La Casona

**Ubicación:** San Marco de Tarrazú.

**Período:** Diciembre a marzo.

**Características:** Poseen dos sitios dentro del cafetal para la disposición de la pulpa. No se pudo observar, ya que se visitó de noche, sin embargo según la información recolectada este se encuentra al aire libre y en superficie de tierra. Además no se aplica volteo, solamente se deposita en el sitio y luego se aplica entre el cafetal.

**Limitante:** es aplicado directamente al campo, por lo tanto no existe un proceso de compostaje como tal, lo que impide su selección para muestreo.

## B. Juan Diego Hidalgo (La Bandera)

**Ubicación:** San Lorenzo de Tarrazú

**Período:** Enero a abril.

**Características:** La pulpa se deposita en un sitio cercano al Beneficio (ver Figura 35) y luego se aplica entre el cafetal. No se aplica volteo ni se le agregan microorganismos.

**Limitante:** Al no recibir volteo, este no puede ser considerado como un tratamiento de compostaje. Por lo que, no presenta las condiciones óptimas para el muestreo.



*Figura 35. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio La Bandera, 2015.*

## C. Coope- Tarrazú

**Ubicación:** San Marco de Tarrazú.

**Período:** Diciembre a marzo.

**Características:** Poseen un sitio bajo techo para el almacenamiento final del abono (ver Figura 36) y un patio para el tratamiento de aproximadamente 4875 m<sup>2</sup> al aire libre (ver Figura 37). La pulpa sale de las máquinas y son transportadas con bandas hacia un patio temporal dentro del Beneficio. Estos son almacenados y al día siguiente son transportados hacia el patio anteriormente mencionado. Solo 1/4 de la pulpa generada es tratada como composteo, el resto se dispone en terrazas (ver Figura 38). Por cada fanega se regalan 4 sacos a los asociados.

El lixiviado producido en el patio se asume que es evaporado. Las terrazas no poseen ninguna permeabilidad, sin embargo hay captación de lixiviado en un pozo común, los cuales son bombeados al campo de riego. En dicho sitio lo que tiene depositado son los residuos del año pasado.

**Limitante:** Solo  $\frac{1}{4}$  es tratado como compostaje, por lo que se trabajaría con esta fracción para el muestreo.



*Figura 36. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015.*



*Figura 37. Sitio de almacenamiento del abono en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015.*



*Figura 38. Terrazas en donde se dispone la pulpa residual en el Beneficio Coope- Tarrazú, 2015.*

#### D. Vista del Lago

**Ubicación:** San Carlos de Tarrazú.

**Período:** Diciembre a marzo.

**Características:** Se deposita en el sitio de un área de 180 m<sup>2</sup>, se combinan capas de pulpa y cal. Luego es aplicado entre el cafetal (ver Figura 39).

**Limitante:** es aplicado directamente al campo, por lo tanto no existe un proceso de compostaje como tal, lo que impide su selección para muestreo.



*Figura 39. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Vista del Lago, 2015.*

#### E. Monte Copey

**Ubicación:** San Lorenzo de Tarrazú.

**Período:** Enero a marzo.

**Características:** La pulpa es transportando mediante un tornillo al sitio de disposición (ver Figura 40). Se deposita y hasta el final de la cosecha se le da un volteo antes de aplicar al campo. Se le aplica cal y lombriz californiana.

**Limitante:** No presenta las condiciones óptimas de muestreo, no realizan volteo.



*Figura 40. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Monte Copey, 2015.*

F. Río Jorco

**Ubicación:** San Ignacio, Acosta.

**Período:** Octubre a febrero.

**Características:** La pulpa junto con la miel es transportada por medio de un tornillo a un sitio de almacenamiento temporal (ver Figura 41). Esta es transporta el mismo día al sitio de tratamiento, el cual se ubica en medio del cafetal y se le aplica cal (ver Figura 42).

**Limitante:** no presenta limitante.



*Figura 41. Sitio de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Jorco, 2015.*



*Figura 42. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Río Jorco, 2015.*

## G. Juanachute

**Ubicación:** San Pablo de León Cortés.

**Período:** diciembre a marzo.

**Características:** La pulpa se transporta por medio de un tornillo a un sitio de almacenamiento y se aplica el mismo día al campo. En la Figura 43, se puede observar el sitio donde se genera la pulpa residual.

**Limitante:** es aplicado directamente al campo, por lo tanto no existe un proceso de compostaje como tal, lo que impide su selección para muestreo.



*Figura 43. Sitio de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio Juanachute, 2015.*

## H. La Violeta

**Ubicación:** La violeta, Frailes, Desamparados.

**Período:** Diciembre a marzo.

**Características:** Poseen un sitio de disposición de aproximadamente 270 m<sup>2</sup>, en los cuales se le aplica a la pulpa cal y miel (ver Figura 44). Sin embargo no se realiza una frecuencia de volteo, únicamente para adicionarle dichos componentes, pues indican que es complicado tener personal destinado para dicha labor.

**Limitante:** no se realiza volteo, por lo que no puede ser considerado en la muestra.



*Figura 44. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio La Violeta, 2015.*

## **SECTOR DE TURRIALBA**

Turrialba es una zona productora de café, cuya maduración temprana, está influida por el clima de la vertiente del Atlántico y del Valle Central Oriental. Su topografía varía en altitud de los 600 a los 1.400 metros (Icafé, 2015). En esta región fueron visitados dos Beneficios: Aquiares y Santa Rosa. Estos se detallan a continuación:

### **A. Aquiares**

**Ubicación:** Aquiares, Turrialba, Cartago.

**Período:** Setiembre a febrero.

**Características:** Se dispone pulpa y mucílago residual en un patio, en el cual se le da volteo dos veces por semana (ver Figura 45). Se le aplica un microorganismo llamado Environoxs. Posteriormente, es aplicado al campo.

**Limitante:** no se encontró limitante.



*Figura 45. Sitio de tratamiento de la pulpa residual de café en el Beneficio de Aquiares, 2015.*

#### B. Santa Rosa

**Ubicación:** Santa Rosa, Turrialba.

**Período:** Mayo a febrero.

**Características:** La pulpa se deposita en un sitio de almacenamiento temporal, con el fin de disminuir humedad. Los lixiviados generados son conducidos al sistema de aguas residuales (lagunas) por desnivel del terreno. Posteriormente, es trasladado a 4 sitios que se encuentran bajo techo de plástico transparente (ver Figura 46), en el cual se realiza volteo manual cada 8 días y volteo mecánico utilizando un “rotadito” tres veces por semana. Esto depende de la cantidad generada y de la urgencia en la obtención.

Los montículos formados poseen de 40 a 60 cm de alto aproximadamente. Se utilizan dos inóculos microbiológicos Environoc -301 ( $1 \times 10^{10}$  microorganismo/ml) y Environoc 501 ( $1 \times 10^8$  microorganismo/ml), con el fin de acelerar el proceso de descomposición de la materia orgánica (ver imagen 47). El abono final se utiliza para elaborar los almácigos, ya que consideran que transportarlo directamente al campo implica costos.

**Limitante:** no presenta limitaciones.



*Figura 47. Sitio de disposición de la pulpa residual en el Beneficio Santa Rosa, 2015.*



*Figura 46. Microorganismos aplicados al compost en el Beneficio Santa Rosa, 2015.*

## SECTOR BRUNCA

Esta región está situada en el sur de Costa Rica. La conforman los dos cantones productores de café más jóvenes: Coto Brus, con frontera con Panamá, y Pérez Zeledón. El cultivo del grano lo realizan productores en fincas cuyas altitudes oscilan entre los 900 y 1.400 metros (Icafé 2015). Los Beneficios visitados en esta zona fueron: Coopro- San Vito, Río Negro, Pagua, San Gerónimo y Coope- Agri. Estos se detallan a continuación:

### A. Coopro-San Vito

**Ubicación:** San Vito, Coto Brus.

**Período:** Julio a febrero.

**Características:** En la Figura 48, se puede observar el sitio de almacenamiento temporal de la pulpa, el cual constituye el sitio de generación. Desde este es trasladado a un patio al aire libre de un área de 4634.28 m<sup>2</sup>, en donde es depositado y al final de la cosecha se le realiza

un acomodo antes de aplicar al campo (ver Figura 49). Estos asumen que el lixiviado se evapora.

**Limitante:** No realizan un volteo, estos solo efectúan un acomodo antes de aplicar al campo, consecuentemente no es considerado como un proceso de composteo.



*Figura 49. Área de almacenamiento temporal de la pulpa residual en el Beneficio de Coopro- San Vito, 2015.*



*Figura 48. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coopro-San Vito, 2015.*

## B. Río Negro

**Ubicación:** Sabalito de Coto Brus.

**Período:** Agosto a marzo.

**Características:** El la Figura 50, se puede apreciar el sitio de generación de la pulpa, de allí se traslada a los patios y se coloca en forma de montículos. Estos poseen dos patios de 6000 y 5560.5 m<sup>2</sup> respectivamente (ver Figura 51). Se aplica volteo con una frecuencia de dos a tres movimientos al final de la cosecha. El lixiviado se recoge por medio de tubería y es llevada a una especie de drenaje. Esta se encontraba cubierta de vegetación lo que impidió observar la profundidad (ver Figura 52).

**Limitante:** no presenta limitante.



*Figura 50. Área de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Negro, 2015.*



*Figura 51. Patio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Río Negro, 2015.*



*Figura 52. Drenaje utilizado para los lixiviados generados del compost en el Beneficio Río Negro, 2015.*

C. Pagua

**Ubicación:** Pejibaye, Pérez Zeledón, San José.

**Período:** Octubre a febrero.

**Características:** Estos cuentan con un sitio de dos m<sup>2</sup> al aire libre en medio del cafetal, en donde depositan la pulpa y miel (ver Figura 53). Al final de cosecha se le da volteo cada

veintidós días antes de aplicarlo al campo. Se le aplica cal como método para disminuir humedad.

**Limitante:** no presenta limitante.



*Figura 53. Área destinada para el tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Pagua, 2015.*

D. San Gerónimo

**Ubicación:** San Jerónimo, San Pedro, Pérez Zeledón.

**Período:** Setiembre a marzo.

**Características:** La pulpa se acumula y en verano se saca y se lleva a las fincas. Cada productor dispone de la pulpa de la manera que desea. De los siete socios del Beneficio solo dos realizan composteo, los demás lo aplican directamente al campo. No hay porción destinada a cada socio, se llevan la cantidad que deseada. No se pudo observar los sitios pues quedan dentro de las fincas de los socios. En la Figura 54, se encuentra el sitio de generación de la pulpa, es este queda depositado hasta final de cosecha.

**Limitante:** La pulpa es tratada en las fincas de cada socio, lo que implica complicaciones de logística y disposición. Además, no se posee un control de la cantidad de pulpa que es tratada bajo este sistema y la aplicada al campo, lo que afectaría la representatividad de los datos obtenidos.



*Figura 54. Área de disposición de la pulpa residual en el Beneficio San Gerónimo, 2015.*

E. Coope- Agri

**Ubicación:** Pérez Zeledón, San José.

**Período:** Agosto a marzo.

**Características:** Se acumula en un sitio de almacenamiento (ver Figura 55), para su posterior transporte al sitio de tratamiento (ver Figura 56), donde es mezclada con la cachaza de la caña de azúcar, ceniza y microorganismos. El abono es depositado en un tercer sitio (ver Figura 57), la mitad de este se utiliza en la finca de caña de azúcar y café de la cooperativa. Lo demás se vende a asociados y no asociados. Los lodos también son depositados junto a la pulpa para la elaboración del compost (provenientes de las lagunas de tratamiento de las aguas).

**Limitante:** disposición del Beneficio de eliminar la vegetación presente en el compost, pues tendría efectos en el muestreo.



*Figura 55. Área de almacenamiento de la pulpa residual en el Beneficio de Coope- Agri, 2015.*



*Figura 56. Sitio de tratamiento de la pulpa residual en el Beneficio Coope- Agri, 2015.*



*Figura 57. Sitio de almacenamiento del compost en el Beneficio Coope- Agri, 201*

**Apéndice 2.** Resultados obtenidos de la caracterización de la pulpa residual de café en los diez Beneficios en seleccionados y las emisiones de GEI asociadas

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit rógeno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
Café de altura	5	16/2/2016	Muestra inicia	32 ± 1	14 288 ± 1	206 ± 15	47 ± 15	1 443 ± 722	10 787 ± 539	1.9	0.01	81.09	12.0	0.0054
			1	439			025	415						
	23/2/2016	7	5	5 236 ± 333	176 ± 15	207 ± 15	1 700 ± 85	1 727 ± 087	3.1	22.20	49.39	37.0	7.09	
			797					863		3				555
	1/3/2016	14	1	543 ± 32	154 ± 15	84 ± 15	1 832 ± 91	54 684 ± 693	1.8	25.71	71.01	36.0	13.58	
			153 ± 32					± 2 784	9					
9/3/2016	22	1	676 ± 32	1 146 ± 15	674 ± 15	148 ± 508	87 883 ± 4 444	2.4	21.03	61.11	50.0	8.50		
		603						8						

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit róg eno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
				± 32		475								
El Cántaro	3	15/3/2016	28	4	1 354 ± 875 ± 797	296 ± 15	811 ± 15	4 304 ± 265 ± 1 274	24 478	2.9	26.49	52.97	49.0	9.10
		30/3/2016	NM*	852 ± 32	105 ± 32	234 ± 15	37 ± 15	992 ± 32	nd	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*
		12/1/2016	Muestra inicial	c	nd	< 15	c	1 571 ± 416 ± 78 621	288 ± 076 ± 14 454	2.4	42.07	82.26	9.0	17.51
		28/1/2016	16	c	c	nd	c	1 343 ± 117	62 401 ± 3 170	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*
		9/2/2016	NM*	72 ± 32	192 ± 32	nd	< 15	nd	9 291 ± 514	1.1	6.62	20.80	78.0	5.69

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit rógeno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
Coopro-Naranjo	6	11/1/2016	Muestra inicial	< 32	nd	87 ± 15	138 ± 15	108 909 ± 5 496	264 ± 230 ± 13 262	2.3 ± 3	38.56	79.01	11.0	16.55
		28/1/2016	16	246 ± 32	44 ± 32	420 ± 15	34 ± 15	2 397 ± 119 911	166 ± 912 ± 8 ± 396	2.7 ± 7	24.93	68.39	36.0	9.01
		9/2/2016	28	168 ± 32	461 ± 32	17 ± 15	nd	132 744 ± 6 687	122 ± 910 ± 6 ± 196	2.7 ± 7	37.40	82.00	11.0	13.52
		15/2/2016	34	350 ± 32	811 ± 32	51 ± 15	< 15	169 517 ± 8 526	70 344 ± 3 567	4.5 ± 9	31.16	73.68	27.0	6.79
		23/2/2016	42	544 ± 32	248 ± 32	154 ± 15	49 ± 15	204 194 ± 10 ± 3 170 ± 260	62 340 ± 3 170	3.5 ± 7	44.41	82.11	10.0	12.45
		29/2/2016	NM*	1	164 ± 32	226 ± 58 ±	94 664	37 538	N	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nitrogeno	Carbono	Humedad	Ceniza	
Coope Tarrazú	4	016		073 ± 32		15	15	± 4 783	± 1 927	M*				
		8/3/2016	NM*	285 ± 32	73 ± 32	230 ± 15	118 ± 15	64 174 ± 3 259	36 527 ± 1 876	N	NM*	NM*	NM*	NM*
		14/3/2016	NM*	232 ± 32	174 ± 32	74 ± 15	192 ± 15	26 703 ± 1 385	38 998 ± 2 000	N	NM*	NM*	NM*	NM*
		18/1/2016	Muestra iniciada	nd	nd	< 15	< 15	2 703 345 ± 135	1 331 490 ± 66	2.2 6	38.95	68.87	34.0	17.26
		11/2/2016	24	773 ± 32	419 ± 32	< 15	< 15	nd	nd	3.1 3	33.50	69.01	18.0	10.70
		24/2/2016	47	881 ± 32	127 ± 32	106 ± 15	90 ± 15	117 874 ± 5 944	63 785 ± 3 239	2.9 1	29.22	73.74	22.0	10.03
		3/3/2016	55	264 ± 32	267 ± 32	124 ± 15	134 ± 15	31 653 ± 1 633	44 130 ± 2 257	4.2 2	31.94	69.84	29.0	7.56

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit róg eno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
Coope Atenas	5	11/3/2016	NM*	287 ± 32	349 ± 32	161 ± 15	78 ± 15	51 967 ± 2 648	33 330 ± 1 717	N	NM*	NM*	NM*	NM*
		17/3/2016	NM*	150 ± 32	75 ± 32	55 ± 15	59 ± 15	24 275 ± 1 264	nd	N	NM*	NM*	NM*	NM*
		16/2/2016	Muestra inicia 1	32 ± 1	14 288 ± 1 439	206 ± 15	47 ± 15	1 4 439 502 ± 722 025	10 787 ± 539 415	1.9	0.01	81.09	12.0	0.01
		23/2/2016	6	5 ± 333 ± 797	5 236 ± 797	176 ± 15	207 ± 15	1 700 ± 745 ± 85 087	1 727 ± 009 ± 863 555	3.1	22.20	49.39	37.0	7.09
		1/3/2016	13	1 ± 153 ± 32	543 ± 32	154 ± 15	84 ± 15	1 832 ± 851 ± 91 693	54 684 ± 2 784	1.8	25.71	71.01	36.0	13.58
		9/3/2016	21	1 ± 676 ± 32	676 ± 32	1 146	674 ±	148 508	87 883	2.4	21.03	61.11	50.0	8.50

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nitrogeno	Carbono	Humedad	Ceniza	
Río Jorco		16		603 ± 32		± 15	15	± 7 475	± 4 444	8				
		15/3/2016	27	4	1 354 ± 32	296 ± 15	811 ± 15	4 304 ± 265	24 478 ± 1 274	2.9	26.49	52.97	49.0	9.10
		30/3/2016	NM*	852 ± 32	105 ± 32	234 ± 15	37 ± 15	992 ± 32	nd	N	NM*	NM*	NM*	NM*
	5	26/1/2016	Muestra inicial	nd	c	521 ± 15	200 ± 15	54 750 ± 2 788	43 215 ± 2 211	2.3	39.73	70.35	9.0	17.06
		8/2/2016	13	1	81 ± 32	< 15	20 ± 15	34 152 ± 1 758	33 930 ± 1 746	3.5	33.89	75.90	20.0	9.50
		17/2/2	17	614	194 ± 32	126 ±	nd	1 863	49 280	4.3	28.83	82.04	21.0	6.71

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit róg eno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
		016		± 32		15		078 ± 93 204	± 2 514	0				
		22/2/2016	22	386 ± 32	191 ± 32	< 15	114 ± 15	96 922 ± 4 896	1 258 ± 113	3.4 ± 2	35.45	81.34	11.0	10.36
		1/3/2016	30	153 ± 32	270 ± 32	41 ± 15	22 ± 15	49 697 ± 2 535	67 544 ± 3 427	3.4 ± 2	35.45	81.34	11.0	10.36
		7/3/2016	NM*	384 ± 32	128 ± 32	22 ± 15	15 ± 15	67 798 ± 3 440	42 952 ± 2 198	N ± M*	NM*	NM*	NM*	NM*
		15/3/2016	NM*	920 ± 32	768 ± 32	66 ± 15	441 ± 15	116 541 ± 5 877	138 ± 018 ± 6	N ± M*	NM*	NM*	NM*	NM*
									951					
<b>Santa Rosa</b>	2	19/1/2016	Muestra inicial	< 32	nd	29 ± 15	97 ± 687 ± 4 934	73 022 ± 3 701	15 ± 15	3.5 ± 7	20.65	71.69	35.0	5.79

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit rógeno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
		10/2/2016	31	6	3 952 ± 575 ± 797	38 ± 15	158 ± 15	117 048 ± 5 902	543 ± 27 205	N	NM*	NM*	NM*	NM*
		19/2/2016	40	668 ± 32	5 475 ± 797	535 ± 32	88617 ± 80	17 175 ± 909	49 948 ± 2 547	2.9	14.02	63.33	52.0	4.70
<b>Las Marías</b>	4	20/1/2016	Muestra iniciada	nd	nd	21 ± 15	60 ± 15	45 438 ± 2 322	2 484 ± 332 ± 124 ± 267	3.2	40.90	81.94	13.0	12.49
		12/2/2016	23	205 ± 32	75 ± 32	nd	< 32	1 526 ± 998 ± 76 400	85 285 ± 4 314	4.3	29.22	61.69	24.0	6.80
		18/2/2016	29	264 ± 32	642 ± 32	< 32	< 32	63 222 ± 3 211	61 007 ± 3 100	4.3	31.55	73.40	26.0	7.35
		26/2/2016	37	261	nd	< 32	40 ±	8 694 ±	48 992	4.2	30.38	11.99	20.0	7.20

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N	
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nitrogeno	Carbono	Humedad	Ceniza		
Cope Agri	4	016			± 32		32	485	± 2 500	2					
		8/1/2016	Muestra inicia								2.6	31.55	78.47	10.0	12.04
		27/1/2016	19	544	173 ± 32	47 ± 15	25 ± 15	281 ± 14	356 ± 118	279 ± 14 048	3.9	33.89	77.13	21.0	8.62
		9/2/2016	32	2	1 378 ± 461	16 ± 15	< 15	1 730 ± 86 586	42 817 ± 140	279 ± 923	4.4	35.06	75.78	24.0	7.89
		18/2/2016	41	1	279 ± 32	135 ± 15	36 ± 15	175 ± 8 807	142 ± 2 277	44 548 ± 7	4.3	34.67	80.08	18.0	7.94
		23/2/2016	NM*	2	1 952 ±	451 ±	65 ±	2 017	67 744	N	NM*	NM*	NM*	NM*	NM*

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit róg eno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
		016		241 ± 797	32	15	15	603 ± 100 930	± 3 437	M*				
		2/3/20 16	NM*	1 740 ± 32	1 338 ± 32	1 100 ± 145	1 486 ± 145	1 459 655 ± 73 033	692 422 ± 32	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*
		8/3/20 16	NM*	1 001 ± 32	837 ± 32	957 ± 15	381 ± 15	1 441 719 ± 72 136	90 620 ± 4 581	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*
		16/3/2 016	69	1 664 ± 32	2 091 ± 797	1 004 ± 145	411 ± 15	152 657 ± 7 683	86 346 ± 4 367	5.9 0	33.89	71.42	24.0	5.75
		30/3/2 016	83	5 289 ± 797	3 696 ± 797	26 ± 15	224 ± 15	6 788 ± 32	4 304 ± 32	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nit rógeno	Carbon o	Humed ad	Ceniza	
Café Cristina	6	15/1/2016	Muestra inicia	5	2 928 ± 380 ± 797	431 ± 15	582 ± 15	2 108	116	2.7	37.78	76.27	9.0	13.66
		12/2/2016	28	1	2 874 ± 652 ± 32	20 ± 15	91 ± 15	5 196 ± 310	6 109 ± 355	3.7	36.23	83.39	15.0	9.57
	16/2/2016	32	1	2 033 ± 147 ± 32	43 ± 15	94 ± 15	44 885 ± 2 294	31 720 ± 1 636	4.9	29.60	80.40	17.0	5.98	
		25/2/2016	41	382 ± 32	1 280 ± 32	16 ± 15	15 ± 15	28 440 ± 1 472	7 540 ± 427	3.4	43.63	81.01	12.0	12.49
	3/3/2016	48	408 ± 32	584 ± 32	< 15	84 ± 15	23 720 ± 1 236	22 975 ± 1 199	4.9	28.44	85.45	19.0	5.74	
		9/3/2016	NM*	559 ± 32	174 ± 32	18 ± 15	<15	21 184 ± 1 109	14 572 ± 779	N M*	NM*	NM*	NM*	NM*

Beneficio	M totales	Fecha	Período (días)	CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)		CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)		Composición de la biomasa % (m/m)				Relación C/N
				T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	T Baja	T Alta	Nitrogeno	Carbono	Humedad	Ceniza	
		17/3/2016	62	11	2 959 ± 111	126 ± 15	21 ± 15	31 592 ± 1 630	33 642 ± 1 732	4.08	43.24	85.13	14.0	10.61

Nota: \*NM día de muestreo en donde no se tomó muestra de pulpa del montículo de compostaje.

Fuente: Elaboración propia basada en resultados generados por INISEFOR (2016).

**Apéndice 3.** Temperatura promedio del montículo para cada día de muestreo realizado y su respectiva emisión de GEI.

Beneficio	Fecha Muestreo	Temperatura Ambiental	Temperatura promedio montículo (°C)	Concentración de CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Concentración de CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Concentración de N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)
Santa Rosa	19/1/2016	Baja	25	< 32	73 022 ± 3 701	29 ± 15
	19/1/2016	Media	16	nd	60 956 ± 3 098	< 15
	19/1/2016	Alta	22	nd	97 687 ± 4 934	15 ± 15
	10/2/2016	Baja	30	6 575 ± 797	117 048 ± 5 902	38 ± 15
	10/2/2016	Media	37	17 932 ± 1 439	1 214 179 ± 60 759	64 ± 15
	10/2/2016	Alta	35.3	3 952 ± 797	543 099 ± 27 205	158 ± 15
	19/2/2016	Baja	26.8	668 ± 32	17 175 ± 909	535 ± 32
	19/2/2016	Media	26.7	400 ± 32	26 027 ± 1 351	425 ± 32
	19/2/2016	Alta	25	5 475 ± 797	49 948 ± 2 547	88617 ± 80
	Las Marías	20/1/2016	Baja	35	nd	45 438 ± 2 322
20/1/2016		Media	34	nd	2 017 006 ± 100 900	28 ± 15
20/1/2016		Alta	30	nd	2 484 332 ± 124 267	60 ± 15
12/2/2016		Baja	50.9	205 ± 32	1 526 998 ± 76 400	nd
12/2/2016		Media	53.4	98 ± 32	113 656 ± 5 733	< 15
12/2/2016		Alta	50.4	75 ± 32	85 285 ± 4 314	< 32
18/2/2016		Baja	40.7	264 ± 32	63 222 ± 3 211	< 32
18/2/2016		Media	46.8	737 ± 32	30 392 ± 1 570	< 32
18/2/2016		Alta	49.3	642 ± 32	61 007 ± 3 100	< 32
26/2/2016		Baja	26.4	261 ± 32	8 694 ± 485	< 32
26/2/2016	Media	27.1	84 ± 32	53 542 ± 2 727	< 32	
26/2/2016	Alta	26.5	nd	48 992 ± 2 500	40 ± 32	
El cántaro	12/1/2016	Baja	24	c	1 663 833 ± 83 242	19 ± 15

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
	12/1/2016	Media	26.5	nd	288 076 ± 14 454	c
	12/1/2016	Alta	28.5	c	1 571 416 ± 78 621	< 15
	28/1/2016	Baja	47	c	1 343 ± 117	nd
	28/1/2016	Media	47	c	164 164 ± 8 258	nd
	28/1/2016	Alta	49	c	62 401 ± 3 170	c
	9/2/2016	Baja	25.3	72 ± 32	nd	nd
	9/2/2016	Media	25.7	307 ± 32	nd	nd
	10/2/2016	Alta	25.8	192 ± 32	9 291 ± 514	< 15
<b>Café Cristina</b>	15/1/2016	Baja	38	5 380 ± 797	2 108 978 ± 105 499	431 ± 15
	15/1/2016	Media	39.4	3 317 ± 797	44 500 ± 2 275	1 104 ± 145
	15/1/2016	Alta	41.9	2 928 ± 797	116 104 ± 5 855	582 ± 15
	12/2/2016	Baja	24	1 652 ± 32	5 196 ± 310	20 ± 15
	12/2/2016	Media	26.5	634 ± 32	5 288 ± 314	82 ± 15
	12/2/2016	Alta	27.7	2 874 ± 797	6 109 ± 355	91 ± 15
	16/2/2016	Baja	26.4	1 147 ± 32	44 885 ± 2 294	43 ± 15
	16/2/2016	Media	25.2	1 463 ± 32	27 112 ± 1 406	81 ± 15
	16/2/2016	Alta	24.6	2 033 ± 32	31 720 ± 1 636	94 ± 15
	25/2/2016	Baja	25.4	382 ± 32	28 440 ± 1 472	16 ± 15
	25/2/2016	Media	25.5	1 535 ± 32	18 394 ± 970	35 ± 15
	25/2/2016	Alta	26	1 280 ± 32	7 540 ± 427	15 ± 15
	3/3/2016	Baja	23.4	408 ± 32	23 720 ± 1 236	< 15
	3/3/2016	Media	26.2	182 ± 32	16 181 ± 859	< 15
	3/3/2016	Alta	24.9	584 ± 32	22 975 ± 1 199	84 ± 15
	9/3/2016	Baja	25.2	559 ± 32	21 184 ± 1 109	18 ± 15
	9/3/2016	Media	25.5	965 ± 32	11 943 ± 647	17 ± 15
	9/3/2016	Alta	24.3	174 ± 32	14 572 ± 779	< 15
	17/3/2016	Baja	25.4	11 111 ± 1 432	31 592 ± 1 630	126 ± 15
	17/3/2016	Media	25	1 714 ± 32	31 082 ± 1 604	55 ± 15

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
	17/3/2016	Alta	25.6	2 959 ± 797	33 642 ± 1 732	21 ± 15
	31/3/2016	Media	26	2 618 ± 797	na	nd
	31/3/2016	Media	26	12 023 ± 797	14 001 ± 32	798 ± 15
<b>Coopro-Naranja</b>	11/1/2016	Baja	26.3	nd	264 230 ± 13 262	138 ± 15
	11/1/2016	Media	28.9	< 32	108 909 ± 5 496	87 ± 15
	11/1/2016	Alta	26	nd	200 154 ± 10 058	2 753 ± 256
	28/1/2016	Baja	42	246 ± 32	2 397 226 ± 119 911	420 ± 15
	28/1/2016	Media	41	102 ± 32	219 120 ± 11 006	43 ± 15
	28/1/2016	Alta	38	44 ± 32	166 912 ± 8 396	34 ± 15
	9/2/2016	Baja	49	168 ± 32	132 744 ± 6 687	17 ± 15
	9/2/2016	Media	47.5	369 ± 32	255 248 ± 12 812	nd
	9/2/2016	Alta	44.9	461 ± 32	122 910 ± 6 196	nd
	15/2/2016	Baja	49	350 ± 32	169 517 ± 8 526	51 ± 15
	15/2/2016	Media	43	118 ± 32	110 518 ± 5 576	< 15
	15/2/2016	Alta	50.1	811 ± 32	70 344 ± 3 567	< 15
	23/2/2016	Baja	45.2	544 ± 32	204 194 ± 10 260	154 ± 15
	23/2/2016	Media	43	297 ± 32	101 823 ± 5 141	55 ± 15
	23/2/2016	Alta	45.9	248 ± 32	62 340 ± 3 170	49 ± 15
	29/2/2016	Baja	43.7	1 073 ± 32	94 664 ± 4 783	226 ± 15
	29/2/2016	Media	45.3	133 ± 32	54 290 ± 2 2765	43 ± 15
	29/2/2016	Alta	44.6	164 ± 32	37 538 ± 1 927	58 ± 15
	8/3/2016	Baja	37.5	143 ± 32	19 993 ± 1 050	76 ± 15
	8/3/2016	Media	38.2	73 ± 32	36 527 ± 1 876	118 ± 15
8/3/2016	Alta	40.1	285 ± 32	64 174 ± 3 259	230 ± 15	
14/3/2016	Baja	36.7	232 ± 32	26 703 ± 1 385	74 ± 15	
14/3/2016	Media	37.5	290 ± 32	10 084 ± 554	88 ± 15	
14/3/2016	Alta	36.8	174 ± 32	38 998 ± 2 000	192 ± 15	

Beneficio	Fecha Muestreo	Temperatura Ambiental	Temperatura promedio montículo (°C)	Concentración de CH <sub>4</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Concentración de CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> día)	Concentración de N <sub>2</sub> O (mg/m <sup>2</sup> día)
Río Jorco	29/3/2016	Media	36	44 868 ± 1 432	na	277 ± 15
	29/3/2016	Media	36.8	97 ± 32	nd	50 ± 15
	26/1/2016	Baja	19	nd	54 750 ± 2 788	521 ± 15
	26/1/2016	Media	22	< 32	36 698 ± 1 885	152 ± 15
	26/1/2016	Alta	22	c	43 215 ± 2 211	200 ± 15
	8/2/2016	Baja	42.5	1 038 ± 32	34 152 ± 1 758	< 15
	8/2/2016	Media	43.3	232 ± 32	29 437 ± 1 522	28 ± 15
	8/2/2016	Alta	47.5	81 ± 32	33 930 ± 1 746	20 ± 15
	17/2/2016	Baja	40.7	194 ± 32	49 280 ± 2 514	nd
	17/2/2016	Media	41.5	152 ± 32	112 597 ± 5 680	36 ± 15
	17/2/2016	Alta	40.3	614 ± 32	1 863 078 ± 93 204	126 ± 15
	22/2/2016	Baja	42.7	386 ± 32	96 922 ± 4 896	< 15
	22/2/2016	Media	43.7	275 ± 32	121 164 ± 6 108	15 ± 15
	22/2/2016	Alta	43.5	191 ± 32	1 258 113 ± 62 956	114 ± 15
	1/3/2016	Baja	35.1	153 ± 32	49 697 ± 2 535	41 ± 15
	1/3/2016	Media	37.3	186 ± 32	96 532 ± 4 877	15 ± 15
	1/3/2016	Alta	37	270 ± 32	67 544 ± 3 427	22 ± 15
	7/3/2016	Baja	33.4	384 ± 32	67 798 ± 3 440	22 ± 15
	7/3/2016	Media	34.3	246 ± 32	20 580 ± 1 079	34 ± 15
	7/3/2016	Alta	32.2	128 ± 32	42 952 ± 2 198	15 ± 15
15/3/2016	Baja	32.2	920 ± 32	116 541 ± 5 877	66 ± 15	
15/3/2016	Media	32.5	1 073 ± 32	156 786 ± 7 889	121 ± 15	
15/3/2016	Alta	33.9	768 ± 32	138 018 ± 6 951	441 ± 15	
29/3/2016	Media	31.6	864 ± 32	na	nd	
29/3/2016	Media	32.9	1 686 ± 32	nd	457 ± 15	
Coope-Agri	8/1/2016	Baja	26.7	na	na	na
	8/1/2016	Media	31.8	na	na	na
	8/1/2016	Alta	35.5	na	na	na

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
	27/1/2016	Baja	16	544 ± 32	281 356 ± 14 118	47 ± 15
	27/1/2016	Media	25	191 ± 32	156 026 ± 7 851	21 ± 15
	27/1/2016	Alta	32	173 ± 32	279 958 ± 14 048	25 ± 15
	9/2/2016	Baja	49.1	2 461 ± 797	1 730 724 ± 86 586	16 ± 15
	9/2/2016	Media	51.1	2 472 ± 797	2 467 112 ± 123 406	30 ± 15
	9/2/2016	Alta	50.7	1 378 ± 32	42 817 468 ± 2 140 923	< 15
	18/2/2016	Baja	44.9	1 822 ± 32	175 142 ± 8 807	135 ± 15
	18/2/2016	Media	43.7	686 ± 32	82 582 ± 4 179	754 ± 15
	18/2/2016	Alta	44.1	279 ± 32	44 548 ± 2 277	36 ± 15
	23/202/2016	Baja	46.6	2 241 ± 797	2 017 603 ± 100 930	451 ± 15
	23/202/2016	Media	47	2 934 ± 797	96 641 ± 4 882	114 ± 15
	23/202/2016	Alta	46.1	1 952 ± 32	67 744 ± 3 437	65 ± 15
	2/3/2016	Baja	45	1 338 ± 32	692 422 ± 32	1 486 ± 145
	2/3/2016	Media	43.8	1 740 ± 32	1 459 655 ± 73 033	1 100 ± 145
	2/3/2016	Alta	40.3	1 107 ± 32	164 480 ± 8 284	8 711 ± 256
	8/3/2016	Baja	44	1 001 ± 32	1 441 719 ± 72 136	957 ± 15
	8/3/2016	Media	42.7	777 ± 32	226 074 ± 11 354	352 ± 15
	8/3/2016	Alta	43.2	837 ± 32	90 620 ± 4 581	381 ± 15
	16/3/2016	Baja	36.5	1 664 ± 32	152 657 ± 7 683	1 004 ± 145
	16/3/2016	Media	36.1	1 782 ± 32	110 526 ± 5 576	214 ± 15
	16/3/2016	Alta	36.6	2 091 ± 797	86 346 ± 4 367	411 ± 15
	30/3/2016	Baja	46.9	5 289 ± 797	6 788 ± 32	26 ± 15

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
	30/3/2016	Media	45.7	5 621 ± 797	6 546 ± 32	135 ± 15
	30/3/2016	Alta	47.3	3 696 ± 797	4 304 ± 32	224 ± 15
<b>Coope-Tarrazú</b>	18/1/2016	Baja	34	c	174 722 ± 8 786	< 15
	18/1/2016	Media	27	nd	1 331 490 ± 66 624	< 15
	18/1/2016	Alta	16	nd	2 703 345 ± 135 217	< 15
	11/2/2016	Baja	47.1	773 ± 32	nd	< 15
	11/2/2016	Media	46.9	302 ± 32	nd	nd
	11/2/2016	Alta	47.1	419 ± 32	nd	< 15
	24/2/2016	Baja	46.9	881 ± 32	117 874 ± 5 944	106 ± 15
	24/2/2016	Media	46	978 ± 32	83 223 ± 4 211	39 ± 15
	24/2/2016	Alta	46.9	127 ± 32	63 785 ± 3 239	90 ± 15
	3/3/2016	Baja	43	264 ± 32	31 653 ± 1 633	124 ± 15
	3/3/2016	Media	43.2	304 ± 32	22 984 ± 1 199	92 ± 15
	3/3/2016	Alta	42.2	267 ± 32	44 130 ± 2 257	134 ± 15
	11/3/2016	Baja	33.5	287 ± 32	51 967 ± 2 648	161 ± 15
	11/3/2016	Media	32.6	74 ± 32	38 871 ± 1 934	52 ± 15
	11/3/2016	Alta	34	349 ± 32	33 330 ± 1 717	78 ± 15
17/3/2016	Baja	32.8	150 ± 32	24 275 ± 1 264	55 ± 15	
17/3/2016	Media	32.7	142 ± 32	9 048 ± 502	< 15	
17/3/2016	Alta	32.7	75 ± 32	nd	59 ± 15	
<b>Café de Altura</b>	1/4/2016	Media	35	76 448 ± 1 439	12 075 317 ± 603 816	12 417 ± 256
	1/4/2016	Media	34.5	106 ± 32	nd	284 ± 15
	16/2/2016	Baja	61.5	32 398 ± 1 439	1 4 439 502 ± 722 025	206 ± 15
	16/2/2016	Media	58.5	19 137 ± 1 439	16 094 308 ± 804 765	76 ± 15

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
<b>Coope-Atenas</b>	16/2/2016	Alta	60.2	14 288 ± 1 439	10 787 308 ± 539 415	47 ± 15
	23/2/2016	Baja	57.8	5 333 ± 797	1 700 745 ± 85 087	176 ± 15
	24/2/2016	Media	59.5	11 411 ± 1 439	na	281 ± 15
	24/2/2016	Alta	59.9	5 236 ± 797	1 727 009 ± 863 555	207 ± 15
	1/3/2016	Baja	47.8	1 153 ± 32	1 832 851 ± 91 693	154 ± 15
	1/3/2016	Media	49.2	1 537 ± 32	1 990 842 ± 99 592	219 ± 15
	1/3/2016	Alta	49.8	543 ± 32	54 684 ± 2 784	84 ± 15
	9/3/2016	Baja	37.5	1 603 ± 32	148 508 ± 7 475	1 146 ± 15
	9/3/2016	Media	39.5	750 ± 32	88 973 ± 4 499	286 ± 15
	9/3/2016	Alta	36.2	676 ± 32	87 883 ± 4 444	674 ± 15
	15/3/2016	Baja	30.6	4 875 ± 797	4 304 ± 265	296 ± 15
	15/3/2016	Media	32.3	1 597 ± 32	25 029 ± 1 301	862 ± 15
	15/3/2016	Alta	33.5	1 354 ± 32	24 478 ± 1 274	811 ± 15
	30/3/2016	Baja	26.4	852 ± 32	992 ± 32	234 ± 15
	30/3/2016	Media	26.4	606 ± 32	nd	95 ± 15
	30/3/2016	Alta	26.3	105 ± 32	nd	37 ± 15
	14/1/2016	Baja	30.4	940 ± 32	212 126 ± 10 656	330 ± 15
	14/1/2016	Media	31.4	459 ± 32	95 028 ± 4 801	1 114 ± 145
	14/1/2016	Alta	34.2	271 ± 32	89 886 ± 4 544	366 ± 15
	11/2/2016	Baja	32.4	16 471 ± 1 439	84 501 ± 4 275	892 ± 15
11/2/2016	Media	47.4	7 124 ± 797	103 395 ± 5 220	1 947 ± 15	
11/2/2016	Alta	45.4	4 210 ± 797	107 368 ± 5 418	704 ± 15	
17/2/2016	Baja	44.6	2 450 ± 797	103 298 ± 5 215	617 ± 15	
17/2/2016	Media	44.8	652 ± 32	61 717 ± 3 136	335 ± 15	
17/2/2016	Alta	45.1	2 928 ± 797	98 274 ± 4 964	311 ± 15	

<b>Beneficio</b>	<b>Fecha Muestreo</b>	<b>Temperatura Ambiental</b>	<b>Temperatura promedio montículo (°C)</b>	<b>Concentración de CH<sub>4</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de CO<sub>2</sub> (mg/m<sup>2</sup>día)</b>	<b>Concentración de N<sub>2</sub>O (mg/m<sup>2</sup>día)</b>
	25/2/2016	Baja	55.4	4 939 ± 797	1 947 835 ± 97 442	2 543 ± 256
	25/2/2016	Media	56.3	5 412 ± 797	2 079 694 ± 104 035	2 778 ± 256
	25/2/2016	Alta	58.4	3 818 ± 797	600 512 ± 32	2 862 ± 256
	2/3/2016	Baja	54.1	3 390 ± 797	1 930 163 ± 96 558	430 ± 15
	2/3/2016	Media	52.6	3 597 ± 797	224 934 ± 11 297	405 ± 15
	2/3/2016	Alta	55.6	978 ± 32	171 053 ± 8 603	343 ± 15
	10/3/2016	Baja	44.2	< 32	209 372 ± 10 519	572 ± 15
	10/3/2016	Media	43.4	148 ± 32	161 286 ± 8 114	372 ± 15
	10/3/2016	Alta	43.5	133 ± 32	156 266 ± 7 863	168 ± 15
	16/3/2016	Baja	38.7	1 710 ± 32	91 054 ± 4 603	340 ± 15
	16/3/2016	Media	40.9	458 ± 32	84 561 ± 4 278	481 ± 15
	16/3/2016	Alta	39	608 ± 32	88 249 ± 4 462	408 ± 15
	31/3/2016	Baja	31.4	Nd	nd	59 ± 15
	31/3/2016	Media	33.2	77 ± 32	nd	32 ± 15
	31/3/2016	Alta	33.9	<32	nd	50± 15

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional (2016).

**Apéndice 4.** Resultados del poder calorífico de muestras de pulpa residual de café procedentes de los Beneficios seleccionados

Beneficio	Número de Muestra	Período de tiempo (días)	Poder calorífico			
			cal/g	Incertidumbre	MJ/kg	Incertidumbre
Café de altura	1	Muestra inicial	3923	± 36	16.418	± 149
	2	6	4188	± 13	17.529	± 55
El Cántaro	3	Muestra inicial	4246	± 23	17.77	± 95
	4	28	NC*	NC*	NC*	NC*
Coopro-Naranjo	5	Muestra inicial	4163	± 17	17.423	± 72
	6	29	2641	± 97	11.054	± 407
Coope Tarrazú	7	Muestra inicial	4211	± 52	15.627	± 217
	8	24	3974	± 19	16.632	± 78
Coope Atenas	9	Muestra inicial	4262	± 30	17.837	± 125
	10	Muestra inicial	4080	± 11	17.077	± 48
Río Jorco	11	13	4175	± 46	17.473	± 194
	12	Muestra inicial	2819	± 21	11.779	± 88
Santa Rosa	13	Muestra inicial	4116	± 31	17.229	± 129
	14	43	4042	± 32	16.916	± 135
Cope Agri	15	Muestra	2588	± 68	10.832	± 285

Beneficio	Número de Muestra	Período de tiempo (días)	Poder calorífico			
			cal/g	Incertidumbre	MJ/kg	Incertidumbre
Café Cristina		inicial				
	16	32	4261	± 37	17.836	± 153
	17	Muestra inicial	4124	± 12	17.26	± 49
	18	28	2024	± 448	8.473	± 1874

NC\*: no combustiona.

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados generados por el Laboratorio de Química de la Atmósfera (2016).

**Apéndice 5.** Porcentaje de carbono y nitrógeno liberado en forma de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en cada uno de los Beneficios seleccionados

Beneficio	Peso montículo (kg)	Factor de emisión			Masa contaminante CO <sub>2</sub> (kg)	Masa contaminan te CH <sub>4</sub> (kg)	Masa contami nante N <sub>2</sub> O(kg)	Masa promedi o de carbono en pulpa (kg)	Masa promedi o de nitrógen o en pulpa (kg)	% de carbono emitido en forma de CO <sub>2</sub>	% de carbono emitido en forma de CH <sub>4</sub>	%de nitróge no emitido en forma de N <sub>2</sub> O
		CH <sub>4</sub> (mg CH <sub>4</sub> /k g pulpa)	N <sub>2</sub> O (mg N <sub>2</sub> O/kg pulpa)	CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> /kg pulpa)								
Las Marías	527.31	30.1	2.3	87	45.87597	0.02	0.001	174.07	21.21	26.36	0.01	5.72E- 07
Coopro- Naranja	853.328	1905	56	54	46.079712	1.63	0.048	301.16	27.33	15.30	0.54	1.75E- 05
El Cántaro	518.63	9.6	14.3	48.2	24.997966	0.00	0.007	126.27	9.25	19.80	0.004	8.02E- 06
Café de Altura	853.33	555	18.3	415	354.13195	0.47	0.016	162.89	21.12	217.40	0.29	7.39E- 06
Coope- Atenas	519.13	893	240	158.2	82.126366	0.46	0.125	99.10	12.85	82.87	0.47	9.70E- 05
Café	513.06	571	73	97	49.76682	0.29	0.037	187.22	20.54	26.58	0.16	1.82E-

Beneficio	Peso montículo (kg)	Factor de emisión			Masa contaminante CO <sub>2</sub> (kg)	Masa contaminante CH <sub>4</sub> (kg)	Masa contaminante N <sub>2</sub> O(kg)	Masa promedio de carbono en pulpa (kg)	Masa promedio de nitrógeno en pulpa (kg)	% de carbono emitido en forma de CO <sub>2</sub>	% de carbono emitido en forma de CH <sub>4</sub>	%de nitrógeno emitido en forma de N <sub>2</sub> O
		CH <sub>4</sub> (mg CH <sub>4</sub> /kg g pulpa)	N <sub>2</sub> O (mg N <sub>2</sub> O/kg g pulpa)	CO <sub>2</sub> (g CO <sub>2</sub> /kg g pulpa)								
<b>Cristina</b>												05
<b>Coope-Tarrazú</b>	504.36	5439	894	751	378.77436	2.74	0.451	168.47	15.79	224.83	1.63	2.86E-04
<b>Río Jorco</b>	513.67	92	23.9	56	28.76552	0.05	0.012	178.09	17.50	16.15	0.03	7.01E-06
<b>Santa Rosa</b>	518.63	501	1836	33.4	17.322242	0.26	0.952	89.88	16.99	19.27	0.29	5.60E-04
<b>Coope-Agri</b>	428.49	545	526	2659	1139.35491	0.23	0.225	144.87	18.22	786.45	0.16	1.24E-04

**Apéndice 6.** Resultados obtenidos de GEI y otros contaminantes en cuatro pruebas de gasificación como sistema de tratamiento de la pulpa residual de café

Prueba	Fecha de muestreo	Descripción	Parámetro	Resultado	CO <sub>2</sub> (g/kg)	CH <sub>4</sub> (g/kg)	N <sub>2</sub> O (g/kg)
2	29/04/2016	90% Pulpa - 10% Cascarilla	Humedad (%)	27,5 ± 2,1	7 263 ± 37	0,21 ± 0,01	0,012 ± 0,001
			Velocidad (m/s)	2,0 ± 1,2			
			Caudal (Nm <sup>3</sup> /h)	250 ± 16			
			PST (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	23,7 ± 2,8			
			Temperatura (°C)	76,13 ± 0,86			
			CO (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	596 ± 231			
			CO <sub>2</sub> (%)	21,14 ± 0,43			
			O <sub>2</sub> (%)	2,46 ± 0,33			
			SO <sub>2</sub> (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	n.d.			
			NOX (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	2 702 ± 214			
			3	10/05/2016			
Velocidad (m/s)	2,0 ± 1,3						
Caudal (Nm <sup>3</sup> /h)	288 ± 18						
PST (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	22,6 ± 2,7						
Temperatura (°C)	123,13 ± 0,86						
CO (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	3 112 ± 190						
CO <sub>2</sub> (%)	22,85 ± 0,32						
O <sub>2</sub> (%)	1,61 ±						

				0,11				
			SO <sub>2</sub> (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	< 4				
			NOX (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	2 871 ±				
				221				
<b>4</b>	17/05/2016	100% pulpa	Humedad (%)	7,75 ±	6 536 ±	1,06 ±	0,21 ±	
				0,80	27	0,09	0,01	
			Velocidad (m/s)	2,1 ± 1,3				
			Caudal (Nm <sup>3</sup> /h)	275 ± 18				
			PST (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	13,9 ± 2,0				
			Temperatura (°C)	151,25 ±				
				0,86				
			CO (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	2 598 ±				
				436				
			CO <sub>2</sub> (%)	21,09 ±				
				0,69				
			O <sub>2</sub> (%)	3,23 ±				
				0,34				
			SO <sub>2</sub> (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	< 5				
			NOX (x) (mg/Nm <sup>3</sup> )	3 573 ±				
				196				

Fuente: Elaboración propia, 2016.

**Apéndice 7.** Análisis de viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión del sistema de compostaje a la gasificación de la pulpa residual de café con respecto a las condiciones encontradas en el Beneficio Icafé

<b>VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN</b>					
<b>Criterio de evaluación</b>		<b>Nombre de la Tecnología</b>			
		<b>Alternativa A</b>	<b>Clasificación/ puntaje (%)</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Clasificación/ puntaje (%)</b>
		<b>Compostaje</b>	<b>Gasificador</b>	<b>Gasificador</b>	<b>Clasificación/ puntaje (%)</b>
<b>I. Variable Técnica</b>					
<b>1. Área requerida</b>	1.1. Área de tratamiento del residuo	El área necesaria para el tratamiento del residuo es de 200 m <sup>2</sup> (Chacón 2017).	0	Para un gasificador tipo gasificador All Power Lab ®, es necesario un sitio con un área de 4 m <sup>2</sup> bajo techo (Chacón 2017).	14.29
<b>2. Capacidad de tratamiento</b>	2.1. Cantidad de material tratado por unidad de tiempo	Con respecto a la cosecha 2015-2016, en donde se produjo 1000 fanegas, se trató un 75% mediante la técnica de compostaje, es decir una cantidad de 74 166 kg de pulpa/cosecha. El período de cosecha fue de setiembre 2015 a abril 2016.	14.29	Con respecto a la cosecha 2015-2016, en donde se produjo 1000 fanegas, el 25% de la pulpa fue tratada mediante gasificación, es decir se trató una cantidad de 26 300 kg de pulpa/cosecha. El período de la cosecha fue setiembre 2015 a abril 2016.	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
<b>3. Eficiencia del proceso</b>	3.1. Personal requerido	Para un Beneficio como el Icafé es necesario 1 persona.	14.29	Se necesita 1 persona para la operación del gasificador.	14.29
	3.2. Capacitación del personal	No se requiere saber leer. Duración de la capacitación: 1 día.	0	Se requiere saber leer. Duración de la capacitación: 1 semana.	14.29
<b>4. Acondicionamiento de la materia prima</b>	4.1. Duración de tratamiento.	El compost tarda dos meses para estar en listo para la entrega.	0	El tratamiento y la generación de electricidad son diarios, con un consumo de 19 kg/h de pellets se generaron alrededor de 580 kWh/t a una potencia de 11 Kw (Icafé 2016).	14.29

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
4.2. Manteneamiento de las características deseadas	<p>Según Marquez <i>et al</i> (2008), se de controlar las siguientes características: humedad, temperatura, relación C/N, pH, aireación y tamaño de la partícula.</p> <p>Se debe mantener la humedad en un rango 15 al 35 %, incluso del 40 al 60 %. Humedades superiores producirían anaerobiosis; pero una humedad menor al 10%, reducirá la actividad biológica y el proceso se haría extremadamente lento (Uicab y Sandoval 2003).</p>	0	<p>Mantener la humedad de la pulpa de café por debajo del 30%, pues la humedad de la biomasa es determinante en términos de brindar estabilidad al sistema, mas no así en la composición o calidad del syngas producido, para este sistema de lecho descendente. (Torres et al 2016). Además debe ser controlado el tamaño del pellet, ya que se pueden romper con facilidad y constituir un residuo que cause problemas en el funcionamiento del equipo.</p>	14.29	

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
				El equipo posee un controlador automático, que tiene parámetros de fábrica que permiten su funcionamiento autónomo, solo es necesario la supervisión.	
<b>Sumatoria</b>			<b>28.57</b>		<b>71.43</b>
II. Variable Ambiental					
Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
<b>1. Consumo de agua para el pretratamiento</b>	1.1. m <sup>3</sup> /mes consumidos	No requiere consumo de agua.	14.29	No requiere consumo de agua.	14.29

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
tratamiento de la pulpa residual de café					
<b>2. Reducción de las emisiones de GEI</b>	2.1. g CH <sub>4</sub> /fanega procesada	Con base a los resultados obtenidos para el Beneficio Icafé, en el cual se aplica la técnica del volteo, la emisión de metano corresponde a <0,01 g CH <sub>4</sub> /fanega proceda.	14.29	Con respecto a las tres mediciones realizadas en el Icafé, se obtiene los siguientes datos de generación de metano: Utilizando 90% pulpa y 10% cascarilla: 22,09 g CH <sub>4</sub> /fanega. Utilizando 100% pulpa: 21,04 g CH <sub>4</sub> /fanega y 111,512 g CH <sub>4</sub> /fanega.	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
2.2. g N <sub>2</sub> O/fanega procesada	Con base a los resultados obtenidos para el Beneficio Icafé, en el cual se aplica la técnica del volteo, la emisión de óxido nitroso corresponde a <0,01 g N <sub>2</sub> O/fanega proceda.	14.29	Con respecto a las tres mediciones realizadas en el Icafé, se obtiene los siguientes datos de generación de óxido nitroso: Utilizando 90% pulpa y 10% cascarilla: 1,26 g N <sub>2</sub> O/fanega. Utilizando 100% pulpa: 4,52 g N <sub>2</sub> O /fanega y 22,09 g N <sub>2</sub> O /fanega.	0
2.3. Kg CO <sub>2</sub> /fanega procesada	Con base a los resultados obtenidos para el Beneficio Icafé, en el cual se aplica la técnica del volteo, la emisión de dióxido de carbono corresponde a 8,4 kg CO <sub>2</sub> /fanega proceda.	14.29	Con respecto a las tres mediciones realizadas en el Icafé, se obtiene los siguientes datos de generación de dióxido de carbono: Utilizando 90% pulpa y 10% cascarilla: 764,07 kg CO <sub>2</sub> /fanega. Utilizando 100% pulpa: 596, 17 kg CO <sub>2</sub> /fanega y 687,59 kg CO <sub>2</sub> /fanega.	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
2.4. Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente por unidad de tiempo	<p>Las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente para 722 fanegas procesadas (dato de fanegas para la cosecha 2016 del Icafé) corresponden por contaminante a:</p> <p>-6,06 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente correspondiente al dióxido de carbono.</p> <p>- &lt; 0,0000031 equivalente correspondiente al metano.</p>	14.29	<p>Las toneladas calculadas corresponden a las generadas en el gasificador los días de muestreo, por lo que las emisiones se declaran en función de las condiciones de muestreo. A continuación se detallan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizando 17,10 kg/h de pellets de broza de café durante 7,09 horas se genera 0,0010 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.</li> <li>- Utilizando 27,30 kg/h de pellets de broza de café durante 3,04 horas se genera 0,002 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.</li> </ul>	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
		- < 0,0000021 equivalente correspondiente al óxido nitroso.		- Utilizando 20,74 kg/h de pellets de broza de café durante 8,15 horas se genera 0,015 toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente.  Sabido que las emisiones procedentes del contaminante dióxido de carbono deben ser cuantificadas y no incluidas en las emisiones, pues según la ISO 14064-1:2006 esta deben ser cuantificadas por separado (ver alcance en <a href="http://www.eca.cr">www.eca.cr</a> ).	
<b>3. Generación de sub-residuos del proceso</b>	3.1. Cantidad de residuo generado del tratamiento	No se genera ningún residuo, todo el material es aprovechado para el tratamiento.	14.29	Según el estudio realizado por Torres et al (2016), se generan cuadro residuos de proceso de gasificación:  1. Cenizas, en el ciclón. Estas pueden ser utilizadas como fertilizante.	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			<p>2. Carbón, en el lecho del reactor. El cual también puede ser utilizado como fertilizante.</p> <p>3. Ceniza bituminosa, las cuales se forman cuando las cenizas del ciclón son arrastradas hasta el enfriador y se mezclan con los alquitranes. El tratamiento sugerido es por medio de incineración para convertirlas en carbón mineral.</p> <p>4. Alquitrán, es un producto líquido. Este es utilizado como asfalto.</p>	
<b>Sumatoria</b>		<b>85.71</b>		<b>14.29</b>

### III. Variable Económica

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
<b>1. Costos por inversión de adquisición de la tecnología</b>	1.1. Acondicionamiento del sitio de tratamiento	Para un terreno de 200 m <sup>2</sup> la inversión en la edificación sería de 80 749 200 CRC.	0	Para un terreno de 4 m <sup>2</sup> la inversión en la edificación sería de 1 614 984 CRC.	8.33
	1.2. Costo de traslado de la pulpa al sitio de tratamiento final	El vehículo que realiza el transporte de la broza al sitio de composteo es un camión rígido de 2 ejes con una capacidad de 3,5-7,5 t con un consumo de combustible de 0,06 L/(km t). La distancia que debe recorrer es 5 km. Sin embargo, los costos son nulos, pues es un servicio gratuito para el Icafé.	8.33	Al incluir una peletizadora en el proceso, el costo de transporte y tratamiento de la broza pelletizada sería nulo (Urvina y Torres 2017).	8.33

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
1.3. Costo de implementos o maquinaria requerida	<p>El costo asociado a implementos necesarios para realizar el compostaje es el siguiente:</p> <p>1. Pala: 17 040 (CRC).</p>	8.33	<p>§ Costo asociados al gasificador (Urvina y Torres 2017):</p> <p>1. <u>Costos del gasificador</u>: 17 322 250,00(CRC).</p> <p>2. <u>Envío, embalaje y carga</u>: 192 500,00 (CRC).</p> <p>3. <u>Traslado avión</u>: 2 174 700,00(CRC).</p> <p>4. <u>Inversión en equipos</u>: 43 114 903,33 (CRC).</p> <p>Para un subtotal de <b>62 804 353,33 (CRC)</b>.</p> <p>§ Costos de la prensa (Urvina y Torres 2017):</p> <p>1. <u>Equipo</u>: 16 445 000,00(CRC).</p>	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			2. <u>Instalación de equipos</u> : 1 265 000,00 (CRC). 3. <u>Instalación de servicios</u> : 1 686 666,67 (CRC). 4. <u>Gastos legales</u> : 421 666,67(CRC). 5. <u>Gastos bancarios</u> : 210 833,33 (CRC). 6. <u>Contingencia</u> : 1 054 166,67 (CRC). Para un subtotal de <b>21 083 333, 33 (CRC)</b> .  § Costos de la peletizadora (Urvina y Torres 2017): <u>Equipo</u> : 1 716 000,00 (CRC). Comisión bancaria: 25.300,00 (CRC). <u>Manejo-flete</u> : 217 800,00 (CRC)	

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
				<p><u>Impuestos, almacenaje, etc.:</u> 383 020,00 (CRC).</p> <p>Para un subtotal de <b>2 342 120 (CRC)</b>.</p> <p>Para un total de <b>86 229 806,7 (CRC)</b>.</p>	
1.4. Costo de modificaciones técnicas para óptimo funcionamiento	No hay costos asociados a modificaciones técnicas.	8.33	<p>Costo de adaptaciones del equipo:</p> <p>1. Filtro:</p> <p>2. Relleno del filtro (cantidad establecida para 3 corridas de 8 horas) (Urvina y Torres 2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 kg de madera gruesa: 100 (CRC).</li> <li>- 4 kg de madera media: 100</li> </ul>	0	

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
				(CRC). - 3 kg de madera fina: 75 (CRC). - 11 kg de carbón: 3 150 (CRC). - 1 kg de calcetas de polipropileno: 11 659,44 (CRC). - 4 kg de polipropileno: 4 123, 08 (CRC). - 0,4 kg de mecha mecánico: 400 (CRC). 3. Enfriador: 1 152 000 (CRC). Para un total de <b>1 171 607, 52 (CRC)</b> .	
2. Costos por consumo energético	2.1. Cantidad de kW mensuales	No hay costos directos por consumo energético.	8.33	No hay costos directos por consumo energético.	8.33

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
	consumidos o ahorrados por la tecnología				
<b>3. Costos de mantenimiento</b>	3.1. Costos asociados al personal	El salario mínimo para trabajador agrícola es de 304 484 (CRC) (MTSS 2017).	8.33	El salario mínimo para trabajador agrícola es de 304 484 (CRC) (MTSS 2017).  Es importante destacar que, según Urvina y Torres (2017), no se espera que exista un aumento importante de la mano obra necesaria para su operación conforme aumenta la capacidad de la misma.	8.33
	3.2. Costos de capacitación	No hay costos económicos asociados.	8.33	El Icafé cuenta con personal que puede capacitar a la persona encargada del gasificador, por lo tanto, no implica un gasto adicional.	8.33

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
3.3. Costos en mantenimiento y limpieza		8.33	Para la limpieza y el mantenimiento del equipo es necesario lo siguiente (Urvina y Torres 2017): Pasta de grafito 7 700,00 (CRC/unidad). Cambio de aceite del motor: 20 000,00 (CRC/unidad). Filtro de aceite del motor 17.000,00 (CRC/unidad). Según Urvina y Torres (2017), ara una corrida de 8 horas este necesita una unidad de cada uno de estos materiales.	0

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			<p>Otro punto a considerar en el mantenimiento y limpieza es que el caso de utilizar prensa se debe dar un tratamiento al jugo. Para estimar un costo del tratamiento del jugo presado en CRC/m<sup>3</sup> se utilizó un valor de 0,4 m<sup>3</sup>/fanega de producción de jugo. Por lo tanto, para el tratamiento de desechos líquidos por medio de un reactor anaerobio tiene un valor representativo un costo de 154,25 CRC/fanega (Urvina y Torres 2017).</p>	

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
		Compostaje		Gasificador	
<b>4. Beneficios económicos</b>	4.1. Beneficios económicos de la implementación de la tecnología.	No genera Beneficios económicos, pues el abono es regalado.	0	Los ingresos por venta de pellets se darán únicamente en aquellos escenarios donde haya una peletizadora y queden pellets luego de la gasificación y el reemplazo leña. El precio de venta se tomará como <b>24,40 CRC/kg</b> , este valor se basa una equivalencia 1:1 del poder calórico que se obtendría por kg de leña que es reemplazado por pellets (Urvina y Torres 2017).	8.33

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			<p>Con la implementación de las diferentes tecnologías que se proponen para el tratamiento de la broza, resulta una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto al proceso actual que podría llegar a capitalizarse, en forma de certificados de carbono. El valor de estos certificados dependerá de donde se coticen, por ejemplo (International Green-e Climate, CarbonFix Standard, SOCIALCARBON standard, London Stock Exchange, entre otros) y debe considerarse que los bonos planteados se basan en carbono no emitido en lugar de carbono capturado. De forma conservadora se tomó un valor</p>	

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			de 3 USD/tCO <sub>2e</sub> para la venta de dichos certificados (Urvina y Torres 2017).	

## VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación/ puntaje (%)	Alternativa B	Clasificación/ puntaje (%)
	Compostaje		Gasificador	
			De la gasificación se generan residuos de cenizas ricas en minerales y de biochar rico en carbono. El precio establecido de venta es de <b>100 CRC/kg</b> para las cenizas y de <b>250 CRC/kg</b> para el biochar, esto basado en el precio de venta a nivel nacional del carbón pulverizado y granulado para uso en agricultura hidropónica (Urvina y Torres 2017). Se establece un ahorro de 24,27 CRC/kg de pellets utilizados como reemplazo de leña (Urvina y Torres 2017).	
<b>Sumatoria</b>		<b>58.31</b>		<b>49.98</b>

## 12. Anexos

**Anexo 1.** Matriz utilizada para la terminación de la viabilidad técnica, ambiental y económica de la conversión de la tecnología de compostaje al gasificador

<b>VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN</b>					
<b>Criterio de evaluación</b>		<b>Nombre de la Tecnología</b>			
		<b>Alternativa A</b>	<b>Clasificación (%)</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Clasificación (%)</b>
		<b>Compostaje</b>		<b>Gasificador</b>	
<b>I. Variable Técnica</b>					
<b>1. Área requerida</b>	1.1. Área de tratamiento del residuo				
<b>2. Capacidad de tratamiento</b>	2.1. Cantidad de material tratado por unidad de tiempo				
<b>3. Eficiencia del proceso</b>	3.1. Personal requerido				
	3.2. Capacitación				

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación (%)	Alternativa B	Clasificación (%)
		Compostaje		Gasificador	
	del personal				
<b>4. Acondicionamiento de la materia prima</b>	4.1. Duración de tratamiento.				
	4.3. Manteamiento de las características deseadas				
<b>Sumatoria</b>					
<b>II. Variable Ambiental</b>					
Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación	Alternativa B	Clasificación
		Compostaje		Gasificador	

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación (%)	Alternativa B	Clasificación (%)
		Compostaje		Gasificador	
<b>3. Consumo de agua para el pretratamiento tratamiento de la pulpa residual de café</b>	3.1. m <sup>3</sup> /mes consumidos				
<b>5. Reducción de las emisiones de GEI</b>	5.1. g CH <sub>4</sub> /fanega procesada				
	5.2. g N <sub>2</sub> O/fanega procesada				
	5.3. Kg CO <sub>2</sub> /fanega procesada				
	5.4. Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente por unidad de tiempo				

<b>VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN</b>					
<b>Criterio de evaluación</b>		<b>Nombre de la Tecnología</b>			
		<b>Alternativa A</b>	<b>Clasificación (%)</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Clasificación (%)</b>
		<b>Compostaje</b>		<b>Gasificador</b>	
<b>6. Generación de sub-residuos del proceso</b>	6.1. Cantidad de residuo generado del tratamiento			☐	
<b>Sumatoria</b>					
<b>III. Variable Económica</b>					
<b>Criterio de evaluación</b>		<b>Nombre de la Tecnología</b>			
		<b>Alternativa A</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Alternativa B</b>	<b>Clasificación</b>
		<b>Compostaje</b>		<b>Gasificador</b>	
<b>1. Costos por inversión de adquisición de la tecnología</b>	1.1. Acondicionamiento del sitio de tratamiento				

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación	Alternativa B	Clasificación
	Compostaje	(%)	Gasificador	(%)
1.2. Costo de traslado de la pulpa al sitio de tratamiento final				
1.3. Costo de implementos o maquinaria requerida				

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación	Nombre de la Tecnología			
	Alternativa A	Clasificación	Alternativa B	Clasificación
	Compostaje	(%)	Gasificador	(%)
1.4. Costo de modificaciones técnicas para óptimo funcionamiento				

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación (%)	Alternativa B	Clasificación (%)
		Compostaje		Gasificador	
2. Costos por consumo energético	2.1. Cantidad de kW mensuales consumidos o ahorrados por la tecnología				
	3.1. Costos asociados al personal				
3. Costos de mantenimiento	3.2. Costos de capacitación				
	3.3. Costos en mantenimiento y				

**VIABILIDAD DE LA CONVERSIÓN DEL SISTEMA DE COMPOSTAJE A LA TECNOLOGÍA GASIFICACIÓN**

Criterio de evaluación		Nombre de la Tecnología			
		Alternativa A	Clasificación (%)	Alternativa B	Clasificación (%)
		Compostaje		Gasificador	
	limpieza				
<b>5. Beneficios económicos</b>	5.1. Beneficios económicos de la implementación de la tecnología.				
<b>Sumatoria</b>					

**Anexo 2.** Encuesta aplicada a los Beneficios



**Encuesta para la determinación de la línea base de impactos ambientales generados por las emisiones de gases efecto invernadero del tratamiento actual de la pulpa residual de café en Costa Rica**



Fecha de aplicación de la encuesta:	Nombre del Beneficio:
Tipo de tecnología:	Período de cosecha:
Fanegas procesadas año pasado:	Fanegas esperadas:
1. ¿Los residuos son tratados en el Beneficio? <input type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> NA En el caso de no ser tratado en el Beneficio, ¿quién los trata?: _____.	
2. El sitio de disposición de los residuos se encuentra: <input type="checkbox"/> Bajo techo <input type="checkbox"/> Al aire libre <input type="checkbox"/> NA Descripción del sitio:  _____	

---

Medidas del sitio de disposición: \_\_\_\_\_.

3. Tipo de sistema de compost

- Sistemas abiertos
- Sistemas cerrados
- NA

En el caso de ser sistema abierto ir a la **pregunta 4**, si no, ir a la **pregunta 6**.

4. El sistema abierto se clasifica en:

- Pilas dinámicas ventiladas (la aireación se realiza mediante volteo mecánico con palas excavadoras)
- Pilas estáticas ventiladas (la aireación se realiza mediante el paso del aire mediante una bomba y una red de tuberías)
- NA

En el caso de utilizar pilas dinámicas ventiladas ir a la **pregunta 5**, si no, saltar a la **pregunta 6**.

5. ¿Se realiza volteo del compost?

- Sí
- No

En el caso de realizar volteo ir a la **pregunta 6**, si no, saltar a la **pregunta 7**.

6. ¿Cuántas veces realiza en volteo?

- 1 vez a la semana
- 1 vez al mes
- 1 vez cada dos meses
- Otro. Especifique: \_\_\_\_\_.

7. ¿Cuáles son los residuos que se tratan mediante compost?

- Pulpa
- Pulpa y cascarilla
- Pulpa, cascarilla y mucílago
- Pulpa, cascarilla, mucílago y leña
- Otro (especificar): \_\_\_\_\_.

8. ¿Cuál es el proceso de compost empleado?

---

---

---

---

9. ¿Es aplicada alguna sustancia al sustrato para acelerar el proceso de descomposición?

- Sí
- No

En caso de ser positiva la respuesta, ¿cuáles? (indicar nombre específico y proporciones): \_\_\_\_\_

---

10. ¿Cuál es el uso final del compost?

- Abono
- Es desechado
- Es almacenado

11. Kilogramos de pulpa esperados para esta cosecha: \_\_\_\_\_

12. Características controladas en el compost:

- pH
- Temperatura
- Cantidad de microorganismos
- Aireación
- Humedad
- Relación carbono/nitrógeno
- Ninguna

Otras: \_\_\_\_\_

13. Deficiencias detectadas con la utilización del compost como tratamiento del residuo

- Se requiere una gran espacio para su disposición
- Gran cantidad de residuos sólidos generados
- Requiere mantenimiento constantemente

Otras: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

14. El Beneficio cuenta con los siguientes certificaciones:

- ISO 9000
-

ISO 14000

Rain Forest Alliance

UTZ (producción sostenible de café)

Mercado Justo

Café Practices Starbucks

No cuenta con ningún sistema de gestión

Otras: \_\_\_\_\_

15. ¿Cuenta el Beneficio con un plan de manejo de residuos sólidos?

Sí

No

Observaciones:

---

---

---

---