



Institución Universitaria

# **Evaluación de la prefactibilidad de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos en tres escenarios poblacionales de Colombia**

Santiago Alzate Arias

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de ingeniería

Medellín, Colombia

2017



# **Evaluación de la prefactibilidad de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos en tres escenarios poblacionales de Colombia**

Santiago Alzate Arias

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
Magister en Gestión Energética Industrial

Director (a):

Ing. Bonie Johana Restrepo Cuestas, MSc

Codirector (a):

Ing. Alvaro Jaramillo Duque, PhD

Línea de Investigación:

Eficiencia energética

Grupo de Investigación:

Materiales Avanzados y Energía (MATyER)

Instituto Tecnológico Metropolitano

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2017

## Agradecimientos

*A quienes desde sus ideas, aportes y recomendaciones han contribuido al desenlace de cada uno de los objetivos del presente trabajo: profesores MATyER, compañeros de clases, amigos y familiares.*

## Resumen

Con esta investigación se evaluó la prefactibilidad técnico-económica de generación de energía eléctrica basada en el uso de residuos sólidos urbanos, con diferentes tecnologías de conversión. Se consideraron como casos de estudio los municipios colombianos Guayatá, Andes y Pasto, pertenecientes a los departamentos de Boyacá, Antioquia y Nariño respectivamente. Estas poblaciones representan centros urbanos típicos en Colombia. Se seleccionaron las tecnologías de incineración y gasificación de residuos, como tecnologías de conversión térmica. La digestión anaerobia y el gas de relleno, fueron seleccionadas como tecnologías de conversión biológica. Según los resultados obtenidos, para un mes típico del 2020 es posible obtener 5'707.800 kWh/mes, y 296.700 kWh/mes desde incineración, gasificación y digestión anaerobia para Pasto y Andes. Energía eléctrica suficiente para cubrir la demanda promedio de 37.551 y 1.952 hogares habitados por 4 personas. Para el municipio de Guayatá se pueden obtener 4.200 kWh/mes a partir de digestión anaerobia. Energía que podría abastecer al menos unos 28 hogares de 4 personas. Desde gas de relleno sanitario es posible obtener para un mes típico de 2031: 618.960 kWh/mes y 48.150 kWh/mes, que podrían abastecer 4.072 y 317 hogares de Pasto y Andes, habitados por igual número de personas. Para el análisis de prefactibilidad, se utilizaron herramientas como flujos de caja, TIR y VPN. Adicionalmente se consideró la ley 1715 que promueve el uso de fuentes no convencionales de energía. El análisis determinó que para Pasto, municipio con mayor población, todas las tecnologías podrían aplicarse. Para Andes, de mediana población, solo son viables las tecnologías de conversión biológica bajo condiciones como ventas de energía a un precio alto y algunos beneficios ofrecidos por la ley 1715. Para Guayatá, de menor población, solo es viable la codigestión anaerobia a pequeña escala.

**Palabras clave:** escenarios poblacionales, conversión biológica, conversión térmica, poder calorífico inferior, residuos sólidos urbanos, biogás, tasa interna de retorno.

## Abstract

This research evaluated the technical-economic pre-feasibility of electric power generation based on the use of urban solid waste, with different conversion technologies. The Colombian municipalities Guayatá, Andes and Pasto, belong to the departments of Boyacá, Antioquia and Nariño, respectively, were considered as case studies. These municipalities represent typical urban centers in Colombia. To convert urban solid waste into energy, thermal and biological conversion technologies were analyzed. Incineration and gasification were selected as thermal conversion technologies. Anaerobic digestion and landfill gas were selected as biological conversion technologies. According to the results obtained, for a typical month of 2020 it is possible to obtain 5'707.800 kWh / month, and 296.700 kWh / month from incineration, gasification and anaerobic digestion for Pasto and Andes. Electric power sufficient to cover the average demand of 37.551 and 1.952 households inhabited by 4 people. For the municipality of Guayatá, 4.200 kWh / month can be obtained from anaerobic digestion. Energy that could supply at least 28 households of 4 people. From landfill gas it is possible to obtain a typical month of 2031: 618.960 kWh / month and 48.150 kWh / month, which could supply 4.072 and 317 households in Pasto and Andes, with the same number of inhabitants. A prefeasibility analysis was performed, using tools such as cash flows, TIR and VPN; additionally it was considered Colombian law 1715, this law promotes the use of unconventional sources of energy. The analyses done for Pasto (municipality with the largest population) showed that it is possible to implement all the conversion technologies. In the case of Andes (median population), only biological conversion technologies are feasible under special conditions, such as high energy prices and some profits offered by law 1715. For Guayatá (smaller population), only small scale anaerobic codigestion is viable.

**Keywords:** population scenarios, biological conversion, thermal conversion, lower heating value, municipal solid waste, biogas, internal rate of return

# Contenido

|  | Pág.        |
|--|-------------|
| <b>Resumen .....</b>   | <b>V</b>    |
| <b>Lista de figuras .....</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>Lista de tablas .....</b>   | <b>X</b>    |
| <b>Glosario de términos.....</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>1. Introducción .....</b>   | <b>15</b>   |
| 1.1 Descripción de problema .....  | 20          |
| 1.2 Objetivos.....   | 22          |
| <b>2. Marco teórico.....</b>   | <b>23</b>   |
| 2.1 Tecnologías de conversión de RSU a energía .....                                       | 23          |
| 2.1.1 Incineración.....  | 23          |
| 2.1.2 Pirólisis .....  | 25          |
| 2.1.3 Gasificación .....   | 27          |
| 2.1.4 Digestión anaerobia .....  | 28          |
| 2.1.5 Generación vía relleno sanitario (Digestión aeróbica) .....                          | 30          |
| 2.2 Poder Calorífico Inferior (PCI).....   | 30          |
| 2.3 Modelos matemáticos para el cálculo del poder de aprovechamiento energético (PAE)..... | 33          |
| 2.3.1 Incineración.....  | 33          |
| 2.3.2 Digestión anaerobia .....  | 34          |
| 2.3.3 Gas de relleno sanitario (Digestión aeróbica).....                                   | 35          |
| 2.4 Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías .....                             | 36          |
| 2.5 Costo unitario de la electricidad .....  | 38          |
| 2.6 Beneficios de la ley 1715 .....  | 39          |
| 2.6.1 Impuesto sobre la renta (Artículo 11) .....  | 39          |
| 2.6.2 Exclusión de IVA (Artículo 12).....  | 39          |
| 2.6.3 Exención de aranceles (Artículo 13).....   | 40          |
| 2.6.4 Depreciación acelerada de activos (Artículo 14).....                                 | 40          |
| <b>3. Metodología .....</b>  | <b>41</b>   |
| <b>4. Resultados.....</b>  | <b>48</b>   |
| 4.1 Selección de escenarios poblacionales .....  | 48          |
| 4.1.1 Escenario 1 .....  | 48          |
| 4.1.2 Escenario 2 .....  | 50          |
| 4.1.3 Escenario 3.....   | 52          |
| 4.2 Características de los escenarios poblacionales.....                                   | 53          |
| 4.2.1 Municipio de Guayatá.....  | 53          |
| 4.2.2 Municipio de Andes .....   | 54          |
| 4.2.3 Municipio de Pasto .....   | 55          |
| 4.3 Selección de las tecnologías de conversión de residuos sólidos a energía....           | 57          |
| 4.3.1 Tecnologías de conversión térmica .....  | 57          |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.3.2     | Tecnologías de conversión biológica .....                               | 58         |
| 4.4       | Estimación del potencial de aprovechamiento energético .....            | 59         |
| 4.4.1     | Incineración .....  | 59         |
| 4.4.2     | Gasificación .....  | 61         |
| 4.4.3     | Digestión anaerobia.....  | 62         |
| 4.4.4     | Gas de relleno sanitario (digestión aerobia).....                       | 64         |
| 4.5       | Análisis económico.....   | 66         |
| 4.5.1     | Municipio de Pasto .....  | 70         |
| 4.5.2     | Municipio de Andes .....  | 72         |
| 4.5.3     | Municipio de Guayatá .....  | 73         |
| 4.5.4     | Periodo de recuperación de la inversión o payback .....                 | 74         |
| 4.5.5     | Gasificación como caso especial para los tres escenarios.....           | 75         |
| 4.6       | Costo unitario de la electricidad.....                                  | 75         |
| 4.7       | Análisis de Prefactibilidad.....  | 77         |
| <b>5.</b> | <b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>                             | <b>80</b>  |
| 5.1       | Conclusiones.....   | 80         |
| 5.2       | Recomendaciones.....  | 83         |
| <b>A.</b> | <b>Anexo: Municipios pertenecientes a los grupos G1, G2, G3 .....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>B.</b> | <b>Anexo: Flujos de caja de los diferentes escenarios (Caso 4).....</b> | <b>114</b> |
| <b>C.</b> | <b>Anexo: Modelo CAPM ajustado .....</b>                                | <b>118</b> |
|           | <b>Bibliografía .....</b>   | <b>120</b> |



## Lista de figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1-1: Distribución de municipios por tipo de sistema de disposición final Autor .....                                      | 17          |
| Figura 1-2: Distribución por número de municipios atendidos y por T/día de residuos dispuestos en sistema regionales Autor ..... | 18          |
| Figura 2-1: Proceso básico y salidas de la gasificación (Consonni and Viganò 2012) .....   | 28          |
| Figura 2-2: Composición de RSU en países de Latinoamérica (Leckner 2015). .....  | 32          |
| Figura 3-1: Secuencia metodológica objetivo 1 Autor .....  | 42          |
| Figura 3-2: Secuencia metodológica objetivo 2 Autor .....  | 43          |
| Figura 3-3: Secuencia metodológica objetivo 3 Autor .....  | 47          |
| Figura 4-1: Histograma para las poblaciones del G1 Autor.....  | 49          |
| Figura 4-2: IPU para los municipios pertenecientes al G1 Autor.....  | 50          |
| Figura 4-3: Histograma para las poblaciones del G2 Autor.....  | 51          |
| Figura 4-4: IPU para los municipios pertenecientes al G2 Autor.....  | 51          |
| Figura 4-5: Histograma para las poblaciones del G3 Autor.....  | 52          |
| Figura 4-6: IPU para los municipios pertenecientes al G3 Autor.....  | 53          |
| Figura 4-7: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor .....   | 54          |
| Figura 4-8: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor .....   | 55          |
| Figura 4-9: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor .....   | 56          |
| Figura 4-10: Producción de energía eléctrica a partir de incineración 2015-2020 Autor ..   | 60          |
| Figura 4-11: Producción de energía eléctrica a partir de digestión anaerobia 2015-2020 Autor .....                               | 63          |
| Figura 4-12: Producción de metano y energía eléctrica a partir de gas de relleno sanitario 2016-2020 Autor.....                  | 65          |
| Figura 4-13: Flujo de caja para digestión anaerobia en el municipio de Pasto Autor .....   | 71          |
| Figura 4-14: Tasa interna de retorno obtenida para los 4 casos en Pasto Autor.....   | 72          |
| Figura 4-15: Tasa interna de retorno obtenida para los 4 casos en Andes Autor.....   | 73          |
| Figura 4-16: Periodo de recuperación de la inversión para los 4 casos en Pasto Autor ...   | 74          |
| Figura 4-17: Periodo de recuperación de la inversión para los 4 casos en Andes Autor ..  | 75          |
| Figura 4-18: Costo unitario para las diferentes tecnologías en municipio de Pasto Autor  | 76          |
| Figura 4-19: Costo unitario para las diferentes tecnologías en municipio de Andes Autor .....                                    | 77          |

## Lista de tablas

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Tabla 1-1:</b> Sitios de disposición final utilizados en Colombia Autor .....   | 17          |
| <b>Tabla 1-2:</b> Comportamiento de los rellenos sanitarios periodo 2010-2014 Autor .....  | 18          |
| <b>Tabla 2-1:</b> Parámetros de funcionamiento para los tres tipos de pirólisis (Kalyani and Pandey 2014).....                         | 26          |
| <b>Tabla 2-2:</b> Composiciones de los gases de pirólisis (Kalyani and Pandey 2014). .....   | 26          |
| <b>Tabla 2-3:</b> Comparación entre gases de biogás desde relleno sanitario y biodigestor (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). ..... | 30          |
| <b>Tabla 2-4:</b> PCI de diferentes tipos de residuos en diferentes países.....  | 33          |
| <b>Tabla 2-5:</b> Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías (Kalyani and Pandey 2014) .....                                 | 36          |
| <b>Tabla 3-1:</b> Costos de inversión para las diferentes tecnologías Autor.....   | 44          |
| <b>Tabla 3-2:</b> Costos de operación y mantenimiento para diferentes tecnologías Autor .....  | 45          |
| <b>Tabla 4-1:</b> Poder calorífico inferior y fracción másica de residuos en los tres escenarios Autor .....                           | 57          |
| <b>Tabla 4-2:</b> Producción de residuos PP en los tres escenarios Autor .....   | 57          |
| <b>Tabla 4-3:</b> Potencia instalada aproximada a partir de gasificación Autor .....   | 62          |
| <b>Tabla 4-4:</b> Parámetros para la evaluación del modelo de digestión anaerobia Autor .....  | 62          |
| <b>Tabla 4-5:</b> Resumen de casos considerados para los flujos de caja Autor .....  | 67          |
| <b>Tabla 4-6:</b> Parámetros de análisis económico para la incineración Autor .....  | 69          |
| <b>Tabla 4-7:</b> Parámetros de análisis económico para gas de relleno sanitario Autor .....   | 69          |
| <b>Tabla 4-8:</b> Parámetros de análisis económico para digestión anaerobia Autor .....  | 70          |

| Abreviaturas | Término  |
|--------------|--|
| RSU          | Residuos Sólidos Urbanos                             |
| PCI          | Poder Calorífico Inferior                            |
| FORS         | Fracción Orgánica de Residuos Sólidos                |
| FNCER        | Fuentes No Convencionales de Energía Renovable       |
| PGRS         | Plan de Gestión de Residuos Sólidos                  |
| DANE         | Departamento Nacional de Estadística                 |
| EVM          | Empresas Varias de Medellín                          |
| DIAN         | Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales          |
| SSPD         | Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios |
| DNP          | Departamento nacional de planeación                  |
| Hab          | Habitante  |
| T            | Tonelada   |
| T/día        | Toneladas diarias                                    |
| PP           | Producción Percápita                                 |
| USD/T        | Dólares por cada tonelada                            |
| USD/MW       | Dólares por Megavatio instalado                      |
| I(USD)       | Inversión en dólares                                 |
| MUSD         | Millones de dólares                                  |
| MJ           | Mega Julios  |
| TJ           | Tera Julios  |
| IPU          | Índice de Porcentaje Urbano                          |
| PAE          | Potencial de Aprovechamiento Energético              |
| DA           | Digestión Anaerobia                                  |
| GEI          | Gas de Efecto Invernadero                            |

| Abreviaturas | Término                            |
|--------------|------------------------------------|
| CER          | Certificado Reducción de Emisiones |
| TIR          | Tasa interna de Retorno            |
| VPN          | Valor Presente Neto                |

---

## Glosario de términos

**Biogás:** el Biogás es el resultado de la interacción entre microorganismos, principalmente bacterias metanogénicas que crecen o prosperan en la ausencia de oxígeno ( $O_2$ ), mediante la descomposición o biodegradación de la materia orgánica en un ambiente anaeróbico. Es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano, con una proporción que oscila entre un 50% y un 70%, y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), contiene pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno ( $H_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). Tiene como promedio un poder calorífico entre 18,8 y 23,4 ( $MJ/m^3$ ). Cuando el Biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable. Otros tipos de componentes del Biogás son los gases azufrados tales como sulfuro de hidrógeno, metilmercaptano, disulfuro de carbono, sulfuro de metilo y sulfuro de dimetilo (Rodríguez Perdigón 2014).

**Gas de síntesis:** gas de bajo poder calorífico convertible a diferentes tipos de energía. Entre las principales se encuentra la conversión a en energía eléctrica o mecánica. Se compone típicamente de hidrógeno, vapor de agua, metano, dióxido de carbono y monóxido de carbono. No está demás considerar la existencia de óxidos de nitrógeno y azufre (Gutierrez 2009).

**Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU):** la fracción orgánica de la mayoría de los RSU, hace referencia a los elementos de características orgánicas que pueden iniciar un proceso de degradación biológica por cuenta de las condiciones naturales de un ambiente: luz solar, aire, agua, microorganismos, entre otros; como lo menciona (Rodríguez Perdigón 2014).

**IPU:** resultado del cociente entre cantidad de habitantes zona rural y zona urbana en un determinado municipio.

**Municipio:** en Colombia se define como entidad territorial fundamental de la división política administrativa del estado, con autonomía política, fiscal y administrativa, dentro de los límites que señalen la Constitución y la ley y cuya finalidad es el bienestar general y el mejoramiento de la calidad de vida de la población en su respectivo territorio (Fernandez de Castro del Castillo 2005).

**Relleno sanitario:** es una estructura de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos en el suelo, los cuales se depositan, esparcen y compactan al menor volumen práctico posible, construyendo capas delgadas, compactándolas al menor volumen posible y cubriéndolas con tierra al término de cada día de trabajo (Rodríguez Perdigón 2014).

**Residuos sólidos:** son aquellas sustancias u objetos abandonados o descartados en forma permanente por quien los produce, por considerarlos sin utilidad en su provecho, en tanto, pueden definirse como los desechos que son generados en la población urbana provenientes de los procesos de consumo y desarrollo de las actividades humanas y que normalmente son sólidos a temperatura ambiente. Además de los producidos por los usos residenciales, comerciales e institucionales, y por el aseo del espacio público, los RS incluyen los residuos originados en las industrias y establecimientos de salud siempre que no contengan características tóxicas ni peligrosas, en cuyo caso constituyen corrientes de residuos de otro tipo que deben ser manejadas según lo establecido en las normativas específicas (Rodríguez Perdigón 2014).

**Tipping fee:** es la cantidad de dinero recibida por tonelada de desechos depositada en un relleno sanitario, y divulgada públicamente por las empresas encargadas de la recolección de basuras (CalRecycle 2015).

**Tasa interna de retorno:** es la rentabilidad que obtendría un inversionista suponiendo que mantiene su inversión hasta el vencimiento del flujo que se va a recibir y que reinvierte dichos flujos a la misma tasa. De esta manera, si un inversionista compra un bono a una tasa dada, este bono paga cupones anuales por cierto número de años y el inversionista reinvierte dichos cupones todos los años a la misma tasa a la que compró el título, entonces la TIR de ese bono será la tasa a la que el inversionista lo compró (Contraloría general de la república 2016).

**Valor presente neto:** es el método por el cual se utilizan procesos matemáticos para traer todos los flujos de una inversión al momento actual. Esto se hace porque el valor del dinero cambia a través del tiempo y para hacer un análisis que permita la toma de decisiones de inversión, muchas veces se necesita poder comparar flujos en diferentes momentos del tiempo (Contraloría general de la república 2016).

# 1. Introducción

La rápida urbanización e industrialización de países en vía de desarrollo, incrementa la generación de residuos especialmente en áreas urbanas. Cada año aumenta el total de residuos como consecuencia directa del crecimiento poblacional en el mundo. Solo un pequeño porcentaje de los residuos generados se administran apropiadamente a través de reciclaje, vertederos, rellenos sanitarios, aprovechamientos energéticos entre otros mecanismos (Jaramillo 1999). La administración efectiva de los residuos, se ha constituido en un reto a nivel mundial. En países como Ghana, por ejemplo, no existe una gestión adecuada, los residuos sólidos (RS) son incinerados o dispuestos en vertederos limitados, ubicados en áreas abiertas próximas a las ciudades, trayendo consigo problemas de salud pública (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). La conversión de RS en energía ha demostrado ser ambiental, económica y socialmente sostenible (Jaramillo 1999; Moratorio, Rocco, and Castelli 2012; W. T. Tsai 2007). Existe un gran potencial para la producción de energía a partir de residuos derivados de los hogares o la industria y los cuales actualmente se desaprovechan (Acevedo and Peláez 2010). En algunos países desarrollados de Europa, las políticas de desarrollo sostenible están orientadas a la reducción y reciclaje de residuos, así como a la producción de energía a partir de los mismos (Autret et al. 2007; Khan and Tanveer 2012; Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013; Zaman and Lehmann 2013). En Colombia, el gobierno nacional, en Mayo de 2014, a través del Ministerio de Minas y Energía, promulgó la ley 1715 en la cual incentiva el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía. La misma ley en el artículo 18, considera como fuente no convencional de energía renovable, el contenido energético de los RS no susceptibles de reutilización y reciclaje (IPSE 2014).

La producción per cápita en Colombia es aproximadamente 0,5 kg/Hab-día, variando de 1,5 Kg/Hab-día en las grandes ciudades hasta 0,2 Kg/Hab-día, en las poblaciones rurales. El potencial energético, producido por los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) de Bogotá D.C, Medellín, Cali, Barranquilla y Bucaramanga, correspondiente al año 2009

alcanzó los 72,48 TJ/año (19,77 GW) (Sabalza and Villamizar 2009). Esto representa un potencial energético de gran ayuda y que podría aprovecharse para contribuir a disminuir la dependencia con respecto a fuentes convencionales como el carbón, petróleo y gas natural, utilizadas para la producción de calor o electricidad.

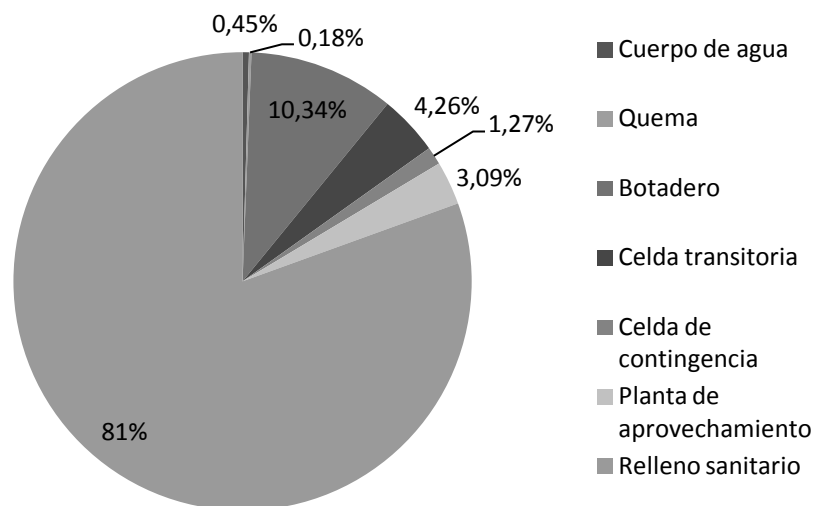
En el informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2015, elaborado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSDP) y el Departamento Nacional de Planeación, (DNP) se presenta la situación de la disposición final para los 32 departamentos y 1102 municipios de Colombia durante el año 2014. El documento considera como sistemas de disposición final autorizados los rellenos sanitarios, plantas integrales y celdas de contingencia. Por su parte, los sistemas contabilizados como no autorizados son: celda transitoria, botadero, enterramiento, vertimiento a cuerpos de agua, quema de los residuos sólidos y todo aquel que no cumpla con las definiciones y autorizaciones establecidas y requeridas por la normativa (Decreto 838 de 2005, Decreto 2820 de 2010 y Resolución 1890 de 2011).

Para el año 2014, el país contaba con 1102 municipios que disponen 26.528 toneladas diarias de residuos sólidos en 364 sitios de disposición final desagregados en 7 tipos de sistemas. 3 autorizados y 4 no autorizados por las autoridades ambientales. Lo anterior sin tener en cuenta los 186 municipios que no contaban con información.

En la Figura 1-1, se presenta de manera general, la distribución de municipios por tipo de sistema de disposición final. Se observa que el 81% de los 1102 municipios del país (886) disponen sus residuos en rellenos sanitarios, porcentaje mayor comparado con el año 2013 que fue de 75.2%. Adicionalmente, se observa que persiste la disposición en sitios como botaderos, celdas transitorias y todavía se realizan vertimientos de residuos a cuerpos de agua y quemas (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia 2015).



Figura 1-1: Distribución de municipios por tipo de sistema de disposición final Autor



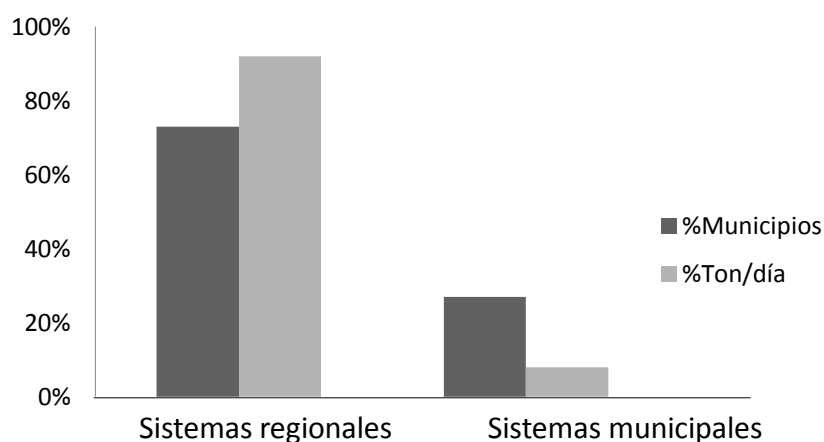
En la **Tabla 1-1** se presenta la distribución de municipios atendidos, sitios utilizados y toneladas diarias recibidas para cada sistema de disposición final. Se discrimina la cantidad de municipios para los cuales los prestadores han suministrado información y para los cuales no se reporta. Nótese que la cantidad de municipios sin información suma un total de 186.

**Tabla 1-1:** Sitios de disposición final utilizados en Colombia Autor

| Tipo de sitio de disposición final | Número de municipios | Número de sitios | Ton/día    | % de municipios | % de sitios |
|------------------------------------|----------------------|------------------|------------|-----------------|-------------|
| Cuerpo de agua                     | 5                    | 5                | No se mide | 0,5%            | 1%          |
| Quema                              | 2                    | 2                | No se mide | 0,2%            | 1%          |
| Botadero                           | 32                   | 32               | 213,1      | 2,9%            | 9%          |
| Celda transitoria                  | 82                   | 81               | No reporta | 7,4%            | 22%         |
|                                    | 33                   | 30               | 552,2      | 3,0%            | 8%          |
| Celda de contingencia              | 14                   | 14               | No reporta | 1,3%            | 4%          |
|                                    | 12                   | 12               | 103,8      | 1,1%            | 3%          |
| Planta de aprovechamiento          | 2                    | 2                | No reporta | 0,2%            | 1%          |
|                                    | 32                   | 12               | 126,6      | 2,9%            | 3%          |
| Relleno sanitario                  | 2                    | 1                | No reporta | 0,2%            | 0%          |
|                                    | 807                  | 132              | 25.532,30  | 73,2%           | 36%         |
| Total general                      | 79                   | 41               | No reporta | 7,2%            | 11%         |
|                                    | 1102                 | 364              | 26.528,00  | 100,0%          | 100%        |

En la Figura 1-2 se presenta la distribución de sistemas de disposición final regionales en relación con la cantidad de residuos que estos reciben. Se observa como el 73% del total de municipios, 803 de 1102, se sirve de sistemas regionales. De un total de 364 sitios contabilizados 65 sitios son regionales y en estos se dispone el 92% del total de los residuos presentados al servicio público de aseo en el país, 24.342 Ton/día de 26.528 Ton/día. Los 65 sitios regionales se encuentran desagregados de la siguiente manera: 57 rellenos sanitarios, 5 plantas integrales, 2 celdas transitorias y 1 botadero a cielo abierto.

Figura 1-2: Distribución por número de municipios atendidos y por T/día de residuos dispuestos en sistema regionales Autor



En la **Tabla 1-2** se presenta el comportamiento de los rellenos sanitarios regionales en el país para los años 2009 a 2014. Se observa como el número de sitios disminuyó hasta el 2011 con respecto al año 2009 pero a partir del 2012 ha aumentado levemente hasta el año 2014. A pesar de esto, el número de municipios regionalizados ha aumentado año tras año indicando concentración de residuos sólidos y de mercados. Es decir más municipios y más residuos sólidos en menos sitios (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia 2015).

**Tabla 1-2:** Comportamiento de los rellenos sanitarios periodo 2010-2014 Autor

|  | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| Número de rellenos sanitarios regionales | 92   | 69   | 47   | 60   | 63   | 65   |
| Número de municipios atendidos           | 573  | 621  | 641  | 733  | 765  | 803  |

Según los indicadores reportados por el informe de la SSPD y el DNP, la tendencia en el país es a la utilización masiva de los rellenos sanitarios. La disposición final de residuos sólidos está enfocada a sistemas autorizados y no autorizados, que poco o nada aprovechan la totalidad de su contenido energético. Sin embargo se sabe que este aprovechamiento es posible a través de tecnologías de conversión térmica (incineración, pirólisis, gasificación) y conversión biológica (gas de relleno sanitario y digestión anaerobia). La incineración es una tecnología ampliamente usada en países desarrollados, no solo como estrategia para la gestión de residuos, sino para la producción de electricidad y vapor (Autret et al. 2007; Beylot and Villeneuve 2013; Murphy and McKeogh 2004; W.-T. Tsai and Kuo 2010; Zheng et al. 2014). Algunos estudios se han realizado entorno al análisis y la viabilidad de obtención de energía desde la incineración en países como España, Malasia, Jordania, Malta, Bangladesh, México, Brasil (Abd Kadir et al. 2013; Abu-Hijleh et al. 1998; Bébar et al. 2005; Estrada Wiechers 2015; Gómez et al. 2010; Hossain et al. 2014; Khan and Tanveer 2012; Maier and Oliveira 2014; Münster and Lund 2009; Pirota, Ferreira, and Bernardo 2013; Poletto Filho 2008). Esta tecnología es fácilmente aplicable ya que admite diferentes tipos de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). La tecnología puede ser ubicada dentro o cerca del municipio, con el fin de evitar costos de transporte (Kalyani and Pandey 2014).

Otros estudios han evaluado el potencial energético del biogás obtenido desde relleno sanitario, para la obtención de energía eléctrica (Aguilar-Virgen, Taboada-González, and Ojeda-Benítez 2014; Hao, Yang, and Zhang 2008; Luz et al. 2015; Mambeli Barros, Tiago Filho, and da Silva 2014; Mustafa, Mustafa, and Mutlag 2013). Otros autores han evaluado el potencial de aprovechamiento energético del biogás, obtenido mediante el proceso de digestión anaerobia para generar energía eléctrica o térmica en España, Brasil, China, Tanzania, (Coimbra-Araújo et al. 2014; Jiang et al. 2007; Kothari et al. 2014; Mbuligwe and Kassenga 2004).

Las tecnologías de conversión biológica, ofrecen la posibilidad de aprovechar el biogás producido a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos (Bajić et al. 2015; Gómez et al. 2010; Melikoglu 2013). La digestión anaerobia se puede implementar a pequeña escala y posee beneficios ambientales positivos tales como el control de las emisiones de gases de efecto invernadero. El gas de relleno sanitario o digestión aerobia, representa una opción que podría aprovechar terrenos poco productivos para

convertirlos en áreas útiles y de allí recolectar el gas para la generación de energía eléctrica (Kalyani and Pandey 2014).

Como herramienta de gestión de residuos y en atención a la demanda de energía eléctrica, podrían implementarse en Colombia las diferentes tecnologías de conversión, valorando las características de cada una de ellas. De acuerdo a lo anterior, se han seleccionado tres escenarios poblacionales en Colombia a partir de tres grupos principales. Se realizó el análisis de la información contenida en sus Planes de Gestión de Residuos Sólidos (PGRS), se analizó la información relativa a la composición física y fracción másica de los Residuos Sólidos (RS). Se planteó una estimación del potencial de energía desde los RS para algunas tecnologías de conversión, elegidas para cada escenario, tales como incineración, digestión anaerobia de la fracción orgánica y recuperación de biogás desde relleno sanitario. Posteriormente se realizó una evaluación de prefactibilidad de generación de energía eléctrica a partir de esas tecnologías. Para esta evaluación fueron considerados costos de inversión, operación y mantenimiento. Adicionalmente se tuvieron en cuenta los beneficios establecidos en la ley 1715. Otros ingresos por ventas de energía, tratamiento de residuos, y ventas de certificados de reducción de emisiones (CERs) de gases de efecto invernadero (GEI) han sido estimados.

## **1.1 Descripción de problema**

La generación de energía eléctrica a partir de los RS, se considera como una estrategia para la gestión eficiente de RS en muchos países del mundo (Área Metropolitana 2006; Rodríguez Perdigón 2014). En Colombia aún no se implementa masivamente esta estrategia, dada la carencia de políticas estatales para incentivar el aprovechamiento de los RS. Actualmente, no existen estudios o investigaciones, en escenarios con diferentes características, enfocadas hacia la producción de electricidad como alternativa a una gestión tradicional (vertederos o rellenos sanitarios), en aras de un desarrollo sostenible. Según el informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2015, la tendencia en Colombia es a la disposición final en rellenos sanitarios. Alrededor del 81% del total de municipios utilizan esta estrategia, además de otras en menor porcentaje tales como las plantas de procesamiento de residuos sólidos a pequeña escala, botaderos, celdas transitorias y de contingencia (Superintendencia de

Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia 2015). Si bien el relleno sanitario es una forma aceptable de gestión de residuos, cuenta con una vida útil que depende de la cantidad de residuos y la disponibilidad de espacios. A su vez la cantidad de residuos es función del crecimiento poblacional el cual va en continuo aumento.

En 2005, se calculó que la población urbana de Colombia aumentó a más del 75% de la población total. El DANE estima que, para el 2020, este número aumentará alrededor del 80%. La tasa de urbanización crea muchos de los problemas a los que se enfrentan las ciudades colombianas, incluidos los relacionados con las condiciones ambientales y la provisión de los servicios públicos necesarios, tales como la recolección y eliminación de desechos sólidos. Según proyecciones del gobierno, para el año 2020, el número de ciudades en Colombia con más de un millón de personas aumentará de cuatro a siete, y las poblaciones que cuentan con más de 100.000 personas, pasarán de 37 a 55.

Aunque existen en las ciudades y municipios políticas de gestión de residuos sólidos, de las cuales hacen parte los denominados PGIRS, se sabe que su implementación ha resultado ser pobre hasta la fecha y las estrategias de recuperación de residuos estipuladas en estos planes no han sido ampliamente implementadas para lograr la cultura de cero residuos (Larochelle, Turner, and LaGiglia 2012).

Se propone entonces como alternativa de gestión, la generación de energía eléctrica a partir del contenido energético de los residuos sólidos. Esto podría contribuir a la disminución de la tradicional estrategia del relleno sanitario, la cual ha aumentado en los últimos años, pasando de tener 47 en 2011 a un total de 65 en 2014. Además de lo anterior el país requiere una diversificación en la matriz energética y un aumento en el parque de generación. Esto se vio reflejado en la crisis durante 2016. Año en la cual, el país estuvo al borde del colapso y racionamiento, gracias al fenómeno del niño y el elevado costo que implica la generación a partir de combustibles fósiles de limitada producción y alta demanda como el gas. En lo relacionado a la sustitución del gas combustible, el Ministerio de Minas y Energía, a través de la resolución CREG 135 de 2012, y del documento CREG 040 del 13 de junio de 2016, declaró la viabilidad de utilización del biogás como combustible alternativo para la prestación del servicio domiciliario (Comision de Regulación de Energía y Gas (CREG) 2016). El biogás podría ser aprovechado a partir de la fracción, recolectada en rellenos sanitarios y plantas de

digestión anaerobia, que no alcanza a ser utilizada (excedente) como combustible para la generación de energía eléctrica. Dado la limitada capacidad nominal de algunos equipos.

En virtud de lo expuesto anteriormente, se evaluará la prefactibilidad de generación de energía eléctrica, mediante las tecnologías de conversión biológica y térmica de residuos sólidos, en centros urbanos típicos caracterizados por la población, la proporción urbano/rural, la producción y tipo de residuos.

## **1.2 Objetivos**

### **▪ Objetivo general**

Evaluar la prefactibilidad técnico-económica de generación de energía eléctrica, a partir del aprovechamiento de los residuos sólidos, en tres escenarios poblaciones en Colombia.

### **▪ Objetivos específicos**

1. Desarrollar una metodología para la selección de tres escenarios representativos de estudio, basado en características socioeconómicas y demográficas tales como la cantidad de habitantes, la proporción urbano/rural, la producción y tipo de residuos.
2. Seleccionar la tecnología de conversión de residuos sólidos a energía eléctrica, más adecuada, según criterios técnicos, y estimar el potencial de aprovechamiento energético por escenario y tecnología respectiva.
3. Realizar un estudio de prefactibilidad (técnico-económico) por caso de estudio.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Tecnologías de conversión de RSU a energía**

Existen dos tipos de procesos comúnmente utilizados para la conversión de residuos sólidos a energía eléctrica. Uno de estos es el de conversión térmica, allí se incluyen: la incineración, pirolisis, gasificación. Teóricamente en estos procesos la energía del residuo puede ser capturada y transformada en calor, electricidad o productos químicos adecuados para otras aplicaciones (Environment and Plastics Industry Council (EPIC) 2004). El otro proceso es el de conversión biológica. En este, los microorganismos descomponen los desechos en forma de sólidos, lodos o gas. La conversión biológica de residuos se puede agrupar en digestión aeróbica y anaerobia. En esta sección se describen las tecnologías de conversión térmica y biológica de RSU más utilizadas y los parámetros más importantes que hacen parte de ellas y considerados en este estudio (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013).

#### **2.1.1 Incineración**

Una de las técnicas de tratamiento de residuos utilizada más frecuentemente es la incineración. Esto se da gracias a su capacidad para reducir la masa de residuos en un 70% y su volumen en hasta un 90%. El proceso de incineración contribuye a la valorización energética de los residuos mediante la generación de la electricidad a partir de energía térmica. Este proceso puede dividirse en tres etapas principales: la incineración, la recuperación de energía y el control de la contaminación del aire. Los riesgos por contaminación del aire y riesgos de salud, podrían ocurrir como resultado de las emisiones que contienen contaminantes tales como: óxidos de azufre, carbono y nitrógeno. Por esta razón, es extremadamente importante que el incinerador esté equipado con accesorios de control de emisiones (Bajic et al. 2015). En la mayoría de

casos donde esta tecnología se encuentra en operación, existen depuradores o dispositivos que rocían líquidos de humo para reducir la contaminación. Existen además filtros (pantallas para eliminar cenizas, y partículas). Esto con el objetivo de limpiar los gases de combustión (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013).

La incineración se realiza en un intervalo de temperatura entre 750°C y 1000°C y los procesos de generación de vapor y electricidad pueden ser combinados (Bajić et al. 2015). Un sistema típico de incineración controlado para la producción de energía eléctrica y calor, consta de una cámara de almacenamiento de residuos, un incinerador/caldera, una turbina de vapor/generador, un sistema de limpieza de los gases de combustión, y un sistema de tratamiento de residuos. El poder calorífico del residuo, es un parámetro importante que contribuye en gran medida a la eficacia de la planta de incineración. El PCI necesario para el RSU, sin la adición de otro combustible es de aproximadamente 7,0 MJ/kg de RSU o 1,94 MWh/T de RSU (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). El tipo y el diseño de los equipos utilizados para quemar los residuos, es decir, la cámara de combustión, están fuertemente influenciadas por el hecho de que los residuos son generalmente sólidos y contienen partículas más grandes.

La mayoría de las cámaras de combustión de residuos utilizados actualmente pertenecen a tres familias principales: parrilla móvil/fija, horno rotatorio y de lecho fluidizado. Los hornos rotatorios tienen la gran ventaja de ser capaces de procesar cualquier tipo de residuos, por lo general pueden soportar temperaturas de incineración más altas que las parrillas móviles. Son particularmente adecuados para el tratamiento de los residuos que requieren altas temperaturas. La capacidad de tratamiento máxima de estas cámaras de combustión, en términos de energía térmica de entrada en base al PCI, es igual a 30 MW por línea. Los lechos fluidizados circulantes han encontrado crecientes aplicaciones dentro de las técnicas de incineración. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de estas tecnologías está relacionado con el requisito de preparación de combustible, sobre todo cuando se trata de los RSU. Por esta razón, algunos tipos de residuos, por ejemplo lodos, con una distribución homogénea de partículas, son los principales candidatos a ser quemado en estos dispositivos. En el caso de lecho fluidizado, la máxima capacidad de tratamiento por línea indicada es igual a 90 MW, en términos de energía térmica de entrada en base al PCI. Los Incineradores de parrilla se



aplican ampliamente para RSU. Estos se pueden distinguir por la forma en que los residuos se transportan a través de las diferentes zonas en la cámara de combustión (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014). Cada uno tiene que cumplir con los requisitos en relación con la alimentación de aire primario, velocidad de transporte, combustión y mezcla de los residuos sólidos (Autret et al. 2007). Las cámaras de combustión de parrilla móvil ofrecen mayor capacidad de tratamiento térmico en cuanto a la entrada de alimentación por línea (hasta 120MW en base al PCI) (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014).

El subproducto más importante de la incineración es la ceniza de fondo que consiste en silicio, hierro, calcio, aluminio, sodio y potasio en su estado de óxido. Estos materiales están presentes dentro de un rango de 80 a 87% de las cenizas. Después de considerar las pérdidas del sistema, la eficiencia general de esta tecnología es de aproximadamente 25% sin incluir el consumo en planta (Ouda et al. 2015). Las plantas de incineración, pueden ser clasificadas según su capacidad. Las pequeñas son aquellas con rendimiento inferior a 100.000 T/año, plantas medianas son aquellas en el rango 100.000-250.000 T/año, mientras que las plantas grandes son aquellos que tienen un rendimiento mayor de 250.000 T/año. El continente europeo posee plantas de incineración que suelen producir hasta 546 kWh de electricidad por T de residuos, lo que corresponde a una eficiencia bruta de 18%, basada en un PCI del residuo de 10,44 MJ/T (sólo la producción de electricidad). Teniendo en cuenta el consumo promedio de 150 kWh/T de residuos en la planta, la electricidad exportada es de 396 kWh/T (eficiencia neta del 13%). Aunque la mayoría de las plantas modernas, a 40 bar y 400°C, por lo general producen 640 kWh/T de electricidad, lo que corresponde a una eficiencia eléctrica bruta de 22% (PCI de 10,44 MJ/T). Con un consumo en planta de 120 kWh/T, y exportando alrededor de 520 kWh de electricidad por T de residuos, la eficiencia neta bajaría al 18% (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014).

### 2.1.2 Pirólisis

La pirólisis es un método de tratamiento térmico de residuos llevado a cabo en un ambiente libre de oxígeno. Dependiendo de los parámetros operativos, el proceso de pirólisis se puede clasificar en tres tipos: pirólisis convencional, rápida y relámpago. Los parámetros de funcionamiento de estos tres tipos de pirólisis se muestran en la **Tabla**

**2-1.** La **Tabla 2-2** muestra la composición de los gases de pirólisis, que son producto de algunos procesos particulares de pirólisis (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014).

**Tabla 2-1:** Parámetros de funcionamiento para los tres tipos de pirólisis (Kalyani and Pandey 2014).

| Parámetros             | Pirólisis convencional | Pirólisis rápida | Pirólisis relámpago |
|------------------------|------------------------|------------------|---------------------|
| Temperatura (K)        | 550-900                | 850-1250         | 1050-1300           |
| Tasa de calor (K/s)    | 0.1-1                  | 10-200           | >1000               |
| Tamaño de partícula mm | 5-50                   | <1               | <0.2                |
| Tiempo (s)             | 300-3600               | 0.5-10           | <0.5                |

**Tabla 2-2:** Composiciones de los gases de pirólisis (Kalyani and Pandey 2014).

| Composición                              | Cantidad (Vol%) |
|--|-----------------|
| CO                                       | 35.5            |
| CO <sub>2</sub>                          | 16.4            |
| CH <sub>4</sub>                          | 11              |
| H <sub>2</sub>                           | 37              |
| Valor calorífico (Kcal/Nm <sup>3</sup> ) | 3430            |

Los rendimientos de gas de pirólisis, aceite y carbón dependen principalmente de la temperatura de proceso, velocidad de calentamiento, así como del elemento pirolizado. Generalmente cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la fracción gaseosa. Con una menor temperatura y una mayor rapidez de calentamiento, se puede obtener mayor producción de aceite.

Actualmente, la única planta de pirólisis de RSU en funcionamiento en Europa está en Burgau Alemania y ha estado trabajando desde 1986. La planta procesa alrededor de 38.000 T/año de RSU y lodos depurados. Los RSU allí son previamente trillados hasta un tamaño máximo de 300 mm. Se conoce que el poder calorífico de la materia prima ha registrado un incremento en los últimos años hasta aproximadamente 10,2 GJ/T. La pirólisis se lleva a cabo en alrededor de 500°C en un horno rotatorio, que se calienta indirectamente por parte de los gases de combustión (aproximadamente 20%) a partir de la combustión del gas de síntesis. El gas de síntesis, de aproximadamente 636 m<sup>3</sup>/T, que contiene hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano y otros hidrocarburos, tiene aproximadamente 10-14 GJ/m<sup>3</sup> de PCI, y se quema, junto con el gas de relleno sanitario, a la temperatura en exceso de 1250°C (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014).

Sobre la pirólisis no fue posible obtener fuentes de información y referencia de estudios para la evaluación de esta tecnología, en escenarios poblacionales de otros países.

### 2.1.3 Gasificación

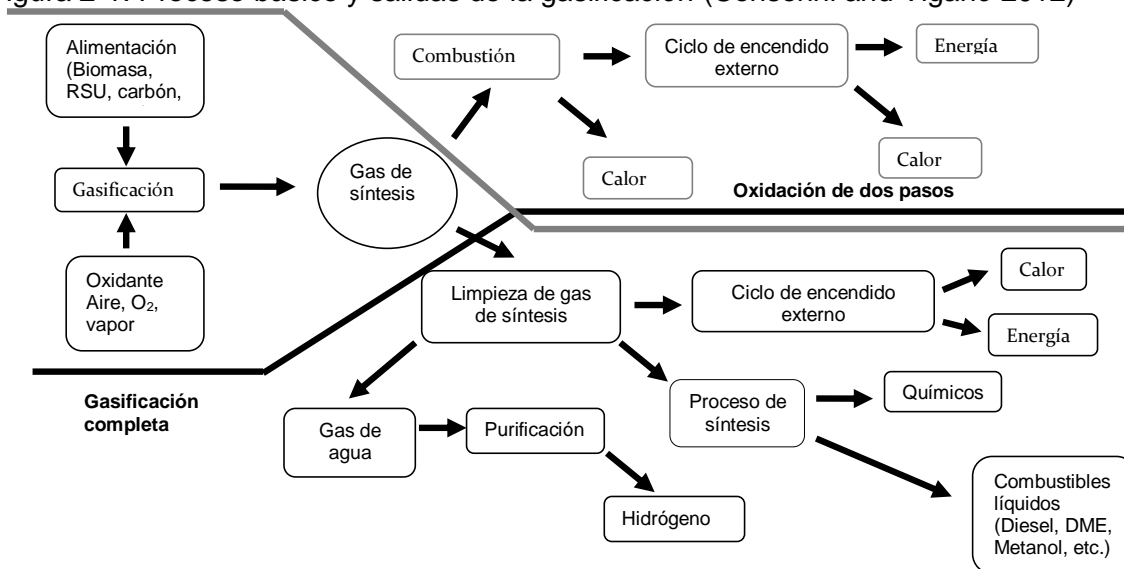
El proceso de gasificación constituye combustión parcial RSU y biomasa para la producción de gas y carbón. Los gases producto, principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , se reducen a  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$  utilizando carbón. El proceso genera una cierta cantidad de metano y otros hidrocarburos superiores, dependiendo del diseño del reactor y los parámetros operacionales. En presencia de un agente gasificador, diversas reacciones heterogéneas convierten la materia prima a gas.

El gas combustible producido consta de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , además de otros gases inertes y otros contaminantes tales como pequeñas partículas de carbón, alquitrán y cenizas. Si el proceso de gasificación no ocurre utilizando un agente oxidante, se requiere de una fuente de energía externa. Esto se conoce como gasificación indirecta. El vapor es el agente oxidante más utilizado en gasificación indirecta debido a su fácil producción, y también a su capacidad de aumentar el contenido de hidrógeno del gas combustible producido. Un sistema de gasificación consiste de tres componentes principales: (1) El gasificador, que produce el gas combustible, (2) el sistema de limpieza, que elimina los componentes peligrosos de gas combustible y (3) el sistema de recuperación de energía (Lombardi, Carnevale, and Corti 2014).

La Figura 2-1, ilustra las opciones del proceso básico y las posibles salidas de la gasificación. En este proceso hay combustión parcial de los RS a altas temperaturas y se da en un ambiente controlado, que prácticamente convierte casi todos los RS en gas y carbón. Este ocurre en dos etapas. Durante la primera etapa, los RS son parcialmente quemados para formar gas pobre (que comprende  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ ). Durante la segunda etapa, el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  se reducen químicamente para formar principalmente monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y gas de hidrógeno ( $\text{H}_2$ ). La composición del gas resultante es 18-20% de  $\text{H}_2$ , 18-21% de  $\text{CO}$ , un 2-3% de  $\text{CH}_4$ , 8-10% de  $\text{CO}_2$ , y el resto es nitrógeno. Las dos etapas se separan en el gasificador. La gasificación requiere temperaturas de aproximadamente  $750\text{-}800^\circ\text{C}$  y presión atmosférica mayor o igual a 1 atm (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013).

En principio la materia prima podría ser cualquier hidrocarburo; pero en la práctica, para un gasificador dado, esta es más bien estrecha inclusive más que para una cámara de combustión. El intervalo admisible de las propiedades de las materias primas, debido a la química y dinámicas de fluido de la gasificación, son muy sensibles a las variaciones de la composición debido a la humedad, contenido de cenizas, tamaño de partículas, densidad, reactividad, etc. A diferencia de las instalaciones de combustión, donde la salida útil es potencia y posiblemente el calor, en una planta de gasificación la salida puede variar en un amplio rango: no sólo energía y calor, sino también productos químicos, combustibles líquidos o hidrógeno. Para ello, sin embargo, el gas de bajo poder calorífico, Gas de síntesis, convertible a diferentes tipos de energía (Gutierrez 2009), debe ser tratado adecuadamente para satisfacer los requisitos estrictos del proceso para la producción de productos químicos, combustibles líquidos o de hidrógeno. Es necesario un tratamiento adecuado de gas de síntesis para satisfacer los requisitos de alta eficiencia, ciclos internos (turbinas de gas, motores de combustión interna), que no soportan gases ácidos, partículas, alquitrán y todas las demás impurezas del gas de síntesis generado por el gasificador (Consonni and Viganò 2012).

Figura 2-1: Proceso básico y salidas de la gasificación (Consonni and Viganò 2012)



## 2.1.4 Digestión anaerobia

Para esta tecnología, los residuos orgánicos son utilizados como materia prima para el proceso, que luego es degradado por microorganismos en ausencia de oxígeno. Esto reduce la cantidad de residuos y produce biogás, que puede ser utilizado como

combustible para el transporte o para la cogeneración. Los residuos inertes e inorgánicos restantes son gasificados o incinerados. Durante el proceso de Digestión Anaerobia (DA), las temperaturas pueden aumentar hasta 65°C, y comenzar a disminuir después de cierto tiempo. En la Tabla 2-3 se muestra la comparación entre los gases que componen el biogás producido desde relleno sanitario y digestión anaerobia. Dentro de la conversión anaerobia o fermentación de los RSU, más del 90% de la energía disponible en los desechos se retiene dentro del biogás como metano y el resto se convierte en lodos. Este proceso se lleva a cabo en sistemas o reactores cerrados llamados digestores (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). El agua tiene un papel importante en el control de todo el proceso de digestión anaerobia. Es responsable del crecimiento de la población microbiana y también trabaja como agente regulador para el sustrato y los reactivos. El proceso de digestión anaerobia se clasifica de diferentes formas, según el diseño del reactor, y sus parámetros de funcionamiento tales como: el pH, sólidos totales (TS), sólidos volátiles (VS) contenidos y biodegradabilidad de sustrato. De acuerdo al porcentaje de sólidos contenido en la fracción orgánica, los sistemas pueden clasificarse en bajos (menor a 15%), medios (15-20%) y altos (20-40%). Por lo tanto, el sistema de digestión anaerobia húmeda se caracteriza por un total de sólidos menores al 15%. Un sistema anaerobio seco se caracteriza por un total de sólidos superior al 15%.

La digestión anaerobia de la materia orgánica se produce en cuatro pasos, denominados hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, y metanogénesis. La digestión anaerobia puede considerarse como el trabajo en conjunto de microorganismos tales como, bacterias acetogénicas, acidogénicas y metanógenicas, etc. Estos son responsables de la producción de biogás a partir de materia orgánica la cual se encuentran en los residuos en forma de polímeros tales como: hidratos de carbono (celulosa, hemicelulosas, almidón, etc.), aceites, grasas y proteínas. En general, los microorganismos no son capaces de utilizar estos polímeros debido al gran tamaño de las moléculas, al no poder penetrar la pared celular. Por lo tanto, las bacterias acidogénicas producen enzimas extracelulares tales como celulosa, xilanasa, amilasa, lipasa, enzimas proteolíticas, etc., para hidrolizar los polímeros. Los carbohidratos, proteínas, grasas y aceites se hidrolizan en azúcares monoméricos, aminoácidos y ácidos grasos, respectivamente (Kothari et al. 2014).

### 2.1.5 Generación vía relleno sanitario (Digestión aeróbica)

El proceso de descomposición de residuos orgánicos en vertederos, es ligeramente sinónimo a la digestión anaerobia en digestores de biogás. Los microorganismos que viven en el material orgánico tales como residuos de alimentos y papel, hacen que estos materiales se descompongan, liberando metano en gran cantidad y  $\text{CO}_2$  en pequeñas cantidades. El gas de relleno normalmente comprende 50% de metano y 50% de dióxido de carbono. El biogás emitido por los vertederos es atrapado y quemado para producir electricidad. Normalmente es atrapado desde pozos perforados al interior de los rellenos por medio de tuberías. El gas crudo (o mezcla con gas natural) se introduce en turbinas de combustión o turbinas de ciclo combinado para generar energía eléctrica (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013). La materia prima básica para la biometanización puede variar y los estudios muestran que este puede contener residuos de vegetales, suero de leche, residuos agrícolas y de restaurante (Ouda et al. 2015).

**Tabla 2-3:** Comparación entre gases de biogás desde relleno sanitario y biodigestor (Ofori-Boateng, Lee, and Mensah 2013).

| Composición del gas                  | % Relleno sanitario | % Biodigestor |
|--------------------------------------|---------------------|---------------|
| Metano $\text{CH}_4$                 | 55                  | 45-60         |
| $\text{CO}_2$                        | 45                  | 35-50         |
| CO                                   | -                   | 0.0-0.3       |
| $\text{N}_2$                         | 3.1                 | 1.0-5.0       |
| $\text{H}_2$                         | -                   | 0.0-3.0       |
| $\text{H}_2\text{S}$ $\text{mg/m}^3$ | 88                  | 0.1-0.5       |
| $\text{O}_2$                         | 0.8                 | -             |

## 2.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía (kJ o kcal) que produce la combustión de 1 kg del mismo. El PCI es la cantidad de calor neto desprendido por unidad de combustible sin enfriar o condensar los productos de la combustión, con lo que se pierde el calor contenido en el vapor de agua formado en la combustión. El PCI es el valor que se tiene en cuenta al hablar de las cualidades energéticas de un producto. En los procesos industriales no se aprovecha el calor de condensación del vapor, puesto

que los gases se evacúan a una temperatura superior al punto de rocío. De ahí que en la práctica se use el PCI (Sánchez Tolosa 2012).

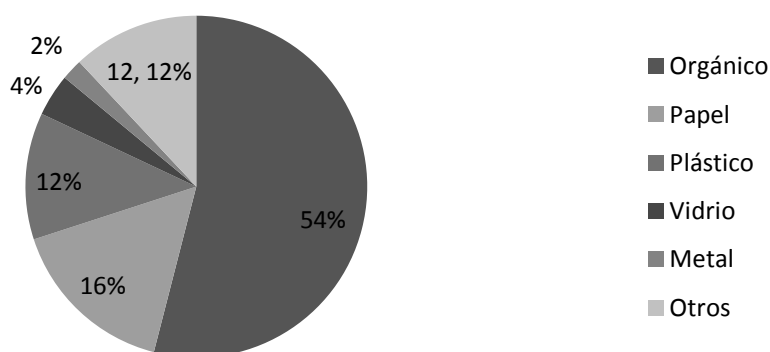
El contenido de energía del residuo, se puede determinar mediante el uso de una caldera a gran escala como un calorímetro, una bomba calorimétrica de laboratorio, o cálculos basados en modelos empíricos. Debido a la dificultad de construir una caldera a gran escala, la mayoría de los datos se obtienen a partir de los resultados de otros métodos. Cuando se compara con las mediciones de una bomba calorimétrica, un modelo empírico puede determinar el contenido de energía de los RSU si los parámetros en el modelo están bien establecidos. El PCI, se define como el contenido de energía liberada por la combustión de los RSU en un incinerador. Este se puede predecir a partir de los modelos basados en el análisis aproximado de la composición física, y el análisis último. Se necesitan análisis de C, H, O, S, Cl y el contenido de humedad en RSU para la predicción de PCI; sin embargo, la obtención de tales datos puede ser costosa y consume tiempo. A pesar de esto, se han desarrollado modelos rentables para la predicción del PCI de RSU a partir de ecuaciones empíricas basadas en componentes físicos tales como: residuos de alimentos, papel y cartón, plásticos, textiles, madera, entre otros (Chang et al. 2007).

El objeto de este estudio no contempla un análisis de laboratorio para los residuos mencionados anteriormente, por lo tanto se han tomado valores de referencia reportados en casos de estudios e investigaciones con objetivos similares a los fijados en el presente trabajo y realizadas en países como Arabia Saudita, España, Brasil, Argentina, México, Chile. Para estos países, los valores de PCI, son igualmente referenciados y no son objetivo de la investigación los resultados de análisis o mediciones realizadas directamente. Por otro lado se tiene como referencia o punto de comparación un PCI total de 8,90 MJ/kg para residuos típicos reportado por (Castells 2005). Así como un valor medio ponderado de PCI de 97 plantas de incineración alrededor del mundo igual a 10 MJ/kg (Themelis et al. 2013). Un estudio de caracterización de residuos realizado por Empresas Varias de Medellín (EVM) en el año 2009, determinó un PCI total de los residuos en relleno sanitario igual a 4,09 MJ/Kg (Grupo epm 2016).

Conociendo la composición física de los RS, por escenario, se puede estimar de forma aproximada el PCI total, a partir de la ponderación del PCI por tipo de residuo, según su fracción másica. Los PCI típicos de cada componente de los RS fueron tomados de la

Guía para la aplicación de tecnologías de los residuos a energía en América Latina y el Caribe (Themelis et al. 2013). En esta guía se presentan casos de estudio en Buenos Aires Argentina, Toluca México y Valparaíso Chile, todas las anteriores ciudades de Latinoamérica, lo cual permite aplicar la información en este trabajo porque esta región posee una composición física de RSU similar (Leckner 2015). La Figura 2-2 muestra la composición física de RSU para Latinoamérica.

Figura 2-2: Composición de RSU en países de Latinoamérica (Leckner 2015).



Los valores de PCI por tipo de residuo de este estudio, se han comparado los de otros estudios realizados en Arabia Saudita, Brasil y España. A nivel nacional se han comparado con los valores de PCI obtenidos en la caracterización química realizada por EVM en el año 2009. Estos valores de PCI se muestran en la **Tabla 2-4**. En este trabajo se usaron los datos de los valores de PCI de Buenos Aires, Toluca y Valparaíso para realizar los cálculos en los escenarios seleccionados. Se puede observar de la misma tabla que los valores reportados por EVM son superiores inclusive a los usados en este estudio. Así que la estimación, realizada con valores más bajos a los reportados por EVM, disminuye la incertidumbre en el cálculo de esta cantidad.



**Tabla 2-4:** PCI de diferentes tipos de residuos en diferentes países.

| Tipo de residuo              | PCI<br>(MJ/kg)      | PCI (MJ/kg)                  | PCI<br>(MJ/kg)     | PCI<br>(MJ/kg)                            | PCI<br>(MJ/kg)      |
|------------------------------|---------------------|------------------------------|--------------------|---|---------------------|
|                              | Arabia Saudita      | Argentina<br>Chile<br>México | EVM                | Brasil                                    | España              |
| Papel y cartón               | 15,82               | 15,6                         | 23,23 <sup>1</sup> | 16,87                                     | 10,05               |
| Residuos mixtos de alimentos | 5,58                | 4,6                          | 6,97               | 5,49                                      | 2,72                |
| Plástico mixto               | 32,56               | 32,4                         | 37,17              | 26,36                                     | 35,22               |
| Textiles                     | 18,84               | 18,4                         | 18,58              | 14,55                                     | 14,35               |
| Madera                       | 15,12               | 15,4                         | 18,58              | 10,54                                     | 13,58               |
| Fuente                       | (Ouda et al. 2015). | (Themelis et al. 2013)       | (Grupo epm 2016)   | (Ministerio de Minas y Energía de Brasil) | (Gómez et al. 2010) |

## 2.3 Modelos matemáticos para el cálculo del poder de aprovechamiento energético (PAE)

### 2.3.1 Incineración

En la ecuación (2.1) se muestran las expresiones para el cálculo de la energía eléctrica que puede obtenerse mediante incineración:

$$PER_i = \eta(M \cdot PCI_{RSU}) / 1000 \tag{2.1}$$

Donde:

PER<sub>i</sub> = Potencial de energía recuperada en MWh/día

---

<sup>1</sup> Promedio de papel y cartón, EVM presenta estos dos componentes desagregados

M= Masa total de residuo sólido seco en T/día, PCI es el poder calorífico inferior de diferentes residuos en kWh/Kg.

$\eta$ = Eficiencia de proceso y se toma de un 18 % (Ouda et al. 2015; Vicente L et al. 2014).

### 2.3.2 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el proceso preferido para la fracción de RSU orgánicos, allí se permite la actividad de microbios en presencia de humedad. La expresión utilizada para calcular el potencial de producción de electricidad para el total de la fracción orgánica de RSU es la que se da en (2.2) :

$$PER_{D.A.} = \sum_{i=1}^n P \cdot R_{AC} \cdot f \cdot M_{FORSU} \cdot Q \cdot \eta \quad (2.2)$$

Donde:

P= Población residente en determinado lugar

$R_{AC}$ = Generación anual per cápita de residuos en (T/hab-día)

f= Fracción de materia orgánica en el residuo sólido (%).

$M_{FORS}$ = Generación de metano por tonelada de Fracción Orgánica de Residuos Sólidos (FORS) ( $Nm^3/T$ ).

Q= Poder Calorífico Inferior del biogás debido al metano ( $MJ/m^3$ )

$\eta$ = Eficiencia de proceso y se toma de un 26 % para motor recíprocante de combustión interna (Gómez et al. 2010).

Aunque la digestión anaerobia se lleva a cabo bajo condiciones de operación controladas, se reportan diferentes valores asociados a la cantidad de metano generado a partir de la FORSU. Para este estudio se tomó igual a  $71 Nm^3/T$ , asumiendo un porcentaje de 55,5% de contenido de metano dentro del biogás (Murphy and McCarthy 2005). La literatura reporta valores de rendimiento del biogás que van desde los 67,5 hasta los  $122 Nm^3/T$  de fracción orgánica de residuos (Gómez et al. 2010). Se conoce del proyecto Chicón en Chigorodó Antioquia, en donde a partir de la digestión anaerobia se estiman producir 2 millones de  $m^3$  de biogás a partir de 15.000 T/año de residuos sólidos

orgánicos (GICON 2016). De lo anterior se puede obtener una relación de 133 m<sup>3</sup>/T de biogás y 73,82 m<sup>3</sup>/T de metano considerando un 55,5 % de contenido de este último gas. A nivel internacional se tiene referencia de una planta de digestión anaerobia en Canadá, con rendimientos de 120 m<sup>3</sup>/T y 66,6 m<sup>3</sup>/T de biogás y metano respectivamente (New York City Economic Development Corporation 2010). En Japón se cuenta con una planta instalada de digestión anaerobia con rendimiento igual a 107 m<sup>3</sup>/T de biogás y 59,39 m<sup>3</sup>/T de metano (Moriarty 2013). Si bien el rendimiento del metano puede variar de acuerdo a la población, este valor de 71,04 m<sup>3</sup>/T podría generalizarse. En Colombia se cuenta con una distribución de residuos aproximadamente similar (Larochelle, Turner, and LaGiglia 2012)

### 2.3.3 Gas de relleno sanitario (Digestión aeróbica)

La expresión para calcular las emisiones de metano desde los rellenos sanitarios está dada por (2.3) (Aguilar-Virgen, Taboada-González, and Ojeda-Benítez 2014; Mambeli Barros, Tiago Filho, and da Silva 2014; Mustafa, Mustafa, and Mutlag 2013; Ordoñez Ordoñez 2011).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \quad (2.3)$$

Donde:

$Q_{CH_4}$  = Generación anual de metano en el año calculado (m<sup>3</sup>/año)

$M_i$  = Índice de disposición de residuos (T/año)

$L_0$  = Potencial de generación de metano (m<sup>3</sup>/T)

$k$  = Constante del índice de generación de metano (1/año)

$n$  = (año calculado) - (año inicial de aceptación de los residuos)

$i$  = 1 incremento del año

$j$  = 0.1 incremento del año

$t_{ij}$  = Edad de la  $j$  sección de residuos aceptados en el año  $i$ .

La obtención de  $Q_{CH_4}$  es importante ya que la potencia eléctrica generada por el biogás, depende de esta variable tal como se describe en (2.4):

$$PER_{G.R.} = PCI_{biogás} \cdot Q_{CH_4} \cdot \gamma \cdot \eta \quad (2.4)$$

Donde:

$PCI_{biogás}$  = Valor del PCI biogás obtenido a partir de los RSU debido al metano en kWh/m<sup>3</sup>

$\gamma$  = Eficiencia del sistema de recuperación de biogás y se toma del 80% para este estudio.

$\eta$  = Eficiencia eléctrica de la tecnología utilizada para la generación de electricidad y toma un valor de 33% (Bove and Lunghi 2006; Cadena, Pérez, and Mora 2012)

## 2.4 Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías

A continuación en la **Tabla 2-5** se resumen las ventajas y desventajas de las diferentes opciones tecnológicas.

**Tabla 2-5:** Ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías (Kalyani and Pandey 2014)

| Tecnología          | Ventajas   | Desventajas  |
|---------------------|--|--|
| Digestión anaerobia | Recuperación de energía con una alto grado de producción                   | Inadecuado para los desechos que contienen menos materia orgánica          |
|                     | No requiere potencia de tamizado   | Requiere la separación de residuos para mejorar la eficiencia de digestión |
|                     | Sistema cerrado permite atrapar el gas producido para su uso               |  |
|                     | Controla las emisiones de GEI  |  |
|                     | Libre de mal olor, roedores, contaminación visible y de resistencia social |  |
|                     | Diseño compacto: necesita menos superficie de tierra                       |  |
|                     | Beneficios ambientales positivos   |  |
|                     | Se puede hacer en pequeña  |  |

| Tecnología                     | Ventajas<br>escala   | Desventajas  |
|--------------------------------|--|--|
| Recuperación de gas de relleno | Opción de bajo costo   | La escorrentía superficial durante las lluvias provoca la contaminación  |
|                                | El gas producido puede ser utilizado para la generación de energía o la aplicación térmica directa | El suelo y las aguas subterráneas pueden quedar contaminado por lixiviado  |
|                                | No requieren personal calificado   | Los rendimientos son sólo el 30% - 40% del total del gas generado  |
|                                | Los recursos naturales se devuelven al suelo y se reciclan   | Se requiere grandes superficies  |
|                                | Puede convertir las tierras pantanosas en áreas útiles   | Costos de transporte significativos  |
|                                |  | El costo de pre-tratamiento para actualizar el gas a la calidad de la tubería y el tratamiento de lixiviados puede ser significativo |
|                                |  | Explosión espontánea debido a la acumulación de gas metano   |
| Incineración                   | Más conveniente para residuos de alto poder calorífico   | Menos adecuado para residuos acuosos, de alto contenido de humedad, bajo valor calórico y desechos clorados                          |
|                                | Se pueden configurar unidades con alto rendimiento y de alimentación continua                      | Concentración tóxica de metales en cenizas, emisiones de partículas, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub>                               |
|                                | Energía térmica para la generación de energía o calentamiento directo                              | Alto capital y costos de operación y mantenimiento   |
|                                | Relativamente silenciosa y sin olor  | Requieren personal calificado  |
|                                | Se requieren pocas tierras   | La eficiencia global de las pequeñas centrales eléctricas es baja  |
|                                | Puede ser ubicado dentro de los límites de la ciudad, lo que reduce los costos de transporte       |  |
|                                | Higiénico  |  |

| Tecnología               | Ventajas  | Desventajas   |
|--------------------------|---|---|
| Pirólisis / gasificación | Producción de combustible gas / aceite, que puede ser utilizado para diversos fines | Recuperación neta de energía puede ser difícil en residuos con humedad excesiva       |
|                          | Control de la contaminación superior en comparación con la incineración             | Alta viscosidad del aceite de pirólisis puede ser problema para su quema y transporte |

## 2.5 Costo unitario de la electricidad

El costo unitario de la electricidad generada se puede evaluar a partir de la ecuación (2.5). Este costo es un indicador que permite comparar costos de producción de electricidad para las diferentes tecnologías (Bidart, Fröhling, and Schultmann 2013; Gómez et al. 2010):

$$C\pi_c = a I_c + O_c - R_c^{bp} \quad (2.5)$$

Donde:

$C$  = Costo específico de la energía generada anualmente de acuerdo a la tecnología instalada (USD/MWh)

$\pi_c$  = Energía generada anualmente (MWh/año)

$a$  = Coeficiente de anualización para la inversión inicial

$I_c$  = Costo de capital de instalación (USD)

$O_c$  = Costo de operación y mantenimiento (USD)

$R_c^{bp}$  = Ingreso obtenido a partir de los subproductos (USD)

El coeficiente de anualización está dado por:

$$a = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^N}} \quad (2.6)$$

Donde  $r$  es la tasa de descuento efectiva en porcentaje y  $N$  tiempo de vida de la inversión (Gómez et al. 2010).

## 2.6 Beneficios de la ley 1715

La ley 1715 sancionada por el gobierno nacional de Colombia en mayo del 2014, tiene como finalidad establecer los instrumentos de promoción para el aprovechamiento de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), y fomentar la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, eficiencia energética y respuesta a la demanda. La misma ley en los artículos 11, 12, 13 y 14 plantea unos beneficios o incentivos tributarios, los cuales se mencionan a continuación:

### 2.6.1 Impuesto sobre la renta (Artículo 11)

El beneficio consiste en el derecho a reducir anualmente de su renta, por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el cincuenta por ciento (50%) del valor total de la inversión realizada, condicionado a:

- Que el valor a deducir no supere el 50% de la renta líquida del contribuyente determinada antes de restar el valor de la inversión
- Que el beneficio ambiental de la inversión haya sido certificado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

### 2.6.2 Exclusión de IVA (Artículo 12)

Los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la pre-inversión e inversión, para la producción y utilización de energía partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos estarán excluidos de IVA.

El beneficio está condicionado a dos circunstancias:

- Que la UPME expida una lista de qué equipos y servicios se utilizan para el propósito mencionado.
- Que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible certifique los equipos y servicios excluidos del IVA.

### **2.6.3 Exención de aranceles (Artículo 13)**

Este beneficio aplica para los titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCE, respecto de la importación de:

- Maquinaria
- Equipos
- Materiales
- Insumos

Se exige destinación exclusiva a labores de preinversión e inversión en proyectos de FNCE, y ausencia de producción nacional, es decir que su único medio de adquisición esté sujeto a la importación.

### **2.6.4 Depreciación acelerada de activos (Artículo 14)**

La actividad de generación a partir de FNCE goza del régimen de depreciación acelerada, de la siguiente manera:

La depreciación acelerada será aplicable a las maquinarias, equipos y obras civiles necesarias para la preinversión, inversión y operación de la generación con FNCE, que sean adquiridos y/o construidos, exclusivamente para ese fin, a partir de la vigencia de la presente ley. Para estos efectos, la tasa anual de depreciación será no mayor de veinte por ciento (20%) como tasa global anual. La tasa podrá ser variada anualmente por el titular del proyecto, previa comunicación a la DIAN, sin exceder los límites señalados en el artículo 14 excepto en los casos en que la ley autorice porcentajes globales mayores. (Baker & McKenzie International 2014; IPSE 2014).



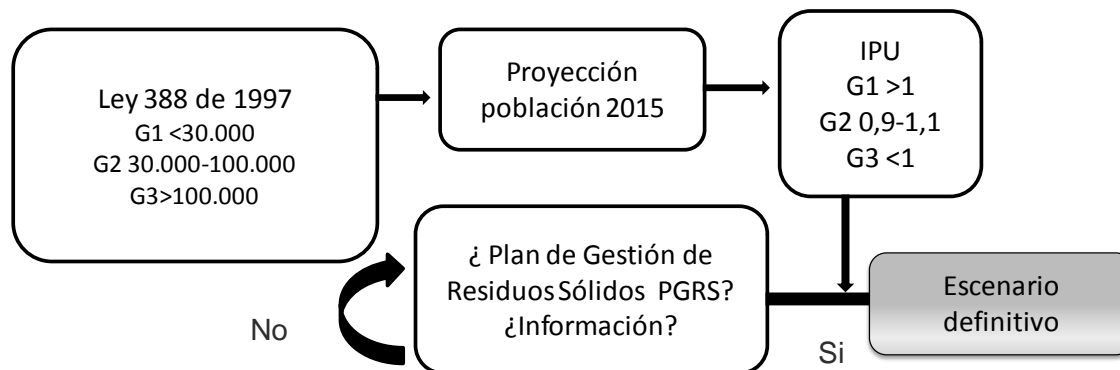
### 3. Metodología

El desarrollo de los objetivos ha requerido el planteamiento de tres etapas. La primera ha sido elaborada para la selección de los tres escenarios poblacionales bajo los cuales se realizó la investigación. La segunda indica el procedimiento para la selección de las tecnologías de conversión que aplican en cada escenario, así como la estimación del potencial energético, que puede obtenerse, desde cada una. La tercera consistió en la metodología para la evaluación de prefactibilidad. Esta última permitió tomar decisiones con respecto a la conveniencia de implementar alguna de las tecnología en los diferentes escenarios.

Para la selección de los escenarios poblacionales se establecieron tres grupos, tal como lo plantea la ley colombiana de ordenamiento territorial 388 de 1997, y los cuales están conformados por: Grupo 1 (G1) municipios con población menor a 30.000 habitantes, Grupo 2, (G2) municipios con población entre 30.000 y 100.000 habitantes, y Grupo 3, (G3) poblaciones con número de habitantes superior a 100.000. El número de habitantes por cada grupo, se tomó a partir de las proyecciones realizadas por el DANE, entidad encargada del procesamiento de la información, obtenida en el censo poblacional realizado en el año 2005 en todo el territorio nacional (Posada Hernandez 2010). Para cada grupo poblacional se evaluó la razón entre la población rural y la urbana. Esta razón se denomina Índice de Porcentaje Urbano (IPU). Para el G1 se clasificaron aquellos municipios con IPU superior a uno, indicando población predominantemente rural. Para el G2, se seleccionaron aquellos municipios con IPU superior a 0,9 e inferior a 1,1, es decir aquellos donde existe aproximadamente la misma proporción entre población urbana y rural. Para el G3, se centró la búsqueda en los municipios con un IPU inferior a uno, es decir aquellos donde existe predominio de la población urbana. La discriminación por grupos, aumenta la posibilidad de diversificar la cantidad y clase de residuos sólidos. En consecuencia, la posibilidad de involucrar varias tecnologías de conversión en cada escenario, para la posterior elección de la definitiva para cada uno. De los municipios clasificados por grupo, se procedió a la búsqueda de los respectivos Planes de Gestión

de Residuos Sólidos (PGRS). Fueron descartados los municipios que cuentan con información insuficiente, relativa a la composición física, fracción másica, cantidad y características de los RS. De igual forma aquellos que a la fecha no han desarrollado o no se tiene fácil acceso a su respectivo PGRS. Finalmente fue elegido, de cada grupo, como escenario aquel municipio con información completa y disponible de forma pública. La Figura 3-1 muestra la metodología general para el desarrollo de este objetivo.

Figura 3-1: Secuencia metodológica objetivo 1 Autor



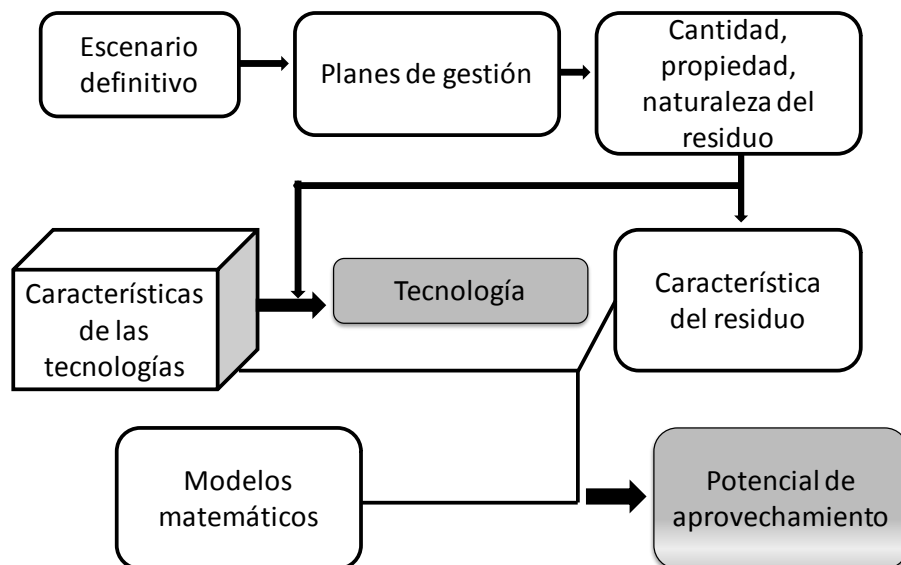
Una vez establecidos los tres escenarios definitivos, de sus respectivos PGRS, se realizó el análisis de la información relacionada con la cantidad de residuos sólidos generada, composición física y producción per cápita. Lo anterior ha de permitir la selección de las tecnologías de conversión de Residuos sólidos Urbanos (RSU), a energía eléctrica. Existe en cada escenario, una cantidad de habitantes, producción per cápita en (kg-Hab / día) y una variedad de RSU de tipo orgánico e inorgánico. De lo anterior, valorando las principales ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías, indicadas en la **Tabla 2-5**, fue posible recomendar las tecnologías adecuadas desde el punto de vista técnico.

El poder de aprovechamiento energético se calculó de acuerdo a los modelos matemáticos que se han indicado en el numeral 2.3. Estos están basados en la eficiencia de la tecnología, la masa, y el PCI, del RS (Corredor Becerra 2008; Ouda et al. 2015). La masa depende de la producción per cápita y esta última del número de habitantes de los diferentes escenarios poblacionales. El modelo empleado por Ouda para la incineración dado en la ecuación (2.1), depende del PCI del total los RS sólidos generados, orgánicos e inorgánicos. Los autores (Gómez, Zubizarreta, Rodrigues, Dopazo, & Fueyo, 2010) utilizan para la digestión anaerobia la ecuación (2.2) que depende del PCI del metano,

principal componente del biogás derivado de la fermentación de los residuos de origen orgánico. Para gas de relleno sanitario o digestión aerobia, (Mustafa, Mustafa, and Mutlag 2013) emplean la ecuación (2.3) de degradación. Para el caso de esta última ecuación y dada su complejidad, se utilizó la aplicación LandGEM para obtener la generación anual de metano. LandGEM se basa en una ecuación de degradación de primer orden para la cuantificación de las emisiones de la descomposición de los residuos en relleno sanitario.

Una vez conocido este valor de generación anual de metano, se empleó la ecuación (2.4) de (Cadena, Pérez, and Mora 2012), para estimar la cantidad de energía eléctrica. Ecuación que depende también del PCI del biogás debido al metano. En este trabajo se seleccionaron las ecuaciones y modelos previamente listados para cada uno de los escenarios estudiados. Los anteriores modelos se han descrito detalladamente en las sección del 2.3 de marco teórico. La información y estudios de referencia para la gasificación de residuos sólidos urbanos en escenarios poblacionales es escasa y no se tiene una expresión matemática para la estimación directa del poder de aprovechamiento energético. Sin embargo con base a la investigación realizada por (Luz et al. 2015) en Brasil, fue posible determinar cuanta cantidad de energía eléctrica es posible obtener desde RSU aplicando este modelo a los escenarios estudiados en este trabajo. En la Figura 3-2, se resume la secuencia metodológica para el desarrollo del segundo objetivo.

Figura 3-2: Secuencia metodológica objetivo 2 Autor



Para el desarrollo del objetivo 3, se realizó la evaluación de prefactibilidad valorando los costos de inversión. Estos se dividen principalmente en costos de inversión y costos de operación y de mantenimiento (O&M). Estos pueden observarse en la **Tabla 3-1** y en la **Tabla 3-2** para las diferentes tecnologías. El costo aproximado se tomó en base a referencias de la literatura para otros países. La digestión anaerobia, se encuentra en fase de implementación a escala piloto a nivel nacional (GICON 2016). Para conocer el costo preciso de inversión de las diferentes tecnologías, es necesario proporcionar al proveedor un estudio detallado de la caracterización físico - química de los residuos, además de otra información exacta tal como: ubicación del lote, precios fijos de compra de energía, previamente pactados con algún agente comercializador, operador de la planta e inversionista. Se debe tener en cuenta que este tipo de tecnologías gozan del beneficio de exención del IVA y aranceles según lo estipulado en los artículos 12 y 13 de la ley 1715. Aproximación con idea optimista suponiendo acceso a buenos incentivos.

En la columna observación de la **Tabla 3-1** y de la **Tabla 3-2** , se detallan los costos de inversión que debe incluir cada tecnología. Para gas de relleno se requiere de inversión en servicios de ingeniería así como estimación del costo inicial y mantenimiento de los sistemas de recolección de biogás, y equipos para la generación de electricidad mediante motor de combustión interna. Los beneficios de la evaluación de prefactibilidad fueron representados por la venta de electricidad, ingresos por tratamiento de tonelada recibida de residuos sólidos municipales y certificados de reducción de emisiones (CERs), obtenidos por las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Los ingresos por CERs no fueron considerados para incineración ya que desde este tecnología se libera cierta cantidad de CO<sub>2</sub> en el proceso (Tan et al. 2015). También han sido valorados los beneficios otorgados por la ley colombiana 1715, para la comercialización de electricidad desde Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER) tales como: Impuesto sobre la renta, exclusión del IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada de activos (Baker & McKenzie International 2014).

**Tabla 3-1:** Costos de inversión para las diferentes tecnologías Autor

| Tecnología | Observación                   | Costo Inversión             |
|------------|-------------------------------|-----------------------------|
|            | -Calderas de lecho fluidizado | 65.200 USD/T <sub>día</sub> |
|            | -Sistema térmico 55%          | (X. gang Zhao et al. 2016)  |

| Tecnología  | Observación   | Costo Inversión  |
|---|---|--|
| Incineración  | -Sistema de suministro de combustible 10%                             |  |
|   | -Sistema de manejo cenizas 3%   |  |
|   | -Suministro y sistema de tratamiento de agua 3%                       |  |
|   | -Sistema de limpieza de gases de combustión 15%                       |  |
|   | -Sistema eléctrico 4%   |  |
|   | -Sistema de control automático 6%                                     |  |
|   | -Otros 4%   |  |
|   |   | 1'200.000 USD/MW   |
|   | -Motor de combustión interna  | MW: potencia a instalarse<br>(Bove and Lunghi 2006)  |
| Gas de relleno sanitario                                    | -Sistema de colección de biogás                                       | 3'220.000 USD<br>(Z, F, and L 2012)  |
|   | -Ingeniería, registro y otros servicios profesionales                 | 300.000 USD<br>(Vicente L et al. 2014)   |
|   |   | $I(USD) = 101522$<br>$+ 3500 X$  |
| Digestión anaerobia   | -Total inversión  | I: Inversión en dólares<br>X: valor en KW a instalarse<br>(Farming futures 2016;<br>IDAE 2007; Local United<br>2016; Walla and<br>Schneeberger 2008) |
| Digestión anaerobia<br>(Planta híbrida a<br>Pequeña escala) | Planta eléctrica PP38P mas<br>Biodigestor de cúpula o<br>campana fija | 20.442,39 USD<br>(Palacio Suárez 2007)   |
|   | Galón ACPM  | 2,65 USD<br>(Palacio Suárez 2007)  |

**Tabla 3-2:** Costos de operación y mantenimiento para diferentes tecnologías Autor

| Tecnología   | Observación               | Costos O&M          |
|--------------|---------------------------|---------------------|
| Incineración | -Combustible auxiliar 31% |                     |
|              | -Productos químicos 7%    |                     |
|              | -Consumo de energía 3%    | 4% de la inversión  |
|              | -Consumo de agua 5%       | (Gómez et al. 2010) |
|              | -Costes laborales 14%     |                     |

| Tecnología               | Observación   | Costos O&M   |
|--------------------------|---|--|
|                          | -Mantenimiento 37%  |  |
|                          | -Protección laboral 3%  |  |
|                          |   | 17 USD/MWh   |
|                          | Motor de combustión interna (MCI)                                 | (Vicente L et al. 2014)  |
|                          |   | 100.000 USD /Año   |
| Gas de relleno sanitario | Operación   | (Vicente L et al. 2014)  |
|                          | Mantenimiento pozos de biogás                                     | 3% de la inversión en sistema de colección (Vicente L et al. 2014) |
| Digestión anaerobia      | Operación y mantenimiento anual (Aplica también a pequeña escala) | 16 % de la inversión (Gómez et al. 2010)                           |

Los costos para gasificación se han tomado de acuerdo al estudio de (Luz et al. 2015), dado que es escasa la información sobre costos de tecnologías para la gasificación de residuos sólidos urbanos a gran escala o en escenarios poblacionales. Según la producción diaria de residuos sólidos para los escenarios seleccionados en este estudio, se obtuvo un costo por concepto de equipos e instalación. Se ha indicado la generación diaria de residuos en 2020, último año de proyección de población DANE, dado que en este año existe mayor producción de residuos.

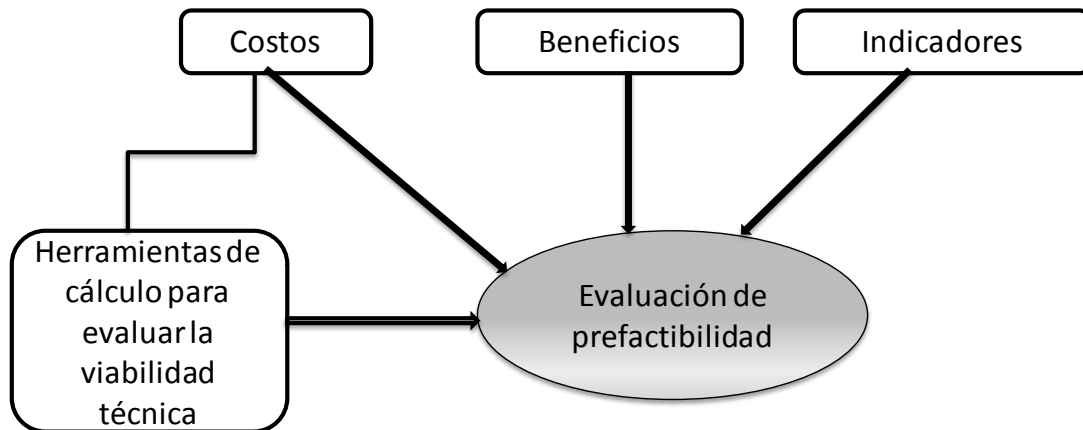
Para evaluar financieramente el proyecto fue necesario el cálculo de algunos indicadores financieros como el Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y periodo de recuperación de la inversión (payback). Para lo anterior se utilizó un valor para la tasa de descuento del 10%. La determinación de esta tasa, se hizo de acuerdo al modelo CAPM, (Sánchez 2010) y se explica en detalle en el anexo C. Se definió el periodo de análisis del proyecto igual a 25 años para cada caso. Para los años posteriores a 2020, se tomó una aproximación lineal de la tendencia del último año. Esta es en promedio igual al 0,7 % para diferentes poblaciones del país. Es posible determinar de 2020 en adelante el número de habitantes a través de un método matemático demográfico que depende de variables tales como nacimientos, defunciones y migraciones ocurridas

durante el periodo intercensal (DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas 2009). Dado que no se cuenta con dicha información se ha proyectado considerando el porcentaje de 0,7%.

Una vez realizado el estudio de prefactibilidad y conocido el valor de la TIR, decisivo para aceptar o rechazar las opciones tecnológicas, se tomó la decisión de seguir o abandonar el proyecto en cada uno de los escenarios pertenecientes a los grupos G1, G2 y G3. En la

Figura 3-3 se detalla la secuencia metodológica para el desarrollo del tercer objetivo.

Figura 3-3: Secuencia metodológica objetivo 3 Autor



## **4. Resultados**

### **4.1 Selección de escenarios poblacionales**

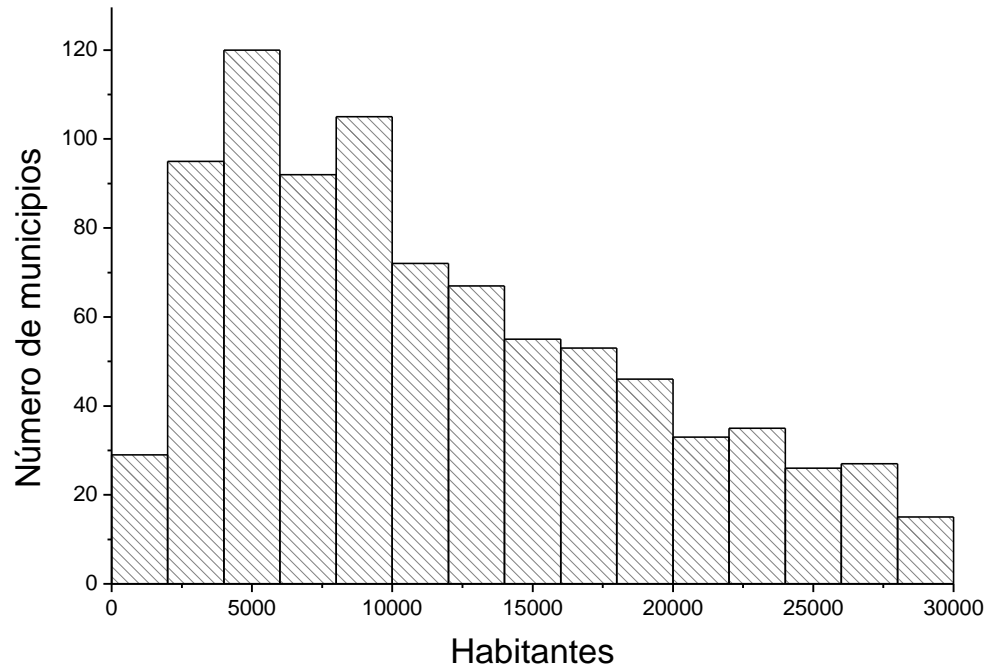
Los resultados obtenidos mediante la metodología empleada muestran la selección de un escenario por cada uno de los 3 grupos G1, G2 y G3. El 78% del total de municipios del país, cuenta con una población menor a 30.000 habitantes pertenecientes a G1. El 16,4% del total, se encuentra dentro del G2, el restante 5,6% de municipios, posee una población mayor a 100.000 habitantes.

#### **4.1.1 Escenario 1**

El Grupo 1 (G1), está conformado por 870 municipios menores a 30.000 habitantes. En la Figura 4-1 se muestra el histograma de municipios pertenecientes a G1. De este se puede observar que la mayoría de los municipios poseen entre 5.000 y 10.000 habitantes, y por lo tanto allí se concentra la mayor parte de la población. Alrededor del 52% de los municipios se caracteriza por poseer un número de habitantes menor a los 10.000. En el anexo A se listan los municipios pertenecientes a G1 y se resaltan las poblaciones con IPU mayor a 1. El número de poblaciones con número de habitantes superior a 10.000 decrece o sea hace menos frecuente a medida que estas se aproximan a los 30.000 tal como se observa en la misma figura. Las pequeñas poblaciones son más frecuentes y en ellas existe una producción per cápita de residuos sólidos importante. En la Figura 4-2 se muestran los IPU para los municipios pertenecientes al G1. El predominio de la población rural se puede observar mediante valores de IPU superiores a 1.

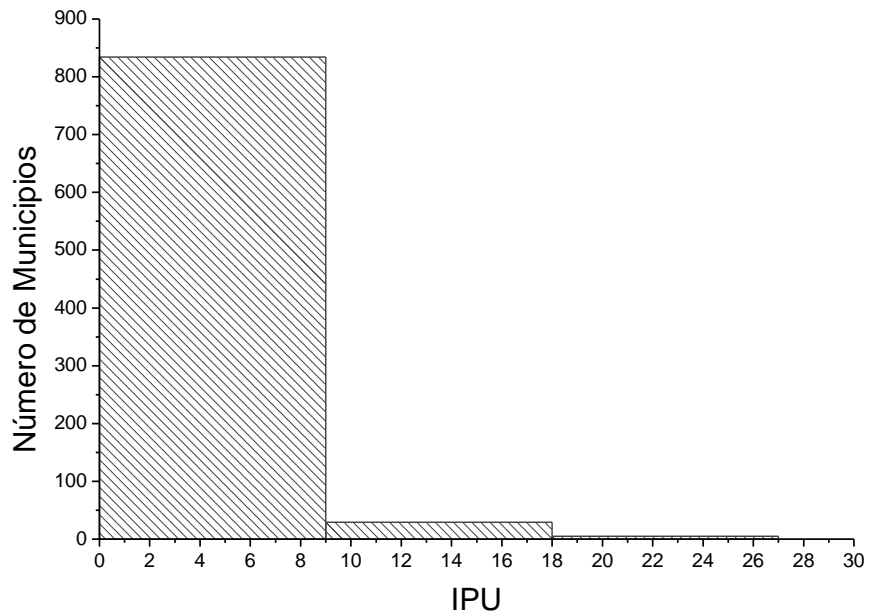


Figura 4-1: Histograma para las poblaciones del G1 Autor



Un total de 470 municipios son menores a 10.000 habitantes, y 357 además de lo anterior, poseen un IPU superior a 1. De estos 357 municipios, se encontró que Guayatá, Pinchote y Villa Caro, reportan información suficiente acerca de las características de los RS producidos. Esta se encuentra dentro de su Plan de Gestión de Residuos Sólidos, por lo tanto fueron seleccionados preliminarmente para realizar el análisis. La revisión detallada de la información disponible, en estos tres últimos, indicó que el PGRS de Guayatá con un IPU de 2,94 es el más completo y por lo tanto fue seleccionado como escenario definitivo. Además de la composición física y fracción másica, muestra el valor de la producción per cápita de RS, en las zonas urbana y rural.

Figura 4-2: IPU para los municipios pertenecientes al G1 Autor



### 4.1.2 Escenario 2

El grupo G2 está conformado por 183 municipios de los cuales 15 poseen un IPU entre 0,9 y 1,1. En la Figura 4-3 se muestra la cantidad con relación al número de habitantes de cada municipio perteneciente al Grupo 2. La mayor cantidad de estos se concentra entre 30.000 y 50.000 habitantes (117 municipios). Se observa un decrecimiento en la frecuencia a partir de 50.000 habitantes y a medida que se acercan a 100.000.

De los 15 municipios con IPU entre 0,9 y 1,1, únicamente se encontró información oficial suficiente sobre la composición física, fracción másica y producción per cápita de los RS generados en el municipio de Andes con un IPU de 1,02, perteneciente a la región suroeste del departamento de Antioquia, caracterizada por la explotación minera del carbón. El listado inicial de los 183 municipios puede observarse en el anexo A. Allí se muestran las poblaciones en 30.000 y 100.000 habitantes y se resaltan aquellas con IPU entre 0,9 y 1,1. En la Figura 4-4 se muestran los IPU para los municipios pertenecientes al G2.

Figura 4-3: Histograma para las poblaciones del G2 Autor

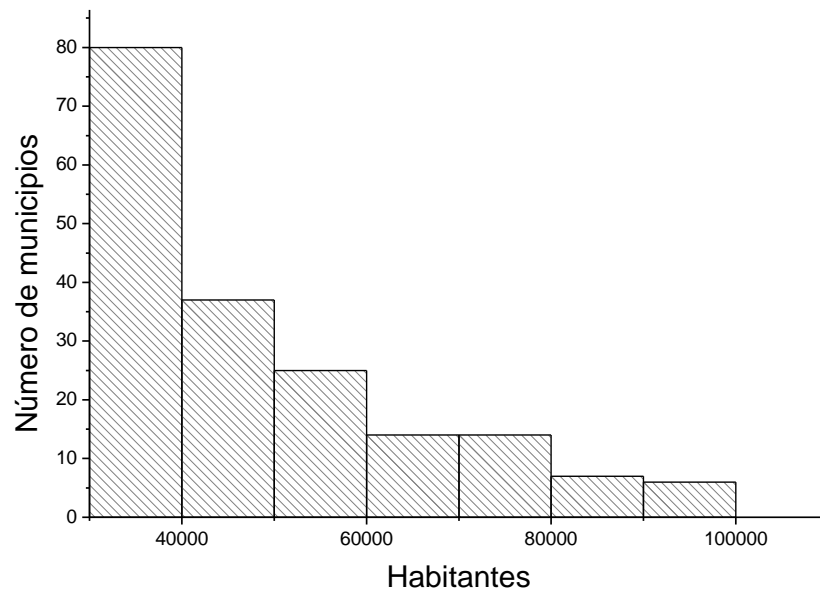
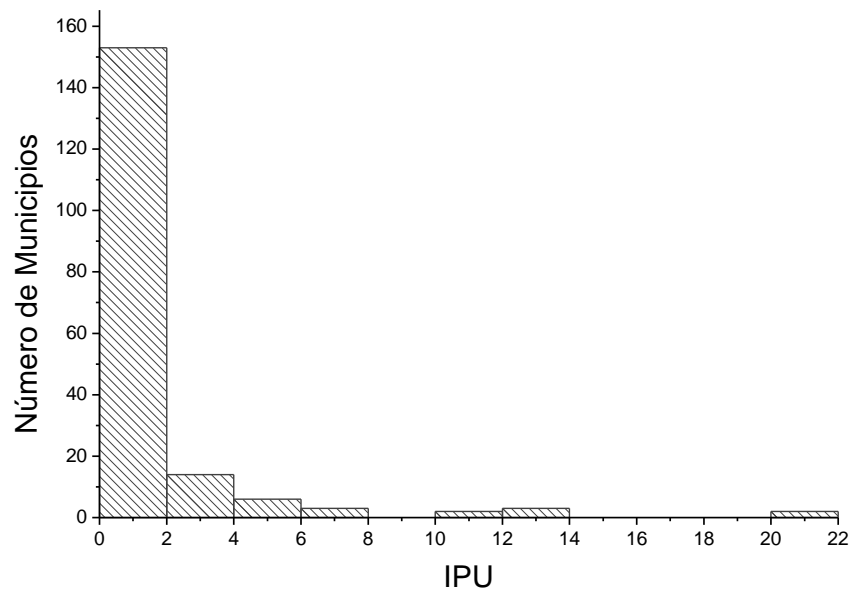


Figura 4-4: IPU para los municipios pertenecientes al G2 Autor



### 4.1.3 Escenario 3

El grupo G3 lo conforman 62 municipios. De este grupo 58, poseen un IPU inferior a 1. El histograma para este conjunto, se muestra en la Figura 4-5. De este último se observa que la mayoría de las poblaciones se encuentran en el rango comprendido entre 100.000 y un millón de habitantes. Bogotá, Barranquilla, Cali, Cartagena y Medellín poseen un número de habitantes superior a un millón. Se obtuvo información suficiente sobre la composición física, fracción másica y producción per cápita de los RS generados en Pasto y Pereira. Finalmente se ha elegido Pasto con IPU de 0,2 por poseer PGRS completo. El resto de los municipios con IPU menor que 1, posee información sobre sus PGRS escasa o no se encuentra publicada oficialmente. En el anexo A se listan los municipios pertenecientes a G3 y se resaltan las poblaciones con IPU inferior a 1. En la Figura 4-6 se muestran los IPU para los municipios pertenecientes al G3.

Figura 4-5: Histograma para las poblaciones del G3 Autor

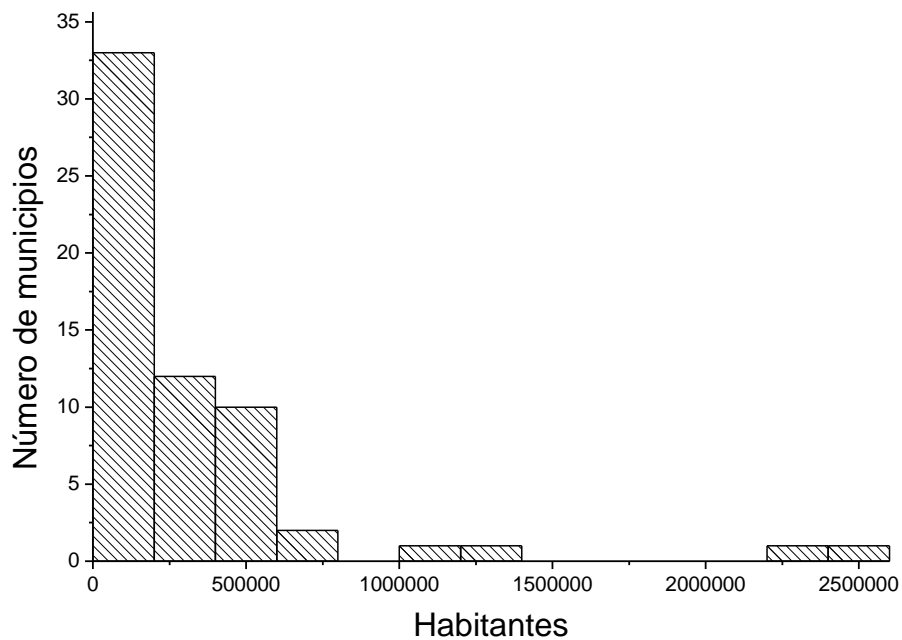
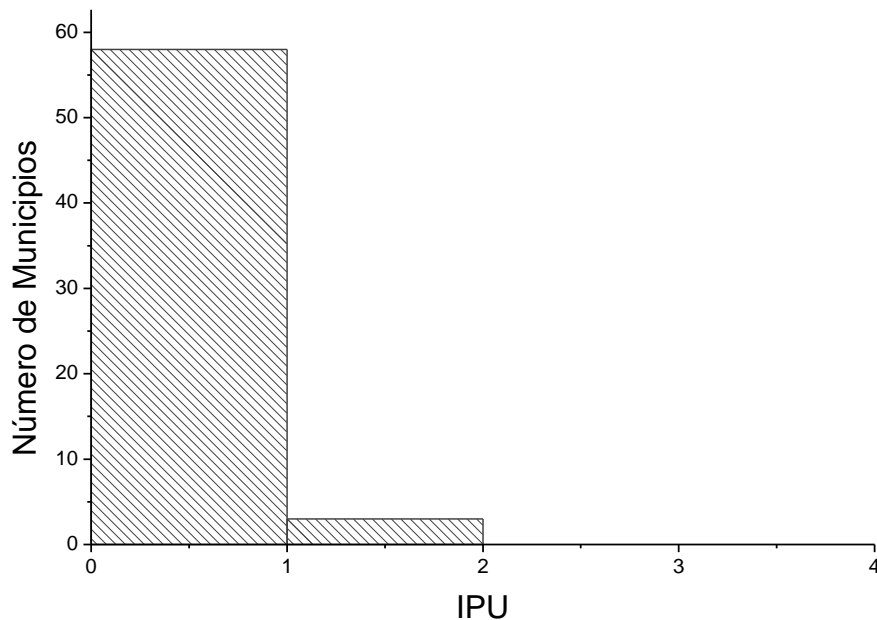


Figura 4-6: IPU para los municipios pertenecientes al G3 Autor



## 4.2 Características de los escenarios poblacionales

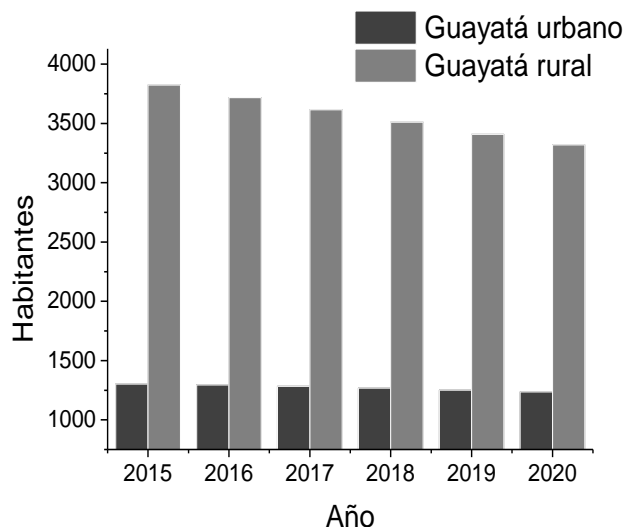
### 4.2.1 Municipio de Guayatá

Es un municipio colombiano situado en el extremo sur oriental de departamento de Boyacá a  $04^{\circ}56'$  de latitud norte,  $73^{\circ}30'$  longitud oeste del meridiano de Grenwich y  $0^{\circ}35'$  de longitud con relación al meridiano de Bogotá. Para 2015 se contaba con 5.126 habitantes. Sirve de límite entre Boyacá y Cundinamarca, pertenece al Valle de Tenza, provincia de Oriente. Limita por el Norte con Guateque (5,7 km), por el Oriente con Somondoco (12,7 km) y Chivor (2,6 km), por el Occidente con Manta, por el Sur con Gachetá y Ubalá (Cundinamarca 31,5 km) (Municipio de Guayatá 2008).

La composición y PCI de los residuos generados allí, se puede observar en la **Tabla 4-1**. La fracción aprovechable, así como la generación per cápita (PP) de residuos reportada en su plan de gestión de residuos sólidos se puede apreciar en la **Tabla 4-2**. La proyección de la población para el periodo 2015-2020 se puede observar en la Figura 4-7. Se ha considerado este periodo de tiempo ya que solo se dispone de proyecciones de población hasta el 2020. Se prevé para el municipio de Guayatá un ligero descenso

tanto en la población urbana como rural durante el mismo periodo de tiempo. Estas proyecciones se han derivado del censo poblacional realizado en el año 2005.

Figura 4-7: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor



#### 4.2.2 Municipio de Andes

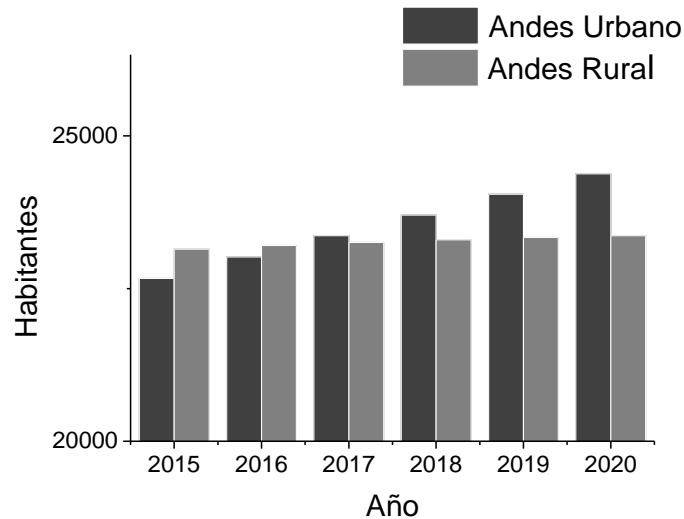
Es un municipio colombiano perteneciente al departamento de Antioquia. Su cabecera está localizada a los 05°39' de latitud norte y 75°52' de longitud oeste con un perímetro urbano de 148 hectáreas. Para 2015 se contaba con un total de 45.814 habitantes. Limita por el norte con los municipios de Betania, Hispania y Pueblo Rico, por el este con Jericó y Jardín, por el sur con el departamento de Risaralda, municipio de Mistrató y por el oeste con el departamento de Chocó, municipio de Bagadó (Alcaldía de Andes 2016).

La composición y PCI de los residuos generados allí, se puede observar en la **Tabla 4-1**. La fracción aprovechable, así como la generación PP de residuos reportada en su plan de gestión de residuos sólidos se puede apreciar en la **Tabla 4-2**. Para este municipio no se dispone de indicador de producción PP para la zona rural. Se conoce de los planes de gestión de residuos de Guayatá, Sabaneta y Medellín, que estos valores son de 0,3, 0,28, y 0,27 kg/Hab-día, respectivamente. Dado que es un valor semejante, para municipios con diferente cantidad de habitantes, el valor se ha tomado igual al promedio de los reportados, es decir 0,28.

La proyección para el periodo 2015-2020 se puede observar en la Figura 4-8. El crecimiento de la población para la zona urbana es de casi 1.700 habitantes y para la

zona rural es de aproximadamente unos 220 habitantes, durante el mismo periodo. Lo anterior es un indicador positivo ya que aumenta la expectativa de producción de residuos sólidos y por lo tanto la producción de energía eléctrica.

Figura 4-8: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor



### 4.2.3 Municipio de Pasto

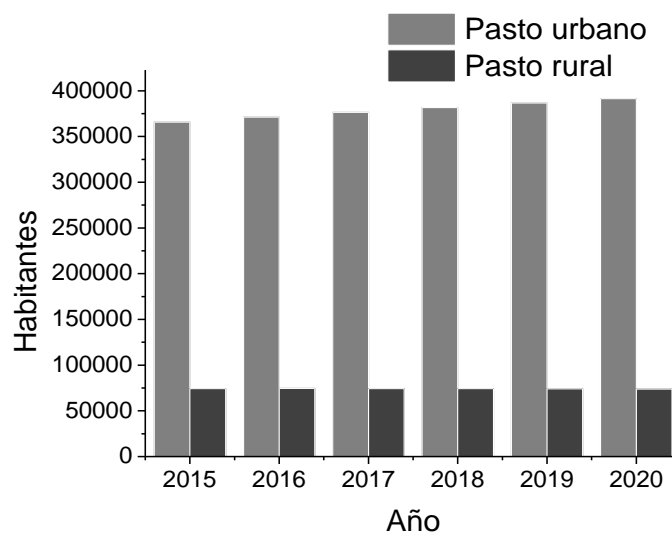
Pasto es un municipio colombiano, capital del departamento de Nariño. La cabecera municipal tiene el nombre de San Juan de Pasto. Está situado en el suroccidente de Colombia, a los 01°12' de latitud norte y 77°16' de longitud oeste en medio de la Cordillera de los Andes, en el macizo montañoso denominado nudo de los Pastos, Valle de Atriz, al pie del Volcán Galeras y muy cercano a la línea del Ecuador. Para 2015 se contaba con un total de 440.040 habitantes. El área urbana está dividida en 12 comunas. La zona rural está compuesta por 17 corregimientos: Buesaquillo, Cabrera, Catambuco, El Encano, El Socorro, Genoy, Gualmatán, Jamondino, Jongovito, La Caldera, La Laguna, Mapachico, Mocondino, Morasurco, Obonuco, San Fernando y Santa Bárbara (Alcaldía de Pasto 2016).

La composición y PCI de los residuos generados allí, se puede observar en la **Tabla 4-1**. La fracción aprovechable, así como la generación PP de residuos reportada en su plan de gestión de residuos sólidos se puede apreciar en la **Tabla 4-2**. Para este municipio no se dispone de indicador de producción PP para la zona rural. Se conoce de los planes de

gestión de residuos de Guayatá, Sabaneta y Medellín, que estos valores son de 0,3, 0,28, y 0,27 kg/Hab-día, respectivamente. Dado que es un valor semejante, para municipios con diferente cantidad de habitantes, el valor se ha tomado igual al promedio de los reportados, es decir 0,28.

La proyección para el periodo 2015-2020 se muestra en la Figura 4-9. Este municipio presenta un crecimiento poblacional de alrededor de 26.000 habitantes en zona urbana, durante el mismo periodo. En zona rural no se presenta crecimiento significativo y la tendencia es a mantenerse constante el número de habitantes. Estas proyecciones se han derivado del censo poblacional realizado en el año 2005.

Figura 4-9: Población proyectada para el periodo 2015-2020 Autor





**Tabla 4-1:** Poder calorífico inferior y fracción másica de residuos en los tres escenarios Autor

| Composición                  | PCI de referencia [MJ/kg] | Guayatá fracción másica[%] (Mpio de Guayatá 2015) | Andes fracción másica [%] (Arroyave Tobón 2005) | Pasto fracción másica[%] (Guerrero 2006) |
|------------------------------|---------------------------|---|---|--|
| Papel y cartón               | 15,6                      | 12,4  | 7,94  | 8,31                                     |
| Residuos mixtos de alimentos | 4,6                       | 51,4  | 60,71   | 70                                       |
| Plástico mixto               | 32,4                      | 12,7  | 2,16  | 8,57                                     |
| Textiles                     | 18,4                      | 0,7   |   | 1,41                                     |
| Madera                       | 15,4                      | 1,2   |   | 0,73                                     |
| Total PCI [MJ/kg]            |                           | 8,73  | 4,73  | 7,66                                     |

**Tabla 4-2:** Producción de residuos PP en los tres escenarios Autor

| Producción per cápita       | Guayatá | Andes | Pasto |
|-----------------------------|---------|-------|-------|
| Urbana [kg/Hab-día]         | 0,479   | 0,483 | 0,55  |
| Rural[kg/Hab-día]           | 0,3     | 0,28  | 0,28  |
| Total masa aprovechable [%] | 78,4    | 70,81 | 89,02 |

### 4.3 Selección de las tecnologías de conversión de residuos sólidos a energía

La selección de las tecnologías ha sido dividida en dos secciones: tecnologías de conversión térmica y biológica, dado que son procesos técnicamente diferentes.

#### 4.3.1 Tecnologías de conversión térmica

Dentro de estas tecnologías se incluyen: la incineración, y gasificación. Para el escenario 1, municipio de Guayatá, de 5.126 habitantes, existe baja producción total de residuos (1,74 T/día) lo que dificulta la adquisición de este tipo de tecnologías. Por otro lado los costos de operación y mantenimiento son altos y la eficiencia global de una pequeña central eléctrica bajo dichos procesos es baja (Kalyani and Pandey 2014). Para Andes y Pasto con 45.184 y 440.040 habitantes respectivamente, ambas tecnologías son aplicables. Estos municipios producen actualmente 17,62 y 225 T/día de residuos. Según estudio de (Luz et al. 2015) la gasificación se puede implementar a partir de 3,0 T/día. Se conoce además del estudio de (X. gang Zhao et al. 2016) que a partir de 100 T/día es

posible implementar la incineración. Las dos tecnologías requieren alimentación continua de RS y pueden ser ubicadas dentro de los respectivos municipios, con el fin de evitar costos de transporte.

Del análisis anterior se puede concluir que este tipo de tecnologías para las poblaciones estudiadas del G2 y G3 pueden aplicar, mientras que para Guayatá grupo G1 pueden existir problemas de transferencia y escalabilidad de tecnología. La capacidad de producción diaria de residuos en dicha población es muy inferior a la reportada en otros procesos a nivel mundial (Abd Kadir et al. 2013; Abu-Hijleh et al. 1998; Estrada Wiechers 2015; Khan and Tanveer 2012; Poletto Filho 2008; X. gang Zhao et al. 2016)

### **4.3.2 Tecnologías de conversión biológica**

La digestión anaerobia y el gas de relleno sanitario (digestión aerobia) pueden ser aplicables a los tres escenarios puesto que en cada uno más de la mitad del total de residuos producidos son de origen orgánico. Además de lo anterior, para el caso de la digestión anaerobia, se conoce de tecnologías que pueden ser implementadas para generar energía eléctrica a pequeña escala (30 kW). Esta tecnología, posee beneficios ambientales positivos tales como el control de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para el escenario 1, Guayatá, eminentemente rural, podría recuperarse mayor energía si además se valoran otro tipo de residuos derivado de las actividades agropecuarias por ejemplo estiércol de aves, porcino, vacuno, etc.

El gas de relleno sanitario o digestión aerobia, representa una opción de bajo costo que podría aprovechar terrenos poco productivos para convertirlos en áreas útiles y de allí recolectar el gas para la generación de energía eléctrica. Según el estudio de (Vicente L et al. 2014), esta tecnología puede ser aplicada a poblaciones a partir de los 100.000 habitantes. Aunque no existen casos específicos de referencia para poblaciones menores a este valor, se espera que el crecimiento poblacional, aumente la generación de residuos en el municipio de Andes y por esta razón se ha seleccionado como posible tecnología de conversión para este municipio.

Del análisis anterior se puede concluir que la digestión anaerobia, para las tres poblaciones de estudio, es viable técnicamente porque puede ser implementada a pequeña y gran escala. Lo que posibilita su fácil adquisición para la producción de

energía eléctrica. Para el escenario 1, municipio de Guayatá, de 5.126 habitantes, no es viable técnicamente el gas de relleno sanitario o digestión aerobia debido a la baja producción de residuos (1,74 T/día).

Las tecnologías antes mencionadas existen comercialmente y se fabrican e importan bajo pedido especial. Es decir no se encuentran valores estándares fijos de capacidad. Para la selección de la capacidad y para conocer las condiciones comerciales, el proveedor debe conocer detalles de la caracterización física química del residuo sólido, la cantidad y otros detalles derivados de un estudio de factibilidad

La empresa Hitachi Zosen Inova con sede en Zúrich, Suiza, es un líder mundial en soluciones de transformación de residuos en energía y material. Posee más de 500 proyectos de referencia en todo el mundo que emplean la transformación térmica de residuos en energía a través de sistemas de hasta 1000 T/día, hechos a medida, con calderas de recuperación de energía (de 2 a 5 pasos) y parámetros de vapor adaptados. Esta empresa también ofrece soluciones para la transformación de residuos de origen orgánico en biogás, a través de la digestión anaerobia seca con sistema Kompogas

La empresa GICON de origen alemán es fabricante y exportador de tecnologías de digestión anaerobia. Actualmente se conoce de un proyecto piloto en el municipio de Chigorodó Antioquia denominado Chicón. Este tiene como objetivo producir 500kW eléctricos a partir de 15.000 T/año de residuos orgánicos. Para este proyecto se tiene un rendimiento de 133 m<sup>3</sup> de biogás por tonelada de residuos (m<sup>3</sup>/T) (GICON 2016; Hitachi Zosen Inova 2016).

## **4.4 Estimación del potencial de aprovechamiento energético**

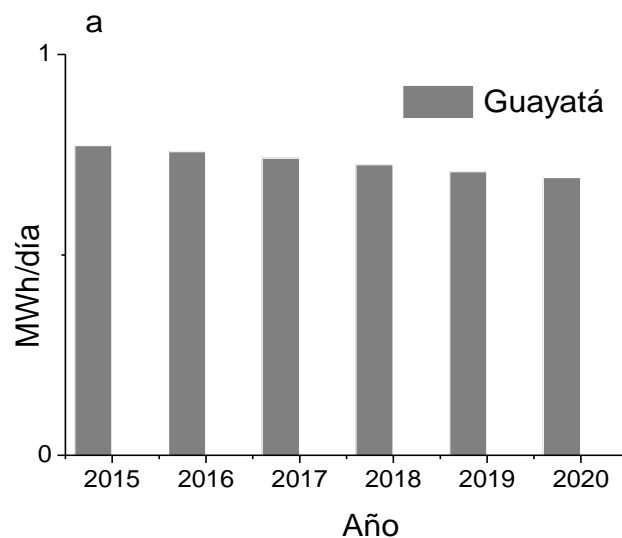
### **4.4.1 Incineración**

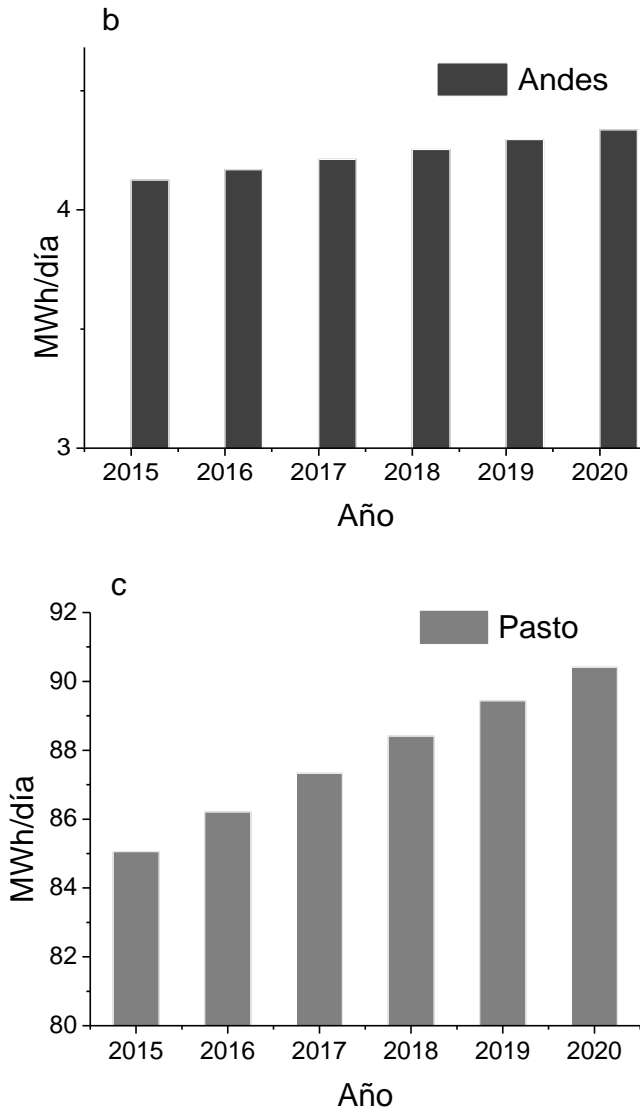
Para estimar el Potencial de Aprovechamiento Energético (PAE) desde la incineración, se ha calculado el PCI de los RS generados en los tres escenarios, estos valores se muestran en la **Tabla 4-1** de la sección 4.2. Se ha considerado el valor de PCI reportado por (Themelis et al. 2013) para cada tipo de residuo. Este valor de PCI de los RS ha sido empleado para estudios en otras ciudades de Latinoamérica tal como se mencionó en la

sección 2.2 del marco teórico. La mayor parte de los residuos proviene de orgánicos biodegradables, seguido de los plásticos o papel y cartón.

La Figura 4-10 muestra la producción diaria de energía eléctrica a partir de la incineración, aplicando el modelo descrito en la sección 2.3.1. La población que tiene un potencial de aprovechamiento energético mayor es el municipio de Pasto con 90,41 MWh/día, seguida de Andes con 4,34 MWh/día y Guayatá con 0,69 MWh/día en 2020. Para este último municipio, se ha calculado el potencial para mostrar su baja producción de energía desde la misma tecnología. La producción de energía es directamente proporcional al número de habitantes y aumenta o disminuye de acuerdo con el crecimiento o decrecimiento poblacional proyectado.

Figura 4-10: Producción de energía eléctrica a partir de incineración 2015-2020 Autor





### 4.4.2 Gasificación

Para el cálculo del potencial de aprovechamiento energético desde la gasificación, se ha tomado como referencia el estudio Análisis técnico-económico de la gasificación de residuos sólidos urbanos para la generación de energía eléctrica en Brasil (Luz et al. 2015) realizado en diferentes escenarios poblacionales con determinado número de habitantes. La producción per cápita en las poblaciones de Brasil y del presente estudio es diferente. A pesar de lo anterior, la fracción másica de residuos sólidos para Brasil sin algún tipo de pretratamiento es muy semejante a la de los escenarios objetivos del presente estudio. Para las poblaciones de Guayatá, Andes y Pasto en 2020, se tiene proyectada una producción de residuos por día equivalente a 1,59, 18,33 y 236 T/día

respectivamente. A partir del estudio, se determinó que no hay una capacidad sustancial para una producción de residuos menor a los 3,0 T/día. De acuerdo a la producción diaria de residuos en Andes y Pasto, es posible obtener alrededor de 180 KW y 3400 kW de potencia respectivamente. En la **Tabla 4-3** se resumen la potencia, energía desde gasificación para Andes y Pasto.

**Tabla 4-3:** Potencia instalada aproximada a partir de gasificación Autor

| Escenario | Potencia instalada (Gasificación)<br>kW | Energía eléctrica<br>MWh/día | Cantidad de residuos<br>2020<br>T/día |
|-----------|---|------------------------------|---------------------------------------|
| Andes     | 180                                     | 4,32                         | 12,98                                 |
| Pasto     | 3400                                    | 81,6                         | 236                                   |

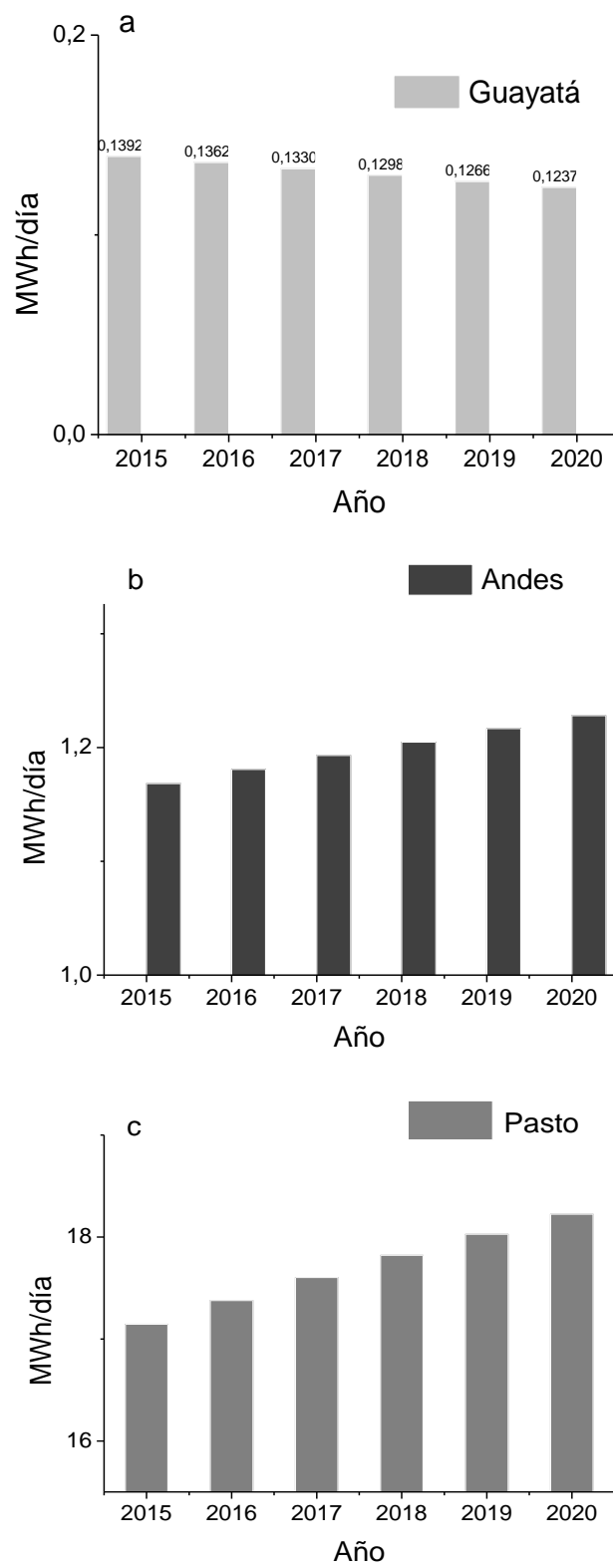
#### 4.4.3 Digestión anaerobia

En la **Tabla 4-4** se indican los valores considerados para cada escenario, estos se requieren para evaluar el la ecuación (2.2) para la estimación del potencial de aprovechamiento energético. En la Figura 4-11 se detalla la energía eléctrica generada desde el proceso de digestión anaerobia para el periodo 2015-2020. Se ha considerado este periodo de tiempo ya que solo se dispone de proyecciones de población hasta el 2020. Se observa para las poblaciones de Andes y Pasto que la producción de energía aumenta anualmente llegando a generar hasta 1,23 y 18,25 MWh/día para el 2020 respectivamente. La producción para el municipio de Guayatá es baja y oscila entre 0,12 y 0,14 MWh/día para el periodo de tiempo establecido 2015-2020. El PCI del biogás para evaluar los modelos matemáticos a partir de las tecnologías de conversión biológica, fue de 5,9748 kWh/m<sup>3</sup> (21,51 MJ/m<sup>3</sup>) según el estudio de (Cadena, Pérez, and Mora 2012).

**Tabla 4-4:** Parámetros para la evaluación del modelo de digestión anaerobia Autor

| Parámetro         | Unidad             | Guayatá | Andes  | Pasto  | Observación  |
|-------------------|--------------------|---------|--------|--------|--|
| f                 |                    | 0,51    | 0,61   | 0,70   | <b>Tabla 4-1</b><br>(Murphy and<br>McCarthy<br>2005) |
| M <sub>FORS</sub> | m <sup>3</sup> /T  | 71,04   | 71,04  | 71,04  |  |
| η                 |                    | 0,26    | 0,26   | 0,26   |  |
| Q                 | KWh/m <sup>3</sup> | 5,9748  | 5,9748 | 5,9748 |  |

Figura 4-11: Producción de energía eléctrica a partir de digestión anaerobia 2015-2020  
 Autor



#### **4.4.4 Gas de relleno sanitario (digestión aerobia)**

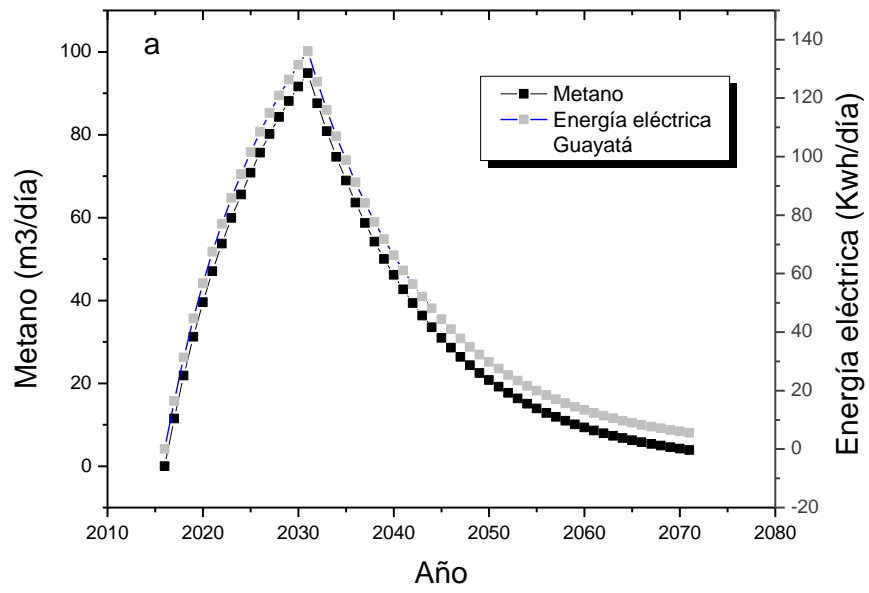
Para determinar la producción promedio diaria de metano  $Q_{CH_4}$ , en el caso de gas de relleno sanitario, se ha utilizado la aplicación LandGEM. Los parámetros ambientales  $k$  y  $L_0$  se han tomado como referencia de los estudios de Ordoñez en Colombia (Ordoñez Ordoñez 2011) y Scarlat en África (Scarlat et al. 2015). Estos reportan un valor de  $k=0,08$  y  $L_0= 84$  respectivamente. Ambos parámetros correspondientes a una precipitación anual mayor a 1.000 mm/año (Panesso, Cadena, and Ordoñez 2012). En Colombia el promedio de precipitaciones anuales es del orden de 3.240 mm (Bancomundial 2016).

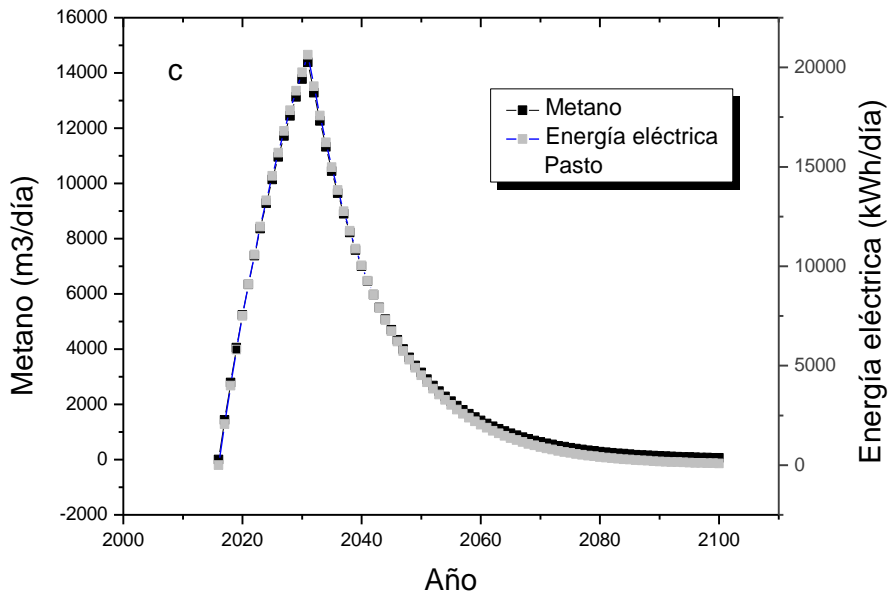
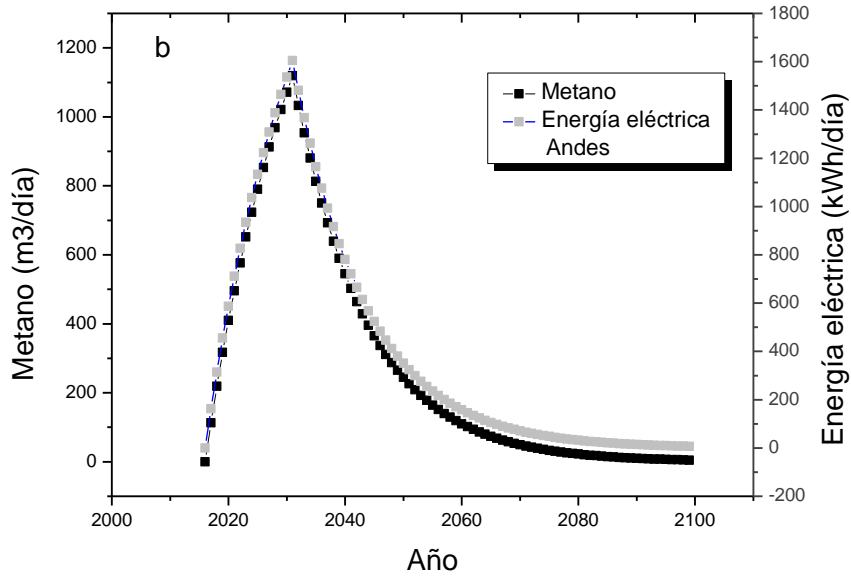
Con la producción PP de residuos y el total de habitantes, se ha calculado el total de residuos sólidos generados desde 2016 hasta 2030 en cada escenario, es decir vida útil del relleno de 14 años. La producción promedio diaria de metano, así como de energía eléctrica, calculada a partir de la misma ecuación, para esta tecnología, se muestran en la Figura 4-12. Allí se observa para los tres escenarios un valor máximo de producción de metano y energía eléctrica para el 2031 año después de la clausura del relleno sanitario en 2030. Desde el año de apertura y hasta 2031 se observa aumento continuo, tanto de la producción de metano, como energía eléctrica. A partir del mismo año, la generación de metano y energía eléctrica, diaria promedio, decrecen de manera proporcional hasta llegar a un valor de cero en el año 2100 para los municipios de Andes, Pasto y año 2070 para Guayatá. Para ningún escenario, la producción de energía eléctrica es constante siendo esta su principal desventaja técnica.

El valor máximo de energía eléctrica que puede obtenerse para 2031 es de 136 kWh/día, 1.605 kWh/día y 20.632 kWh/día para Guayatá, Andes y Pasto, respectivamente. Esta producción depende de manera directa de la cantidad de metano que puede recuperarse desde los residuos depositados en el relleno sanitario. Desde esta tecnología se obtiene menos generación de energía con respecto a la digestión anaerobia para el periodo 2015-2020. Esta última aunque depende también de la masa orgánica de los residuos, se desarrolla bajo condiciones controladas de temperatura y ausencia de oxígeno. Se ha considerado el periodo de tiempo 2015-2020 ya que solo se dispone de proyecciones de población según DANE hasta el año 2020.



Figura 4-12: Producción de metano y energía eléctrica a partir de gas de relleno sanitario 2016-2020 Autor





#### 4.5 Análisis económico

Una vez obtenida la producción de energía para cada escenario, según cada tecnología, se realizó la evaluación del flujo de caja. Se han considerado 4 casos. Lo anterior con el objetivo de incluir los beneficios que ofrece la ley 1715 de 2014 y mostrar su impacto en la Tasa Interna de Retorno TIR. El caso 1 se tomó como base y representa las

condiciones típicas de una inversión. Este no incluye los beneficios de la ley, pero sí préstamo a 10 años por un valor igual al 50% de la inversión y 8% de interés anual. Para este caso fueron incluidos los costos por abono al capital e intereses sobre el préstamo. El interés anual se ha fijado de acuerdo a un reciente comunicado (octubre de 2016), en el cual la junta directiva del banco de la República, decide mantener una tasa de interés de intervención del 7,75%. La misma junta informa que la inflación anual al consumidor y el promedio de las medidas de inflación básica disminuyeron y se situaron en 6,48% y 6,03%, respectivamente. (Banco de la República 2016). El caso 2 no incluye préstamo, ni beneficios otorgados por la ley. El caso 3 no incluye préstamo, pero sí depreciación acelerada a 5 años. El caso 4 se trata del mismo caso 3, más deducción en el primer año de hasta el 50% del valor de la inversión. En la **Tabla 4-5** se muestra el resumen de los 4 casos mencionados anteriormente.

**Tabla 4-5:** Resumen de casos considerados para los flujos de caja Autor

| Caso | préstamo | Depreciación acelerada | Deducciones |
|------|----------|------------------------|-------------|
| 1    | Sí       | No                     | No          |
| 2    | No       | No                     | No          |
| 3    | No       | Sí                     | No          |
| 4    | No       | Sí                     | Sí          |

El valor por la venta de electricidad, se ha fijado en 50 USD/MWh (UPME 2016). La comercialización de la energía se realizará mediante contratos regulados de compra y venta de la electricidad. Un organismo comercializador comprará la energía o podrá gestionar contratos bilaterales entre generadores y proveedores. El estudio: Análisis tecno económico de la gasificación de los residuos sólidos urbanos para la generación de electricidad en Brasil, propone ingresos a través de la venta de energía eléctrica mediante contratos (Luz et al. 2015). Con este tipo de contratos lo que se estima es un precio fijo de venta, lo cual sería una buena aproximación, para realizar el análisis económico. En bolsa es posible encontrar mejor rendimiento económico, sin embargo sería complejo evaluar cuanto se puede obtener para un estudio de prefactibilidad.

Algunos países del continente europeo poseen una estructura de incentivos para fomentar o fortalecer la participación de generación de electricidad por fuentes de energía renovable apoyada en planes gubernamentales y un marco normativo responsable y protector de la industria, tanto en beneficios económicos como en riesgos financieros. Estos incentivos se dan bajo el esquema denominado Feed-in tariff, cuyo objetivo es ofrecer una compensación basada en los costos para los productores de energía renovable, proporcionando contratos a largo plazo para los mismos productores, por lo general basados en el costo de generación de cada tecnología (Ramli and Twaha 2015).

Los ingresos por tratamiento de tonelada recibida de residuos sólidos municipales o tipping fee se han fijado en 10 USD/T (Emvarias-grupo EPM 2016), valor promedio cobrado por las empresas prestadoras de servicio de aseo, por disposición final de residuos. Los ingresos por certificados de reducción de emisiones (CERs), obtenidos por las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se han asumido iguales a 0.51 USD/TCO<sub>2</sub> (Commodity Exchange Bratislavava 2016). Las Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente se han calculado de acuerdo al volumen anual de biogás, calculado a través de la aplicación LandGEM, para gas de relleno sanitario en cada escenario. Según el estudio de (Murphy and McKeogh 2004) un m<sup>3</sup> es equivalente a 9.19 kgCO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta que el metano es un gas 21 veces más nocivo que el dióxido de carbono. Para digestión anaerobia no se tiene referencia de kgCO<sub>2</sub> por unidad de volumen, por lo tanto se toma la misma referencia del caso anterior, es decir 9.19 kgCO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de biogás. Este valor es el correspondiente al biogás liberado directamente a la atmósfera sin tener en cuenta la combustión del mismo. De ahí la diferencia con la combustión del biogás la cual libera a la atmosfera 1,96 Kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Para esta tecnología en este estudio se tiene que una tonelada de residuos produce 71 m<sup>3</sup> de biogás (Murphy and McCarthy 2005) tal como se ha explicado en el numeral 2.3.2. Algunos parámetros de cálculo por tecnología, considerados en el análisis económico se resumen en la **Tabla 4-6**, **Tabla 4-7** y **Tabla 4-8**

**Tabla 4-6:** Parámetros de análisis económico para la incineración Autor

| Parámetros            | Valores                        | Referencias                |
|-----------------------|--------------------------------|----------------------------|
| Capacidad             | 300 T/día                      |                            |
| Préstamo              | 50%                            |                            |
| Tasa de interés anual | 8% (10 años)                   | (X. gang Zhao et al. 2016) |
| Factor de planta      | 0.80                           | (Estrada Wiechers 2015)    |
| Poder calorífico      | 4,73 y 7,66 MJ/kg <sup>2</sup> |                            |
| Coincineración        | 250 kg carbón/T <sub>RS</sub>  | (Y. Zhao et al. 2012)      |
| Eficiencia eléctrica  | 18%                            | (Vicente L et al. 2014)    |
| Periodo de concesión  | 25 años                        | (X. gang Zhao et al. 2016) |

**Tabla 4-7:** Parámetros de análisis económico para gas de relleno sanitario Autor

| Parámetros                                 | Valores  | Referencias               |
|--|--|---------------------------|
| Capacidad del relleno                      | 300 - 500 T/día                                |                           |
| Hectáreas                                  | 20   |                           |
| Préstamo                                   | 50%  |                           |
| Tasa de interés anual                      | 8% (10 años)                                   |                           |
| Emisiones de CO <sub>2</sub> desde relleno | 9.19 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> biogás | (Murphy and McKeogh 2004) |
| Factor de planta                           | 0.80   |                           |
| Poder calorífico Biogás                    | 21,51 MJ/kg                                    | (Z, F, and L 2012)        |
| Eficiencia eléctrica                       | 33%  | (Bove and Lunghi 2006)    |
| Eficiencia recuperación de metano          | 80%  | (Z, F, and L 2012)        |

<sup>2</sup> Poder calorífico inferior residuos de Andes y Pasto

| Parámetros           | Valores | Referencias |
|----------------------|---------|-------------|
| Periodo de concesión | 25 años |             |

**Tabla 4-8** Parámetros de análisis económico para digestión anaerobia Autor

| Parámetros                                 | Valores  | Referencias               |
|--|--|---------------------------|
| Capacidad                                  | 300 T/día                                      |                           |
| Préstamo                                   | 50%  |                           |
| Tasa de interés anual                      | 8% (10 años)                                   |                           |
| Emisiones de CO <sub>2</sub> desde relleno | 9.19 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> biogás | (Murphy and McKeogh 2004) |
| Factor de planta                           | 0.80   |                           |
| Poder calorífico biogás                    | 21,51 MJ/kg                                    | (Z, F, and L 2012)        |
| Eficiencia eléctrica                       | 0.26%  | (Bove and Lunghi 2006)    |
| Galón de ACPM/ kWh                         | 0.025  | (Palacio Suárez 2007)     |
| Periodo de concesión                       | 20-25 años                                     |                           |

#### 4.5.1 Municipio de Pasto

##### ▪ Incineración

La implementación de esta tecnología en el municipio de Pasto, requiere una inversión inicial de 19,5 MUSD, obteniéndose una TIR máxima de 14,43%. En el anexo B se muestra este valor de TIR así como el flujo de caja realizado bajo los supuestos del caso 4.

##### ▪ Gas de relleno sanitario

Para esta tecnología, se obtuvo una TIR máxima del 21,04%. Esta se muestra en el anexo B junto con el flujo de caja bajo los supuestos del caso 4. Se obtuvieron valores negativos de flujos de caja en los años 6, 11, y 21, esto es porque los equipo de generación eléctrica, tienen una vida útil de 10 años y es necesario su reemplazo o ampliación de capacidad. Según la Figura 4-12, la producción de biogás no es constante

y crece hasta y un valor máximo, después del cual se extingue hasta desaparecer completamente.

▪ **Digestión anaerobia**

Para la digestión anaerobia, se obtuvo una TIR máxima de 23,78%, tal como se indica en el flujo de caja mostrado en la Figura 4-13. Los equipos para digestión anaerobia tienen vida útil de 13 años, esta es la razón por la cual se observa en el año 13 un flujo de caja, negativo. Los valores máximos de TIR fueron obtenidos para el caso 4, tal como se observa en la Figura 4-14. Esto significa que la deducción de la renta por un valor de hasta 50% del valor de inversión, incrementa el valor de la TIR hasta un valor superior al obtenido para los demás casos.

Figura 4-13: Flujo de caja para digestión anaerobia en el municipio de Pasto Autor

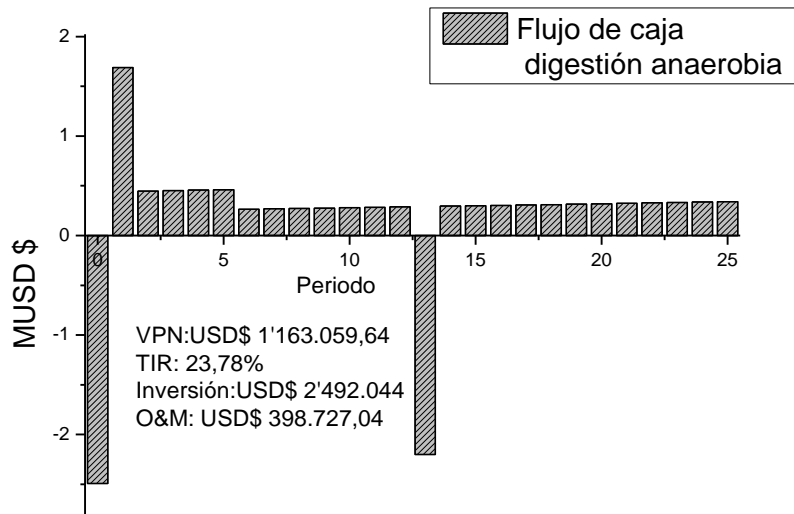
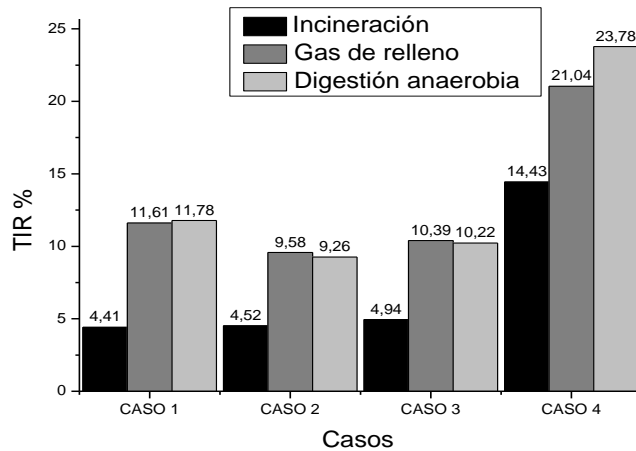


Figura 4-14: Tasa interna de retorno obtenida para los 4 casos en Pasto Autor



## 4.5.2 Municipio de Andes

### ▪ Incineración

Para esta tecnología se obtuvo una TIR -5,90% como se muestra en la Figura 4-15. Producir energía a partir de esta tecnología es viable si el precio de venta de electricidad se incrementa y ofrece a un precio igual a 10 veces el valor de 50 USD/MWh considerado en este estudio. Para los casos diferentes al caso 1 (caso base), no fue posible obtener un valor razonable para la TIR.

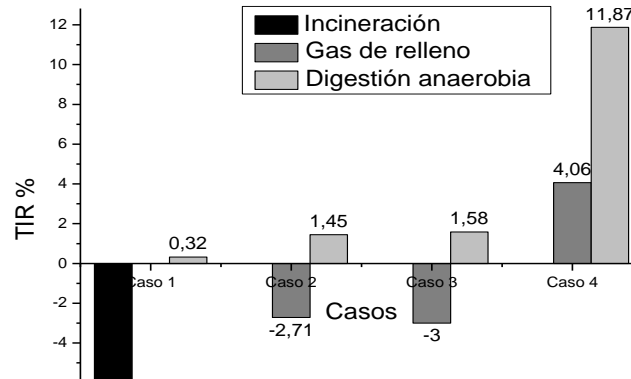
### ▪ Gas de relleno sanitario y digestión anaerobia

Para gas de relleno sanitario y digestión anaerobia se obtuvieron valores máximos de TIR iguales a 4,06 Y 11,87 % respectivamente. Para ambas tecnologías en todos los cuatros casos, la venta de electricidad se ha fijado en 100 USD/MWh para gas de relleno y 108 USD/MWh para digestión anaerobia. Para valores por debajo de los anteriores no es posible obtener cierre del flujo de caja. Las plantas G3306 de 72 kW de Caterpillar, que producen electricidad desde gas desde relleno sanitario a pequeña escala, están exentas del pago del IVA, según información del proveedor Gecolsa en Colombia. Los valores máximos de TIR, para estas dos tecnologías, fueron obtenidos bajo los supuestos del caso 4, lo cual significa que la deducción de la renta por un valor de hasta 50% del valor de inversión, incrementa significativamente el valor de la TIR así como el



valor presente neto (VPN). En el anexo B se muestran los flujos de caja para el caso 4 junto con su respectivo valor de TIR.

Figura 4-15: Tasa interna de retorno obtenida para los 4 casos en Andes Autor



### 4.5.3 Municipio de Guayatá

Por último para Guayatá no fue posible obtener el cierre de flujo de caja para incineración y gas de relleno. Las tecnologías no se encuentran comercialmente a escalas de producción de electricidad tan bajas, es decir para 100 y 6 kW respectivamente. Es posible obtener electricidad desde co-digestión anaerobia combinando biogás, producido desde biodigestor, con algún tipo de combustible como el ACPM, para alimentar un grupo electrógeno de 30 KVA nominales (Palacio Suárez 2007). La carga del biodigestor sería una mezcla de residuos orgánicos y biomasa agropecuaria como por ejemplo estiércol de aves, porcino, vacuno, etc, este procedimiento se conoce como codigestión anaerobia (IDAE 2007). En el anexo B se muestran la TIR y el flujo de caja que arrojaría un proyecto de tal magnitud de acuerdo a los costos indicados en la **Tabla 3-1** del capítulo de metodología. Los beneficios estarían dados por el ahorro de los kWh/año comprados al operador de red EBSA y equivalente a 150 USD/MWh, según el costo unitario para estrato 3 fijado por la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA 2016). Para gasificación de residuos a pequeña escala existe la tecnología Energos que admite mínimo 10.000 T/año de residuos según estudio de (Ellyin and Themelis 2012). Actualmente existen 8 plantas en operación en todo el mundo y es una tecnología probada, sin embargo tiene un costo de 13 MUSD según el mismo estudio y el módulo mínimo estándar ofrecido tiene una

capacidad demasiado alta. La producción anual de residuos para Andes y Guayatá se tiene estimada en 580 y 6.700 toneladas anuales respectivamente.

#### 4.5.4 Periodo de recuperación de la inversión o payback

La evaluación payback para los municipios de Pasto y Andes se muestra en la Figura 4-15 y en la Figura 4-16. De estas se puede observar que el valor del periodo de pago simple es inversamente proporcional a la TIR. Para el municipio de Pasto (caso 4) se obtuvieron periodos de pago inferiores a los 5 años para todas las tecnologías, debido al beneficio correspondiente a una deducción de hasta el 50% del valor de la inversión. Para el municipio de Andes solo se obtuvo un payback inferior a 5 años, en el caso 4, y para digestión anaerobia. Para los demás casos y todas las tecnologías, incluyendo gas de relleno en caso 4, se obtuvo un payback aproximadamente igual o superior a los 10 años.

Figura 4-16: Periodo de recuperación de la inversión para los 4 casos en Pasto Autor

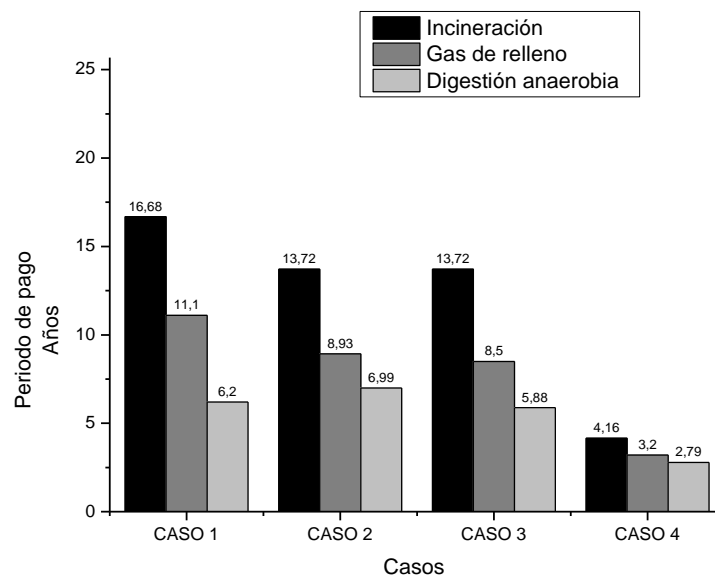
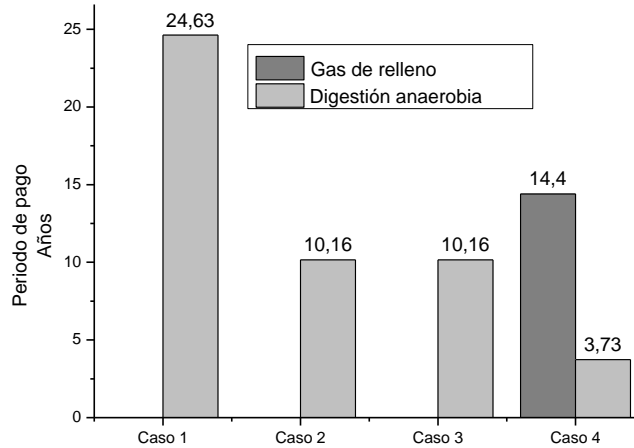


Figura 4-17: Periodo de recuperación de la inversión para los 4 casos en Andes Autor



### 4.5.5 Gasificación como caso especial para los tres escenarios

Para este caso, los volúmenes de residuos sobrepasan los casos típicos a pequeña escala analizados en la literatura. Por lo tanto se ha tomado como referencia el trabajo realizado por (Luz et al. 2015). De este se tiene para escenarios con producción diaria de residuos equivalente a las de Andes y Pasto, valores de TIR cercanos a -9,3% y 11,25 % respectivamente. Este estudio se realizó considerando una tasa de descuento del 10,58%. Los ingresos han sido por ventas de energía eléctrica, material reciclable, tratamiento de basuras y créditos de carbono. A pesar de las diferencias el valor de la TIR para esta tecnología de conversión termoquímica, es aproximado al obtenido en este estudio para incineración en caso 4, es decir -5,9% para Andes y 14,43% para Pasto. Demostrando la poca viabilidad de este tipo de proyectos en Andes, población menor a 100.000 habitantes.

### 4.6 Costo unitario de la electricidad

En la Figura 4-18 y en la Figura 4-19, se observa el costo unitario de la electricidad generada por escenario y calculado de acuerdo a las ecuaciones (2.5) y (2.6) expuestas en el marco teórico. Este solo se ha calculado para el caso 4, el cual ha arrojado un mayor valor de TIR (Figura 4-14 y en la Figura 4-15). Se puede apreciar en la Figura 4-18

y de la Figura 4-19 que este costo es menor para digestión anaerobia, seguido de incineración y gas de relleno. Para este último, la producción de energía aumenta hasta cierto valor a partir del cual empieza a descender (Figura 4-12), por esta razón el comportamiento del costo unitario para los primeros 5 años. Los costos de inversión para digestión anaerobia son muchos menores comparados con incineración. Sin embargo desde esta tecnología puede obtenerse menos energía eléctrica. Para el escenario 2, Andes, se ha fijado un costo de inversión alto para incineración equivalente al del escenario 3, Pasto, ya que no fue posible encontrar costos de incineración para procesar baja producción de residuos (18-20 T/día). Para Guayatá no se presentan resultados, dado que no son viables las tecnologías de conversión térmica y gas de relleno. Por lo tanto no podrían compararse entre tecnologías su costo unitario.

Figura 4-18: Costo unitario para las diferentes tecnologías en municipio de Pasto Autor

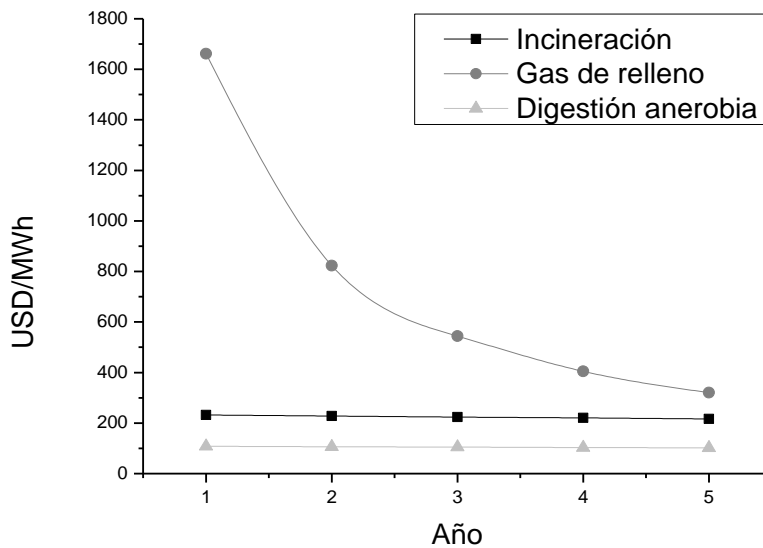
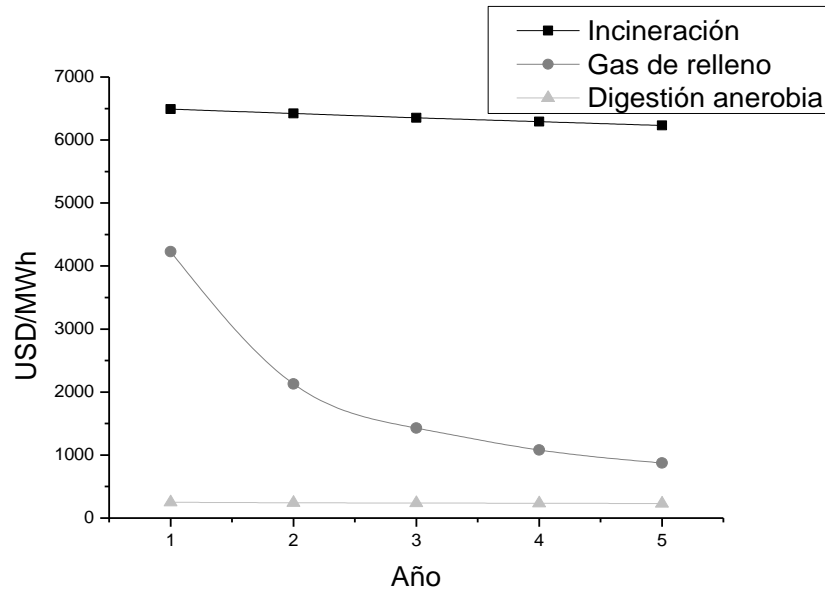


Figura 4-19: Costo unitario para las diferentes tecnologías en municipio de Andes Autor



## 4.7 Análisis de Prefactibilidad

### ▪ Municipio de Pasto

Para este municipio de 440.040 habitantes, y producción diaria de 225 T/día, las tecnologías de conversión térmica podrían aplicarse. Los ingresos por venta de electricidad, y tratamiento de residuos son superiores al costo de inversión. La adquisición de la tecnología podría ser viable, se resolvería el problema de acumulación cada vez mayor debido al crecimiento de la población, y podría contribuir al cubrimiento de la demanda de energía. Un mayor retorno de la inversión estaría dirigido a empresas con trayectoria y gran capacidad financiera, las cuales podrían aprovechar el beneficio otorgado por la ley 1715 en cuanto a la deducción de hasta por el 50% del valor de la inversión realizada.

Las tecnologías de conversión biológica pueden también aplicarse en este escenario ya que se han obtenido TIR positivas bajo todas las modalidades (casos), demostrando su viabilidad para poblacionales cercanas a los 440.040 habitantes.

### ▪ Municipio de Andes

Para esta población, con un total de 45.184 habitantes, con una producción diaria de residuos igual a 17,62 T/día respectivamente, las tecnologías de conversión térmica no

son viables. Se observaron valores de TIR por debajo de cero y es escasa o difícil la adquisición de este tipo de tecnologías para tan baja producción diaria de residuos.

Las tecnologías de conversión biológica son viables bajo las consideraciones del caso 4. A partir de este caso, se logra una TIR máxima (4,06% y 11,87 %), asumiendo un precio por la venta de energía eléctrica de 100 y 108 USD/MWh para gas de relleno y digestión anaerobia respectivamente. Los casos 2 y 3 han arrojado un valor de TIR negativo para gas de relleno sanitario, y valores de TIR ligeramente por encima de cero para la digestión anaerobia.

#### ▪ **Municipio de Guayatá**

De acuerdo a los resultados obtenidos, las tecnologías de conversión térmica no son viables para esta población de 5.126 habitantes con una producción diaria de residuos igual a 1,74 T/día respectivamente. La adquisición de este tipo de tecnologías para tan baja producción diaria de residuos es escasa o difícil.

La digestión anaerobia es viable bajo ciertas condiciones. Por ejemplo para una producción diaria de 1,74 T/día, es viable la codigestión anaerobia. A partir de esta se estima una producción diaria de 30 kW la cual podría suplir la demanda de a lo sumo 6 hogares en zona rural. Para este solo se evaluó el caso 4, dado que se trata de un caso de codigestión anaerobia con biomasa y la estimación de la energía que puede obtenerse a partir de este proceso, se realizó en base a la capacidad nominal de una planta disponible comercialmente, y no en base a modelos matemáticos de referencia. El flujo de caja para este caso se puede observar en el anexo B. Por otro lado, con relación a las tecnologías de conversión biológica, se tiene que el aprovechamiento del biogás desde relleno sanitario no es viable allí dado que los costos de inversión superan el valor de los ingresos.

Finalmente todas las tecnologías son viables para Pasto, la mayor de las poblaciones. El valor del retorno de la inversión dependerá del incentivo otorgado por la 1715. Se recomienda por lo tanto continuar con un proyecto de factibilidad para este escenario. Para el municipio de Andes son viables las tecnologías de conversión biológica pero bajo los incentivos de la 1715. Para Guayatá es viable la tecnología de conversión biológica, bajo un caso hipotético de codigestión anaerobia, baja producción de energía y obteniendo ingresos equivalentes al ahorro por no compra de energía al operador de red.

Es recomendable continuar con los proyectos de tecnologías de conversión biológica para Andes y codigestión anaerobia para zona rural en Guayatá.

## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

En este trabajo se consideraron los residuos sólidos urbanos como fuente potencial de energía renovable, en tres casos de estudio en Colombia. Se realizó la evaluación de la contribución del potencial energético de los RS, desde cuatro tecnologías de conversión. La prefactibilidad de cada tecnología por escenario, fue evaluada considerando las características generales de una inversión y los beneficios de la Ley 1715.

Se propuso una metodología para la selección de tres municipios basada en las características demográficas. Cabe destacar que 870 municipios en Colombia, poseen un número de habitantes menor a 30.000. En la mayoría de estos, predomina la población rural. A medida que el tamaño poblacional de los municipios aumenta, se hacen menos frecuentes y adicionalmente predomina la población urbana. A partir de los 100.000 habitantes, se tienen 62 municipios entre los cuales se destacan Bogotá, Barranquilla, Cali, Cartagena y Medellín con más de un millón de habitantes.

Se seleccionaron tres escenarios de acuerdo al IPU, al número de habitantes y a la información disponible en el Plan de Gestión de Residuos de cada municipio. Después de revisar la información fueron seleccionados: Guayatá, Andes y Pasto. Con IPU de 2,94, 1,02 y 0,2 respectivamente. Dado que estos escenarios poseen una información completa acerca de la caracterización física y producción per cápita de los residuos sólidos. El IPU es diferente ya que cada escenario seleccionado cuenta con una distribución de población urbana y rural diferente. Para Guayata se tiene una población predominantemente rural. Para Andes, se tiene un número de habitantes aproximadamente igual tanto en zona urbana como rural. Pasto cuenta con una población predominantemente urbana. Lo anterior como parte de la metodología empleada para seleccionar los diferentes escenarios, y tener posibilidad de aplicar en cada uno, varias de las tecnologías existentes.



A partir de la proyección de crecimiento poblacional del DANE, se puede observar que los municipios de Pasto y Andes poseen un crecimiento anual de población. Lo cual aumenta la expectativa de producción de RS a largo plazo. Para el caso de Guayatá, se observa un decrecimiento en el tamaño de la población en el tiempo.

Las tecnologías de conversión para cada escenario se han seleccionado principalmente en función de la cantidad de residuos (T/día), ventajas, desventajas, y viabilidad de adquisición comercial de cada tecnología.

Según la literatura y otros estudios, aunque la incineración admite casi todos los tipos de residuos, la necesidad de tratamiento de los contaminantes del aire, el agua y la ceniza dentro de la instalación puede ser factores limitantes así como su adquisición para el procesamiento de baja cantidad de residuos. Esta se ha seleccionado para los municipios de Pasto y Andes. Para el caso de la gasificación se tiene referencia de viabilidad técnica para la producción a pequeña escala y se ha seleccionado esta tecnología para Andes y Pasto.

La digestión anaerobia es una tecnología que aplica para los tres municipios, dado que su adquisición es viable, posee ventajas y aprovecha alto volumen de residuos de alimentos (más del 50% del total RS) los cuales pueden ser utilizados como un material de alimentación.

El gas de relleno sanitario se ha elegido para los municipios de Pasto y Andes. Esta tecnología se ha seleccionado en función de las ventajas, viabilidad de adquisición y cantidad de residuos. Aunque Andes, produce baja cantidad de residuos y posee una población de 45.184, se espera que el crecimiento poblacional aumente la expectativa de generación de residuos. Por otro lado la fracción aprovechable de residuos sólidos, podría ser mayor si se considera la posibilidad de convertir el municipio de Andes en centro de acopio, y permitir allí la recepción de residuos desde municipios cercanos ubicados en la misma región del suroeste antioqueño.

A partir de la evaluación técnica de las tecnologías en cada escenario, se realizó una evaluación económica. Los resultados muestran buenos ingresos económicos para incineración, digestión anaerobia y gas de relleno en el municipio de Pasto, escenario con mayor número de habitantes.

Un análisis de sensibilidad se realizó mediante la variación en los parámetros del modelo tales como el préstamo de capital por parte del inversionista y la inclusión de los beneficios otorgados por la ley colombiana 1715. Para la incineración, los ingresos por tonelada de residuo recibida y por la venta de electricidad tienen gran impacto en los resultados, así como el elevado costo de inversión. Los beneficios de la ley 1715 también influyen sobre el valor de la tasa interna de retorno. Para gas de relleno el ingreso por tonelada de residuo recibida tiene gran influencia sobre la tasa interna de retorno. Igualmente para la digestión anaerobia en cuanto al tratamiento de los residuos de origen orgánico. Para estas dos últimas tecnologías aplicadas en el municipio de Andes, el ingreso por ventas de electricidad y CER no son suficientes ni decisivos en el rendimiento de la inversión. Se requiere vender la electricidad a un precio mayor y aprovechar beneficios de la ley 1715.

Se evaluó la importancia económica de la venta de los CER y los resultados confirmaron que los precios actuales bajos de los CER no representan ingresos significativos para las tecnologías de conversión biológica. Sin embargo, este mecanismo de desarrollo limpio deja en claro su gran importancia para la viabilidad del proyecto desde el punto de vista ambiental.

La incineración representa una buena opción desde el punto de vista económico y puede ser eficiente en cuanto a la recuperación de energía. Además la falta de espacio para nuevos vertederos en las ciudades, obligará a reconsiderar el uso de esta opción de aprovechamiento. Existen costos externos que no están incluidos en el precio de esta tecnología, pero que la sociedad en su conjunto debe soportar. Por ejemplo, el mayor daño a la salud humana es causado por las emisiones de partículas como O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> hidrocarburos y dioxinas.

Desde el punto de vista ambiental, la mejor alternativa puede ser la digestión anaerobia. Sin embargo a partir de esta tecnología se produce menos energía y la estimación exacta de los costos de inversión puede ser complicada. La influencia de la separación de residuos en la fuente, es fundamental para el éxito en la implementación de esta tecnología. En Colombia se carece de políticas serias de separación. Sin embargo se conoce del plan de gestión del municipio de Andes que esta se realiza y ha resultado ser exitosa.

El beneficio de la ley 1715 correspondiente a la deducción de la renta por un valor de hasta 50% del total de la inversión (caso 4), incrementa el valor porcentual de la TIR hasta un valor muy superior al obtenido para los demás casos. Sin embargo esta ley que promueve la creación de proyectos de energía renovable, es excluyente para pequeños o medianos inversionistas, ya que los incentivos tributarios solo podrían ser aprovechados a su máximo por empresas que en su declaración de renta demuestren grandes utilidades.

Teniendo en cuenta que 27, 18 y 5 poblaciones, poseen aproximadamente el mismo número de habitantes que Guayatá, Andes y Pasto. Se podría replicar el mismo modelo de estudio realizado y determinar que el potencial de energía eléctrica desde incineración, digestión anaerobia y gas de relleno es de aproximadamente 548,8, 117,17 y 47,31 MWh/día respectivamente para 2020.

Si se considera el total de residuos diarios generados en el país (26.528 T/día), un 15% de material reciclado, PCI promedio de los residuos de 7,66MJ/Kg, y un 18% de eficiencia de la planta, podrían obtenerse 8,64 GWh/día a partir de incineración. Para digestión anaerobia con los mismos parámetros considerados en el estudio y 54% de fracción orgánica del total de residuos del país, podrían obtenerse 1,58 GWh/día. Para gas de relleno, con el mínimo de metano reportado por la literatura, es decir 25 m<sup>3</sup>/t y un 15% de reciclaje podrían recuperarse alrededor de 0,97 GWh/ día de energía eléctrica. Lo anterior para un total de 11,19 GWh/día ó 0,47 GW de potencia desde las tres tecnologías, lo que representaría un 4,37 % de la demanda actual nacional de potencia (10,74 GW escalón medio).

## 5.2 Recomendaciones

El presente trabajo no incluyó un estudio de impacto ambiental ya que este se encuentra fuera del alcance del desarrollo de los objetivos. Investigaciones y trabajos futuros en torno a este aspecto, podrían considerar un análisis en relación al impacto ambiental cuantificando la cantidad de gases de efecto invernadero que podrían reducirse anualmente, gracias a tecnologías como la digestión anaerobia. Futuros estudios también podrían incluir la cantidad de material ferroso que puede recuperarse en los sitios de acopio de residuos, emisiones de carbono, SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> producidas por las plantas

incineradoras. Estas últimas ( $\text{SO}_x$  y  $\text{NO}_x$ ), dependiendo de la distancia de la planta de tratamiento de residuos a la población más cercana, podrían representar peligro para la salud de la comunidad circundante.

A nivel municipal, la principal herramienta de planificación para asegurar servicios locales eficaces de gestión de residuos sólidos, es el Plan de Gestión Integral de Manejo de Residuos Sólidos (PGIRS) desarrollado por cada municipio. Estos planes fueron requeridos como resultado del Decreto 1713 que estipuló que el contenido del PGIRS debe incluir, entre otras cosas, la definición de programas enfocados en la fuente de separación, almacenamiento, tratamiento, recolección, transporte, reutilización y disposición final. Teniendo en cuenta algunos componentes de los PGIRS y con miras a mejorar el rendimiento en la valorización energética de los residuos, podrían adoptarse las siguientes recomendaciones:

Programa de Separación en la fuente: de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana (NTC) GTC 24 <sup>3</sup>, los municipios tratarán de desarrollar un programa de separación en la fuente para ciertos componentes de residuos sólidos. Actualmente, los centros comerciales y algunos generadores de residuos sólidos en las zonas comerciales ya han implementado la separación de varios tipos de residuos. Los planes de gestión también tienen como objetivo incorporar otros grandes generadores de residuos en una amplia iniciativa de separación en la fuente.

Rutas selectivas para la recolección de material reciclable: se propone el uso de las 4 zonas de recolección de residuos sólidos para diseñar rutas de recogida selectiva de materiales separados. Las rutas dependerán del valor calorífico y la naturaleza del material desechado, basado en las siguientes clasificaciones de desechos: orgánicos, materiales reciclables, material no reciclable y residuos peligrosos. Al mismo tiempo, deberá realizarse la incorporación de recicladores informales al proceso formal de reciclaje para evitar la competencia por los materiales recuperables.

---

<sup>3</sup> Residuos sólidos. Guía para la separación en la fuente.

Materiales orgánicos: considera programas de recolección y procesamiento para utilizar material orgánico generado en mercados, restaurantes, centros comerciales, supermercados, parques y otras fuentes. Lo anterior con el objetivo de aumentar la tasa de captura orgánica y reutilización. Las medidas necesarias para lograr este objetivo, incluyen un estudio de factibilidad para plantas de digestión anaerobia productoras de biogás a mediana y pequeña escala. La iniciativa deberá incluir y utilizar el 100% de los residuos "verdes" generados en parques, mercados e industrias.

Parque tecnológico ambiental: los municipios tratarán de desarrollar un parque tecnológico ambiental para el desarrollo de una unidad ambiental y técnica para la recuperación y tratamiento de residuos sólidos. El sector industrial contribuirá al diseño y funcionamiento de esta instalación. Los rellenos sanitarios clausurados regionales o municipales, podrían ser el sitio propuesto para este tipo de parques.

Adicional a lo presentado en este trabajo, es importante realizar un análisis detallado, entorno a las anteriores recomendaciones. Se sugiere para una evaluación posterior de factibilidad, en los escenarios en los cuales existe posibilidad de implementar alguna de las tecnologías, realizar estudios de caracterización química de los residuos para determinar su composición y el valor PCI.

Por último dado el amplio potencial de recurso minero, que posee Colombia, se puede considerar un estudio de coincineración de residuos sólidos, a partir de combustible fósiles como el carbón.

## A. Anexo: Municipios pertenecientes a los grupos G1, G2, G3

| GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes |                      |       |          |       |             |
|---|----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento                                    | Municipio            | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Antioquia                                       | Abejorral            | 19290 | 6681     | 12609 | <b>1,89</b> |
| Antioquia                                       | Abriaquí             | 2128  | 751      | 1377  | <b>1,83</b> |
| Antioquia                                       | Alejandro            | 3466  | 1812     | 1654  | 0,91        |
| Antioquia                                       | Amagá                | 29555 | 16757    | 12798 | 0,76        |
| Antioquia                                       | Amalfi               | 22088 | 12236    | 9852  | 0,81        |
| Antioquia                                       | Angelópolis          | 8946  | 5299     | 3647  | 0,69        |
| Antioquia                                       | Angostura            | 11354 | 1822     | 9532  | <b>5,23</b> |
| Antioquia                                       | Anorí                | 17086 | 6763     | 10323 | <b>1,53</b> |
| Antioquia                                       | Santafé de Antioquia | 24549 | 15621    | 8928  | 0,57        |
| Antioquia                                       | Anza                 | 7568  | 1260     | 6308  | <b>5,01</b> |
| Antioquia                                       | Argelia              | 8699  | 2550     | 6149  | <b>2,41</b> |
| Antioquia                                       | Armenia              | 4210  | 1579     | 2631  | <b>1,67</b> |
| Antioquia                                       | Belmira              | 6760  | 1928     | 4832  | <b>2,51</b> |
| Antioquia                                       | Betania              | 9286  | 3855     | 5431  | <b>1,41</b> |
| Antioquia                                       | Betulia              | 17542 | 5817     | 11725 | <b>2,02</b> |
| Antioquia                                       | Ciudad Bolívar       | 27084 | 16200    | 10884 | 0,67        |
| Antioquia                                       | Briceño              | 8702  | 2546     | 6156  | <b>2,42</b> |
| Antioquia                                       | Buriticá             | 6601  | 1551     | 5050  | <b>3,26</b> |
| Antioquia                                       | Caicedo              | 8205  | 1629     | 6576  | <b>4,04</b> |
| Antioquia                                       | Campamento           | 9091  | 2875     | 6216  | <b>2,16</b> |
| Antioquia                                       | Cañasgordas          | 16763 | 6615     | 10148 | <b>1,53</b> |
| Antioquia                                       | Caracol              | 4595  | 3073     | 1522  | 0,5         |
| Antioquia                                       | Caramanta            | 5362  | 2967     | 2395  | 0,81        |
| Antioquia                                       | Carolina             | 3629  | 2931     | 698   | 0,24        |
| Antioquia                                       | Cisneros             | 9058  | 7583     | 1475  | 0,19        |
| Antioquia                                       | Cocorná              | 14972 | 3965     | 11007 | <b>2,78</b> |
| Antioquia                                       | Concepción           | 3463  | 1426     | 2037  | <b>1,43</b> |
| Antioquia                                       | Concordia            | 20653 | 8596     | 12057 | <b>1,4</b>  |
| Antioquia                                       | Dabeiba              | 23378 | 8921     | 14457 | <b>1,62</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                        |       |          |       |             |
|--|------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio              | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Antioquia  | Don Matías             | 22243 | 14635    | 7608  | 0,52        |
| Antioquia  | Ebéjico                | 12515 | 2221     | 10294 | <b>4,63</b> |
| Antioquia  | Entrerrios             | 9950  | 5166     | 4784  | 0,93        |
| Antioquia  | Fredonia               | 21561 | 8580     | 12981 | <b>1,51</b> |
| Antioquia  | Giraldo                | 4029  | 1304     | 2725  | <b>2,09</b> |
| Antioquia  | Gómez Plata            | 12810 | 5928     | 6882  | <b>1,16</b> |
| Antioquia  | Granada                | 9859  | 3656     | 6203  | <b>1,7</b>  |
| Antioquia  | Guadalupe              | 6300  | 2103     | 4197  | <b>2</b>    |
| Antioquia  | Guatapé                | 5279  | 4155     | 1124  | 0,27        |
| Antioquia  | Heliconia              | 5906  | 3037     | 2869  | 0,94        |
| Antioquia  | Hispania               | 4869  | 3226     | 1643  | 0,51        |
| Antioquia  | Ituango                | 20996 | 5834     | 15162 | <b>2,6</b>  |
| Antioquia  | Jardín                 | 13748 | 7201     | 6547  | 0,91        |
| Antioquia  | Jericó                 | 12103 | 8460     | 3643  | 0,43        |
| Antioquia  | La Pintada             | 6558  | 5757     | 801   | 0,14        |
| Antioquia  | La Unión               | 19119 | 10726    | 8393  | 0,78        |
| Antioquia  | Liborina               | 9535  | 1761     | 7774  | <b>4,41</b> |
| Antioquia  | Maceo                  | 6855  | 2857     | 3998  | <b>1,4</b>  |
| Antioquia  | Montebello             | 6197  | 2011     | 4186  | <b>2,08</b> |
| Antioquia  | Mutatá                 | 20612 | 5526     | 15086 | <b>2,73</b> |
| Antioquia  | Nariño                 | 17291 | 2506     | 14785 | <b>5,9</b>  |
| Antioquia  | Nechí                  | 26591 | 14132    | 12459 | 0,88        |
| Antioquia  | Olaya                  | 3237  | 266      | 2971  | <b>11,2</b> |
| Antioquia  | Peque                  | 10925 | 2043     | 8882  | <b>4,35</b> |
| Antioquia  | Pueblorrico            | 7030  | 3611     | 3419  | 0,95        |
| Antioquia  | Puerto Nare            | 18654 | 7996     | 10658 | <b>1,33</b> |
| Antioquia  | Puerto Triunfo         | 20062 | 6178     | 13884 | <b>2,25</b> |
| Antioquia  | Remedios               | 29199 | 10657    | 18542 | <b>1,74</b> |
| Antioquia  | Sabanalarga            | 8191  | 2910     | 5281  | <b>1,81</b> |
| Antioquia  | Salgar                 | 17608 | 8819     | 8789  | 1           |
| Antioquia  | San Andrés de Cuerquía | 6226  | 2521     | 3705  | <b>1,47</b> |
| Antioquia  | San Carlos             | 16064 | 6031     | 10033 | <b>1,66</b> |
| Antioquia  | San Francisco          | 5318  | 2446     | 2872  | <b>1,17</b> |
| Antioquia  | San Jerónimo           | 12635 | 4083     | 8552  | <b>2,09</b> |
| Antioquia  | San José de La Montaña | 3336  | 2195     | 1141  | 0,52        |
| Antioquia  | San Juan de Urabá      | 25168 | 8054     | 17114 | <b>2,12</b> |
| Antioquia  | San Luis               | 10939 | 4694     | 6245  | <b>1,33</b> |
| Antioquia  | San Pedro              | 26592 | 14063    | 12529 | 0,89        |
| Antioquia  | San Rafael             | 12980 | 6262     | 6718  | <b>1,07</b> |
| Antioquia  | San Roque              | 16789 | 6298     | 10491 | <b>1,67</b> |
| Antioquia  | San Vicente            | 17197 | 7383     | 9814  | <b>1,33</b> |
| Antioquia  | Santa Bárbara          | 22076 | 10324    | 11752 | <b>1,14</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                   |       |          |       |             |
|--|-------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio         | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Antioquia  | Santo Domingo     | 10416 | 1984     | 8432  | <b>4,25</b> |
| Antioquia  | El Santuario      | 27120 | 22999    | 4121  | 0,18        |
| Antioquia  | Sopetrán          | 14696 | 6931     | 7765  | <b>1,12</b> |
| Antioquia  | Támesis           | 14732 | 6493     | 8239  | <b>1,27</b> |
| Antioquia  | Tarso             | 7776  | 3837     | 3939  | <b>1,03</b> |
| Antioquia  | Titiribí          | 14393 | 8078     | 6315  | 0,78        |
| Antioquia  | Toledo            | 6374  | 1025     | 5349  | <b>5,22</b> |
| Antioquia  | Uramita           | 8238  | 2592     | 5646  | <b>2,18</b> |
| Antioquia  | Valdivia          | 22179 | 6552     | 15627 | <b>2,39</b> |
| Antioquia  | Valparaíso        | 6174  | 3377     | 2797  | 0,83        |
| Antioquia  | Vegachí           | 9448  | 5682     | 3766  | 0,66        |
| Antioquia  | Venecia           | 13253 | 6831     | 6422  | 0,94        |
| Antioquia  | Vigía del Fuerte  | 5586  | 2099     | 3487  | <b>1,66</b> |
| Antioquia  | Yalí              | 8318  | 3190     | 5128  | <b>1,61</b> |
| Antioquia  | Yolombó           | 23958 | 7216     | 16742 | <b>2,32</b> |
| Antioquia  | Yondó             | 18613 | 9391     | 9222  | 0,98        |
| Atlántico  | Campo de La Cruz  | 16035 | 14060    | 1975  | 0,14        |
| Atlántico  | Candelaria        | 12479 | 9575     | 2904  | 0,3         |
| Atlántico  | Juan de Acosta    | 16811 | 11358    | 5453  | 0,48        |
| Atlántico  | Luruaco           | 26889 | 13441    | 13448 | <b>1</b>    |
| Atlántico  | Manatí            | 15723 | 14200    | 1523  | 0,11        |
| Atlántico  | Palmar de Varela  | 25341 | 24696    | 645   | 0,03        |
| Atlántico  | Piojó             | 5140  | 2456     | 2684  | <b>1,09</b> |
| Atlántico  | Polonuevo         | 15280 | 12542    | 2738  | 0,22        |
| Atlántico  | Ponedera          | 22244 | 11266    | 10978 | 0,97        |
| Atlántico  | Puerto Colombia   | 27107 | 22439    | 4668  | 0,21        |
| Atlántico  | Repelón           | 26095 | 17718    | 8377  | 0,47        |
| Atlántico  | Santa Lucía       | 11584 | 11008    | 576   | 0,05        |
| Atlántico  | Santo Tomás       | 25325 | 24439    | 886   | 0,04        |
| Atlántico  | Suan              | 8752  | 8436     | 316   | 0,04        |
| Atlántico  | Tubará            | 11027 | 6523     | 4504  | 0,69        |
| Atlántico  | Usiacurí          | 9392  | 8384     | 1008  | 0,12        |
| Bolívar  | Achí              | 23051 | 4106     | 18945 | <b>4,61</b> |
| Bolívar  | Altos del Rosario | 13669 | 8073     | 5596  | 0,69        |
| Bolívar  | Arenal            | 18876 | 5173     | 13703 | <b>2,65</b> |
| Bolívar  | Arroyohondo       | 9907  | 6635     | 3272  | 0,49        |
| Bolívar  | Barranco de Loba  | 17768 | 6159     | 11609 | <b>1,88</b> |
| Bolívar  | Calamar           | 23308 | 13158    | 10150 | 0,77        |
| Bolívar  | Cantagallo        | 9239  | 4368     | 4871  | <b>1,12</b> |
| Bolívar  | Cicuco            | 11118 | 7523     | 3595  | 0,48        |
| Bolívar  | Córdoba           | 12435 | 3107     | 9328  | <b>3</b>    |
| Bolívar  | Clemencia         | 12540 | 10490    | 2050  | 0,2         |



| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                       |       |          |       |             |
|--|-----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio             | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Bolívar  | El Guamo              | 7757  | 4359     | 3398  | 0,78        |
| Bolívar  | El Peñón              | 9484  | 3888     | 5596  | <b>1,44</b> |
| Bolívar  | Hatillo de Loba       | 11971 | 3459     | 8512  | <b>2,46</b> |
| Bolívar  | Mahates               | 25786 | 9847     | 15939 | <b>1,62</b> |
| Bolívar  | Margarita             | 9876  | 1743     | 8133  | <b>4,67</b> |
| Bolívar  | Montecristo           | 21229 | 11019    | 10210 | 0,93        |
| Bolívar  | Morales               | 21182 | 5842     | 15340 | <b>2,63</b> |
| Bolívar  | Norosí (1)            | 5204  | 2070     | 3134  | <b>1,51</b> |
| Bolívar  | Pinillos              | 24923 | 2683     | 22240 | <b>8,29</b> |
| Bolívar  | Regidor               | 10489 | 4421     | 6068  | <b>1,37</b> |
| Bolívar  | Río Viejo (1)(3)      | 18076 | 9360     | 8716  | 0,93        |
| Bolívar  | San Cristóbal         | 6669  | 5580     | 1089  | 0,2         |
| Bolívar  | San Estanislao        | 16257 | 11961    | 4296  | 0,36        |
| Bolívar  | San Fernando          | 13753 | 2935     | 10818 | <b>3,69</b> |
| Bolívar  | San Jacinto           | 21536 | 20772    | 764   | 0,04        |
| Bolívar  | San Jacinto del Cauca | 13426 | 3773     | 9653  | <b>2,56</b> |
| Bolívar  | San Martín de Loba    | 17295 | 7392     | 9903  | <b>1,34</b> |
| Bolívar  | Santa Catalina        | 13169 | 4748     | 8421  | <b>1,77</b> |
| Bolívar  | Santa Rosa            | 22592 | 14553    | 8039  | 0,55        |
| Bolívar  | Simití                | 20271 | 9853     | 10418 | <b>1,06</b> |
| Bolívar  | Soplaviento           | 8441  | 8250     | 191   | 0,02        |
| Bolívar  | Talaigua Nuevo        | 11350 | 5351     | 5999  | <b>1,12</b> |
| Bolívar  | Tiquisio              | 22041 | 6042     | 15999 | <b>2,65</b> |
| Bolívar  | Turbaná               | 14883 | 13786    | 1097  | 0,08        |
| Bolívar  | Villanueva            | 19691 | 18233    | 1458  | 0,08        |
| Bolívar  | Zambrano              | 11611 | 10578    | 1033  | 0,1         |
| Boyacá   | Almeida               | 1754  | 274      | 1480  | <b>5,4</b>  |
| Boyacá   | Aquitania             | 15241 | 6329     | 8912  | <b>1,41</b> |
| Boyacá   | Arcabuco              | 5240  | 1961     | 3279  | <b>1,67</b> |
| Boyacá   | Belén                 | 7400  | 3812     | 3588  | 0,94        |
| Boyacá   | Berbeo                | 1932  | 529      | 1403  | <b>2,65</b> |
| Boyacá   | Betéitiva             | 2069  | 389      | 1680  | <b>4,32</b> |
| Boyacá   | Boavita               | 7079  | 2929     | 4150  | <b>1,42</b> |
| Boyacá   | Boyacá                | 4472  | 403      | 4069  | <b>10,1</b> |
| Boyacá   | Briceño               | 2584  | 544      | 2040  | <b>3,75</b> |
| Boyacá   | Buenavista            | 5789  | 833      | 4956  | <b>5,95</b> |
| Boyacá   | Busbanzá              | 1156  | 442      | 714   | <b>1,62</b> |
| Boyacá   | Caldas                | 3638  | 248      | 3390  | <b>13,7</b> |
| Boyacá   | Campohermoso          | 3847  | 964      | 2883  | <b>2,99</b> |
| Boyacá   | Cerinza               | 3762  | 1547     | 2215  | <b>1,43</b> |
| Boyacá   | Chinavita             | 3528  | 1219     | 2309  | <b>1,89</b> |
| Boyacá   | Chiscas               | 4291  | 909      | 3382  | <b>3,72</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                |             |             |             |             |
|--|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Departamento   | Municipio      | Total       | cabecera    | Rural       | IPU         |
| Boyacá   | Chita          | 9542        | 2023        | 7519        | <b>3,72</b> |
| Boyacá   | Chitaraque     | 5687        | 1131        | 4556        | <b>4,03</b> |
| Boyacá   | Chivatá        | 6199        | 2557        | 3642        | <b>1,42</b> |
| Boyacá   | Ciénega        | 4754        | 1332        | 3422        | <b>2,57</b> |
| Boyacá   | Cómbita        | 14632       | 1107        | 13525       | <b>12,2</b> |
| Boyacá   | Coper          | 3663        | 763         | 2900        | <b>3,8</b>  |
| Boyacá   | Corrales       | 2273        | 1555        | 718         | 0,46        |
| Boyacá   | Covarachía     | 2861        | 516         | 2345        | <b>4,54</b> |
| Boyacá   | Cubará         | 6725        | 1998        | 4727        | <b>2,37</b> |
| Boyacá   | Cucaita        | 4687        | 1905        | 2782        | <b>1,46</b> |
| Boyacá   | Cúitiva        | 1906        | 218         | 1688        | <b>7,74</b> |
| Boyacá   | Chíquiza       | 5484        | 94          | 5390        | <b>57,3</b> |
| Boyacá   | Chivor         | 1795        | 486         | 1309        | <b>2,69</b> |
| Boyacá   | El Cocuy       | 5241        | 2765        | 2476        | 0,9         |
| Boyacá   | El Espino      | 4195        | 1303        | 2892        | <b>2,22</b> |
| Boyacá   | Firavitoba     | 5907        | 2127        | 3780        | <b>1,78</b> |
| Boyacá   | Floresta       | 4523        | 1798        | 2725        | <b>1,52</b> |
| Boyacá   | Gachantivá     | 2654        | 364         | 2290        | <b>6,29</b> |
| Boyacá   | Gameza         | 4856        | 1566        | 3290        | <b>2,1</b>  |
| Boyacá   | Garagoa        | 16944       | 13654       | 3290        | 0,24        |
| Boyacá   | Guacamayas     | 1693        | 499         | 1194        | <b>2,39</b> |
| Boyacá   | Guateque       | 9603        | 7176        | 2427        | 0,34        |
| <b>Boyacá</b>  | <b>Guayatá</b> | <b>5126</b> | <b>1302</b> | <b>3824</b> | <b>2,94</b> |
| Boyacá   | Güicán         | 6909        | 1712        | 5197        | <b>3,04</b> |
| Boyacá   | Iza            | 2349        | 1026        | 1323        | <b>1,29</b> |
| Boyacá   | Jenesano       | 7640        | 1980        | 5660        | <b>2,86</b> |
| Boyacá   | Jericó         | 4010        | 639         | 3371        | <b>5,28</b> |
| Boyacá   | Labranzagrande | 5099        | 1159        | 3940        | <b>3,4</b>  |
| Boyacá   | La Capilla     | 2550        | 972         | 1578        | <b>1,62</b> |
| Boyacá   | La Victoria    | 1674        | 857         | 817         | 0,95        |
| Boyacá   | La Uvita       | 2523        | 1018        | 1505        | <b>1,48</b> |
| Boyacá   | Villa de Leyva | 16478       | 9926        | 6552        | 0,66        |
| Boyacá   | Macanal        | 4821        | 1108        | 3713        | <b>3,35</b> |
| Boyacá   | Maripí         | 7480        | 970         | 6510        | <b>6,71</b> |
| Boyacá   | Miraflores     | 9777        | 5640        | 4137        | 0,73        |
| Boyacá   | Mongua         | 4717        | 1628        | 3089        | <b>1,9</b>  |
| Boyacá   | Monguí         | 4986        | 2809        | 2177        | 0,78        |
| Boyacá   | Moniquirá      | 21402       | 10544       | 10858       | <b>1,03</b> |
| Boyacá   | Motavita       | 8067        | 881         | 7186        | <b>8,16</b> |
| Boyacá   | Muzo           | 9040        | 5350        | 3690        | 0,69        |
| Boyacá   | Nobsa          | 16271       | 6389        | 9882        | <b>1,55</b> |
| Boyacá   | Nuevo Colón    | 6559        | 1300        | 5259        | <b>4,05</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                       |       |          |       |             |
|--|-----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio             | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Boyacá   | Oicatá                | 2834  | 301      | 2533  | <b>8,42</b> |
| Boyacá   | Otanche               | 10660 | 4173     | 6487  | <b>1,55</b> |
| Boyacá   | Pachavita             | 2508  | 395      | 2113  | <b>5,35</b> |
| Boyacá   | Páez                  | 2913  | 1169     | 1744  | <b>1,49</b> |
| Boyacá   | Pajarito              | 1719  | 725      | 994   | <b>1,37</b> |
| Boyacá   | Panqueba              | 1487  | 605      | 882   | <b>1,46</b> |
| Boyacá   | Pauna                 | 10778 | 2625     | 8153  | <b>3,11</b> |
| Boyacá   | Paya                  | 2550  | 580      | 1970  | <b>3,4</b>  |
| Boyacá   | Paz de Río            | 4680  | 2920     | 1760  | 0,6         |
| Boyacá   | Pesca                 | 8032  | 2004     | 6028  | <b>3,01</b> |
| Boyacá   | Pisba                 | 1344  | 391      | 953   | <b>2,44</b> |
| Boyacá   | Quípama               | 7874  | 1601     | 6273  | <b>3,92</b> |
| Boyacá   | Ramiriquí             | 10015 | 5023     | 4992  | 0,99        |
| Boyacá   | Ráquira               | 13588 | 3425     | 10163 | <b>2,97</b> |
| Boyacá   | Rondón                | 2822  | 544      | 2278  | <b>4,19</b> |
| Boyacá   | Saboyá                | 12372 | 789      | 11583 | <b>14,7</b> |
| Boyacá   | Sáchica               | 3791  | 1875     | 1916  | <b>1,02</b> |
| Boyacá   | Samacá                | 19907 | 5908     | 13999 | <b>2,37</b> |
| Boyacá   | San Eduardo           | 1862  | 828      | 1034  | <b>1,25</b> |
| Boyacá   | San José de Pare      | 5221  | 1071     | 4150  | <b>3,87</b> |
| Boyacá   | San Luis de Gaceno    | 5120  | 1803     | 3317  | <b>1,84</b> |
| Boyacá   | San Mateo             | 3682  | 1478     | 2204  | <b>1,49</b> |
| Boyacá   | San Miguel de Sema    | 4556  | 488      | 4068  | <b>8,34</b> |
| Boyacá   | San Pablo de Borbur   | 10524 | 1306     | 9218  | <b>7,06</b> |
| Boyacá   | Santana               | 7692  | 2348     | 5344  | <b>2,28</b> |
| Boyacá   | Santa María           | 3980  | 2298     | 1682  | 0,73        |
| Boyacá   | Santa Rosa de Viterbo | 13403 | 7154     | 6249  | 0,87        |
| Boyacá   | Santa Sofía           | 2704  | 721      | 1983  | <b>2,75</b> |
| Boyacá   | Sativanorte           | 2339  | 528      | 1811  | <b>3,43</b> |
| Boyacá   | Sativasur             | 1110  | 267      | 843   | <b>3,16</b> |
| Boyacá   | Siachoque             | 8964  | 1574     | 7390  | <b>4,7</b>  |
| Boyacá   | Soatá                 | 7255  | 5262     | 1993  | 0,38        |
| Boyacá   | Socotá                | 8128  | 1049     | 7079  | <b>6,75</b> |
| Boyacá   | Socha                 | 7140  | 3836     | 3304  | 0,86        |
| Boyacá   | Somondoco             | 3632  | 795      | 2837  | <b>3,57</b> |
| Boyacá   | Sora                  | 3025  | 499      | 2526  | <b>5,06</b> |
| Boyacá   | Sotaquirá             | 7709  | 716      | 6993  | <b>9,77</b> |
| Boyacá   | Soracá                | 5353  | 751      | 4602  | <b>6,13</b> |
| Boyacá   | Susacón               | 3095  | 966      | 2129  | <b>2,2</b>  |
| Boyacá   | Sutamarchán           | 5916  | 1352     | 4564  | <b>3,38</b> |
| Boyacá   | Sutatenza             | 4086  | 769      | 3317  | <b>4,31</b> |
| Boyacá   | Tasco                 | 6361  | 1905     | 4456  | <b>2,34</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                        |       |          |       |             |
|--|------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio              | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Boyacá   | Tenza                  | 4112  | 1229     | 2883  | <b>2,35</b> |
| Boyacá   | Tibaná                 | 9186  | 1601     | 7585  | <b>4,74</b> |
| Boyacá   | Tibasosa               | 14063 | 4766     | 9297  | <b>1,95</b> |
| Boyacá   | Tinjacá                | 3035  | 455      | 2580  | <b>5,67</b> |
| Boyacá   | Tipacoque              | 3206  | 867      | 2339  | <b>2,7</b>  |
| Boyacá   | Toca                   | 10157 | 3629     | 6528  | <b>1,8</b>  |
| Boyacá   | Togüí                  | 4966  | 760      | 4206  | <b>5,53</b> |
| Boyacá   | Tópaga                 | 3694  | 1406     | 2288  | <b>1,63</b> |
| Boyacá   | Tota                   | 5386  | 563      | 4823  | <b>8,57</b> |
| Boyacá   | Tununguá               | 1840  | 379      | 1461  | <b>3,85</b> |
| Boyacá   | Turmequé               | 6182  | 2565     | 3617  | <b>1,41</b> |
| Boyacá   | Tuta                   | 9673  | 2665     | 7008  | <b>2,63</b> |
| Boyacá   | Tutazá                 | 1890  | 195      | 1695  | <b>8,69</b> |
| Boyacá   | Umbita                 | 10314 | 1830     | 8484  | <b>4,64</b> |
| Boyacá   | Ventaquemada           | 15442 | 2399     | 13043 | <b>5,44</b> |
| Boyacá   | Viracachá              | 3222  | 374      | 2848  | <b>7,61</b> |
| Boyacá   | Zetaquirá              | 4557  | 1059     | 3498  | <b>3,3</b>  |
| Caldas   | Aguadas                | 22081 | 11509    | 10572 | 0,92        |
| Caldas   | Aranzazu               | 11422 | 6596     | 4826  | 0,73        |
| Caldas   | Belalcázar             | 10863 | 5046     | 5817  | <b>1,15</b> |
| Caldas   | Filadelfia             | 11034 | 4165     | 6869  | <b>1,65</b> |
| Caldas   | La Merced              | 5508  | 2223     | 3285  | <b>1,48</b> |
| Caldas   | Manzanares             | 23274 | 9882     | 13392 | <b>1,36</b> |
| Caldas   | Marmato                | 9096  | 1079     | 8017  | <b>7,43</b> |
| Caldas   | Marquetalia            | 14992 | 6415     | 8577  | <b>1,34</b> |
| Caldas   | Marulanda              | 3406  | 1271     | 2135  | <b>1,68</b> |
| Caldas   | Norcasia               | 6374  | 4297     | 2077  | 0,48        |
| Caldas   | Pácora                 | 11952 | 5652     | 6300  | <b>1,11</b> |
| Caldas   | Palestina              | 17760 | 6746     | 11014 | <b>1,63</b> |
| Caldas   | Pensilvania            | 26361 | 8405     | 17956 | <b>2,14</b> |
| Caldas   | Risaralda              | 9583  | 4587     | 4996  | <b>1,09</b> |
| Caldas   | Salamina               | 16635 | 10011    | 6624  | 0,66        |
| Caldas   | Samaná                 | 25777 | 5132     | 20645 | <b>4,02</b> |
| Caldas   | San José               | 7588  | 1830     | 5758  | <b>3,15</b> |
| Caldas   | Supía                  | 26728 | 12955    | 13773 | <b>1,06</b> |
| Caldas   | Victoria               | 8415  | 3652     | 4763  | <b>1,3</b>  |
| Caldas   | Viterbo                | 12469 | 10296    | 2173  | 0,21        |
| Caquetá  | Albania                | 6430  | 2465     | 3965  | <b>1,61</b> |
| Caquetá  | Belén de Los Andaquíes | 11541 | 6514     | 5027  | 0,77        |
| Caquetá  | Curillo                | 11683 | 6205     | 5478  | 0,88        |
| Caquetá  | El Doncello            | 22137 | 14410    | 7727  | 0,54        |
| Caquetá  | El Paujil              | 20224 | 10578    | 9646  | 0,91        |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                     |       |          |       |             |
|--|---------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio           | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Caquetá  | La Montañita        | 23620 | 4910     | 18710 | <b>3,81</b> |
| Caquetá  | Milán               | 11745 | 1836     | 9909  | <b>5,4</b>  |
| Caquetá  | Morelia             | 3813  | 1894     | 1919  | <b>1,01</b> |
| Caquetá  | San José del Fragua | 14921 | 6135     | 8786  | <b>1,43</b> |
| Caquetá  | Solano              | 23663 | 1944     | 21719 | <b>11,2</b> |
| Caquetá  | Solita              | 9140  | 4052     | 5088  | <b>1,26</b> |
| Caquetá  | Valparaíso          | 11629 | 3836     | 7793  | <b>2,03</b> |
| Cauca  | Almaguer            | 21243 | 1608     | 19635 | <b>12,2</b> |
| Cauca  | Argelia             | 26715 | 3937     | 22778 | <b>5,79</b> |
| Cauca  | Balboa              | 25589 | 7484     | 18105 | <b>2,42</b> |
| Cauca  | Caloto(1)(3)        | 17642 | 4583     | 13059 | <b>2,85</b> |
| Cauca  | Florencia           | 6132  | 1390     | 4742  | <b>3,41</b> |
| Cauca  | Guachené (1)        | 19815 | 5067     | 14748 | <b>2,91</b> |
| Cauca  | Guapi               | 29722 | 18111    | 11611 | 0,64        |
| Cauca  | Jambaló             | 17590 | 1208     | 16382 | <b>13,6</b> |
| Cauca  | La Sierra           | 10643 | 1501     | 9142  | <b>6,09</b> |
| Cauca  | López               | 20316 | 5681     | 14635 | <b>2,58</b> |
| Cauca  | Mercaderes          | 18061 | 5096     | 12965 | <b>2,54</b> |
| Cauca  | Morales             | 25963 | 1564     | 24399 | <b>15,6</b> |
| Cauca  | Padilla             | 7882  | 4111     | 3771  | 0,92        |
| Cauca  | Piamonte            | 7347  | 626      | 6721  | <b>10,7</b> |
| Cauca  | Puracé              | 15261 | 1706     | 13555 | <b>7,95</b> |
| Cauca  | Rosas               | 13302 | 1709     | 11593 | <b>6,78</b> |
| Cauca  | San Sebastián       | 13924 | 1260     | 12664 | <b>10,1</b> |
| Cauca  | Santa Rosa          | 10480 | 1900     | 8580  | <b>4,52</b> |
| Cauca  | Sotara              | 16968 | 354      | 16614 | <b>46,9</b> |
| Cauca  | Suárez              | 18656 | 3240     | 15416 | <b>4,76</b> |
| Cauca  | Sucre               | 8886  | 1468     | 7418  | <b>5,05</b> |
| Cauca  | Timbiquí            | 21617 | 4224     | 17393 | <b>4,12</b> |
| Cauca  | Toribio             | 29187 | 1759     | 27428 | <b>15,6</b> |
| Cauca  | Totoró              | 20123 | 1882     | 18241 | <b>9,69</b> |
| Cauca  | Villa Rica          | 16189 | 12627    | 3562  | 0,28        |
| Cesar  | Astrea              | 19195 | 9935     | 9260  | 0,93        |
| Cesar  | Becerril            | 13453 | 10341    | 3112  | 0,3         |
| Cesar  | Chiriguaná          | 19650 | 14581    | 5069  | 0,35        |
| Cesar  | Curumaní            | 24367 | 19119    | 5248  | 0,27        |
| Cesar  | El Copey            | 26473 | 20504    | 5969  | 0,29        |
| Cesar  | El Paso             | 22832 | 3975     | 18857 | <b>4,74</b> |
| Cesar  | Gamarra             | 16644 | 9377     | 7267  | 0,77        |
| Cesar  | González            | 6990  | 1316     | 5674  | <b>4,31</b> |
| Cesar  | La Gloria           | 12938 | 6248     | 6690  | <b>1,07</b> |
| Cesar  | La Jagua de Ibirico | 22282 | 19010    | 3272  | 0,17        |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                    |       |          |       |             |
|--|--------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio          | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Cesar  | Manauare           | 14514 | 9341     | 5173  | 0,55        |
| Cesar  | Pailitas           | 17166 | 13287    | 3879  | 0,29        |
| Cesar  | Pelaya             | 17910 | 12038    | 5872  | 0,49        |
| Cesar  | Pueblo Bello       | 22275 | 5436     | 16839 | <b>3,1</b>  |
| Cesar  | Río de Oro         | 14041 | 6133     | 7908  | <b>1,29</b> |
| Cesar  | La Paz             | 22815 | 14872    | 7943  | 0,53        |
| Cesar  | San Alberto        | 24652 | 18278    | 6374  | 0,35        |
| Cesar  | San Diego          | 13376 | 7494     | 5882  | 0,78        |
| Cesar  | San Martín         | 18548 | 9012     | 9536  | <b>1,06</b> |
| Cesar  | Tamalameque        | 13862 | 5585     | 8277  | <b>1,48</b> |
| Córdoba  | Buenavista         | 21628 | 8296     | 13332 | <b>1,61</b> |
| Córdoba  | Canalete           | 21548 | 4183     | 17365 | <b>4,15</b> |
| Córdoba  | Chimá              | 15018 | 3160     | 11858 | <b>3,75</b> |
| Córdoba  | Cotorra            | 15447 | 4002     | 11445 | <b>2,86</b> |
| Córdoba  | La Apartada        | 15204 | 13005    | 2199  | 0,17        |
| Córdoba  | Los Córdoba        | 23760 | 4612     | 19148 | <b>4,15</b> |
| Córdoba  | Momil              | 14864 | 9495     | 5369  | 0,57        |
| Córdoba  | Moñitos            | 27433 | 6815     | 20618 | <b>3,03</b> |
| Córdoba  | Puerto Escondido   | 29141 | 4863     | 24278 | <b>4,99</b> |
| Córdoba  | Purísima           | 15073 | 6418     | 8655  | <b>1,35</b> |
| Córdoba  | San Carlos         | 27104 | 5679     | 21425 | <b>3,77</b> |
| Córdoba  | San José de Uré(1) | 10993 | 5509     | 5484  | 1           |
| Cundinamarca   | Agua de Dios       | 10995 | 8468     | 2527  | 0,3         |
| Cundinamarca   | Albán              | 5956  | 1612     | 4344  | <b>2,69</b> |
| Cundinamarca   | Anapoima           | 13312 | 5709     | 7603  | <b>1,33</b> |
| Cundinamarca   | Anolaima           | 12311 | 3699     | 8612  | <b>2,33</b> |
| Cundinamarca   | Arbeláez           | 12292 | 5261     | 7031  | <b>1,34</b> |
| Cundinamarca   | Beltrán            | 2197  | 433      | 1764  | <b>4,07</b> |
| Cundinamarca   | Bituima            | 2520  | 444      | 2076  | <b>4,68</b> |
| Cundinamarca   | Bojacá             | 11555 | 9256     | 2299  | 0,25        |
| Cundinamarca   | Cabrera            | 4499  | 1049     | 3450  | <b>3,29</b> |
| Cundinamarca   | Cachipay           | 9833  | 3153     | 6680  | <b>2,12</b> |
| Cundinamarca   | Caparrapí          | 16691 | 2721     | 13970 | <b>5,13</b> |
| Cundinamarca   | Caqueza            | 17048 | 7297     | 9751  | <b>1,34</b> |
| Cundinamarca   | Carmen de Carupa   | 9109  | 2374     | 6735  | <b>2,84</b> |
| Cundinamarca   | Chaguaní           | 3981  | 749      | 3232  | <b>4,32</b> |
| Cundinamarca   | Chipaque           | 8400  | 2530     | 5870  | <b>2,32</b> |
| Cundinamarca   | Choachí            | 10729 | 3615     | 7114  | <b>1,97</b> |
| Cundinamarca   | Chocontá           | 25257 | 12867    | 12390 | 0,96        |
| Cundinamarca   | Cogua              | 22361 | 6950     | 15411 | <b>2,22</b> |
| Cundinamarca   | Cota               | 24916 | 14354    | 10562 | 0,74        |
| Cundinamarca   | Cucunubá           | 7479  | 1383     | 6096  | <b>4,41</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                     |       |          |       |             |
|--|---------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio           | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Cundinamarca   | El Colegio          | 21832 | 8336     | 13496 | <b>1,62</b> |
| Cundinamarca   | El Peñón            | 4805  | 445      | 4360  | <b>9,8</b>  |
| Cundinamarca   | El Rosal            | 17254 | 12347    | 4907  | 0,4         |
| Cundinamarca   | Fomeque             | 12214 | 4734     | 7480  | <b>1,58</b> |
| Cundinamarca   | Fosca               | 7524  | 1916     | 5608  | <b>2,93</b> |
| Cundinamarca   | Fúquene             | 5617  | 263      | 5354  | <b>20,4</b> |
| Cundinamarca   | Gachala             | 5715  | 2025     | 3690  | <b>1,82</b> |
| Cundinamarca   | Gachetá             | 11086 | 3689     | 7397  | <b>2,01</b> |
| Cundinamarca   | Granada             | 8685  | 2039     | 6646  | <b>3,26</b> |
| Cundinamarca   | Guachetá            | 11385 | 3756     | 7629  | <b>2,03</b> |
| Cundinamarca   | Guasca              | 14759 | 5203     | 9556  | <b>1,84</b> |
| Cundinamarca   | Guataquí            | 2630  | 1368     | 1262  | 0,92        |
| Cundinamarca   | Guatavita           | 6898  | 1960     | 4938  | <b>2,52</b> |
| Cundinamarca   | Guayabal de Siquima | 3638  | 866      | 2772  | <b>3,2</b>  |
| Cundinamarca   | Guayabetal          | 4931  | 1491     | 3440  | <b>2,31</b> |
| Cundinamarca   | Gutiérrez           | 4097  | 1116     | 2981  | <b>2,67</b> |
| Cundinamarca   | Jerusalén           | 2679  | 586      | 2093  | <b>3,57</b> |
| Cundinamarca   | Junín               | 8610  | 998      | 7612  | <b>7,63</b> |
| Cundinamarca   | La Calera           | 27527 | 11849    | 15678 | <b>1,32</b> |
| Cundinamarca   | La Palma            | 10727 | 4072     | 6655  | <b>1,63</b> |
| Cundinamarca   | La Peña             | 7029  | 995      | 6034  | <b>6,06</b> |
| Cundinamarca   | La Vega             | 14230 | 5270     | 8960  | <b>1,7</b>  |
| Cundinamarca   | Lenguazaque         | 10268 | 2282     | 7986  | <b>3,5</b>  |
| Cundinamarca   | Macheta             | 6316  | 1498     | 4818  | <b>3,22</b> |
| Cundinamarca   | Manta               | 4719  | 1285     | 3434  | <b>2,67</b> |
| Cundinamarca   | Medina              | 10108 | 3879     | 6229  | <b>1,61</b> |
| Cundinamarca   | Nariño              | 2203  | 1449     | 754   | 0,52        |
| Cundinamarca   | Nemocón             | 13488 | 5684     | 7804  | <b>1,37</b> |
| Cundinamarca   | Nilo                | 18384 | 4693     | 13691 | <b>2,92</b> |
| Cundinamarca   | Nimaima             | 6679  | 2875     | 3804  | <b>1,32</b> |
| Cundinamarca   | Nocaima             | 8004  | 1858     | 6146  | <b>3,31</b> |
| Cundinamarca   | Venecia             | 4060  | 1093     | 2967  | <b>2,71</b> |
| Cundinamarca   | Pacho               | 27179 | 15376    | 11803 | 0,77        |
| Cundinamarca   | Paima               | 4502  | 468      | 4034  | <b>8,62</b> |
| Cundinamarca   | Pandi               | 5658  | 1066     | 4592  | <b>4,31</b> |
| Cundinamarca   | Paratebuena         | 7726  | 2387     | 5339  | <b>2,24</b> |
| Cundinamarca   | Pasca               | 12175 | 2841     | 9334  | <b>3,29</b> |
| Cundinamarca   | Puerto Salgar       | 18688 | 14070    | 4618  | 0,33        |
| Cundinamarca   | Pulí                | 2999  | 662      | 2337  | <b>3,53</b> |
| Cundinamarca   | Quebradanegra       | 4738  | 386      | 4352  | <b>11,3</b> |
| Cundinamarca   | Quetame             | 7141  | 1609     | 5532  | <b>3,44</b> |
| Cundinamarca   | Quipile             | 8164  | 676      | 7488  | <b>11,1</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                            |       |          |       |             |
|--|----------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio                  | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Cundinamarca   | Apulo                      | 7812  | 3151     | 4661  | <b>1,48</b> |
| Cundinamarca   | Ricaurte                   | 9441  | 4394     | 5047  | <b>1,15</b> |
| Cundinamarca   | San Antonio del Tequendama | 13084 | 1018     | 12066 | <b>11,9</b> |
| Cundinamarca   | San Bernardo               | 10670 | 4123     | 6547  | <b>1,59</b> |
| Cundinamarca   | San Cayetano               | 5344  | 735      | 4609  | <b>6,27</b> |
| Cundinamarca   | San Francisco              | 9586  | 3385     | 6201  | <b>1,83</b> |
| Cundinamarca   | San Juan de Río Seco       | 9670  | 2919     | 6751  | <b>2,31</b> |
| Cundinamarca   | Sasaima                    | 10688 | 2429     | 8259  | <b>3,4</b>  |
| Cundinamarca   | Sesquilé                   | 13936 | 3468     | 10468 | <b>3,02</b> |
| Cundinamarca   | Silvania                   | 21984 | 6270     | 15714 | <b>2,51</b> |
| Cundinamarca   | Simijaca                   | 13077 | 7293     | 5784  | 0,79        |
| Cundinamarca   | Sopó                       | 26769 | 17151    | 9618  | 0,56        |
| Cundinamarca   | Subachoque                 | 16117 | 6061     | 10056 | <b>1,66</b> |
| Cundinamarca   | Suesca                     | 17318 | 8567     | 8751  | <b>1,02</b> |
| Cundinamarca   | Supatá                     | 5022  | 1502     | 3520  | <b>2,34</b> |
| Cundinamarca   | Susa                       | 12302 | 6315     | 5987  | 0,95        |
| Cundinamarca   | Sutatausa                  | 5564  | 1743     | 3821  | <b>2,19</b> |
| Cundinamarca   | Tabio                      | 27033 | 13145    | 13888 | <b>1,06</b> |
| Cundinamarca   | Tausa                      | 8801  | 1058     | 7743  | <b>7,32</b> |
| Cundinamarca   | Tena                       | 8941  | 835      | 8106  | <b>9,71</b> |
| Cundinamarca   | Tenjo                      | 19849 | 9421     | 10428 | <b>1,11</b> |
| Cundinamarca   | Tibacuy                    | 4828  | 523      | 4305  | <b>8,23</b> |
| Cundinamarca   | Tibirita                   | 2950  | 492      | 2458  | <b>5</b>    |
| Cundinamarca   | Tocaima                    | 18387 | 10915    | 7472  | 0,68        |
| Cundinamarca   | Topaipí                    | 4529  | 811      | 3718  | <b>4,58</b> |
| Cundinamarca   | Ubalá                      | 10718 | 1280     | 9438  | <b>7,37</b> |
| Cundinamarca   | Ubaque                     | 6166  | 879      | 5287  | <b>6,01</b> |
| Cundinamarca   | Une                        | 9196  | 4566     | 4630  | <b>1,01</b> |
| Cundinamarca   | Útica                      | 5008  | 2730     | 2278  | 0,83        |
| Cundinamarca   | Vergara                    | 7677  | 1527     | 6150  | <b>4,03</b> |
| Cundinamarca   | Vianí                      | 4191  | 1330     | 2861  | <b>2,15</b> |
| Cundinamarca   | Villagómez                 | 2171  | 619      | 1552  | <b>2,51</b> |
| Cundinamarca   | Villapinzón                | 19742 | 6526     | 13216 | <b>2,03</b> |
| Cundinamarca   | Villeta                    | 25164 | 16178    | 8986  | 0,56        |
| Cundinamarca   | Viotá                      | 13351 | 4342     | 9009  | <b>2,07</b> |
| Cundinamarca   | Yacopí                     | 16951 | 3958     | 12993 | <b>3,28</b> |
| Cundinamarca   | Zipacón                    | 5570  | 2081     | 3489  | <b>1,68</b> |
| Chocó  | Acandí                     | 9584  | 5249     | 4335  | 0,83        |
| Chocó  | Atrato                     | 9927  | 3498     | 6429  | <b>1,84</b> |
| Chocó  | Bagadó                     | 8064  | 2340     | 5724  | <b>2,45</b> |
| Chocó  | Bahía Solano               | 9327  | 4863     | 4464  | 0,92        |



| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                         |       |          |       |             |
|--|-------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio               | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Chocó  | Bajo Baudó              | 17402 | 3180     | 14222 | <b>4,47</b> |
| Chocó  | Bojaya                  | 10099 | 5114     | 4985  | 0,97        |
| Chocó  | El Cantón del San Pablo | 7970  | 3486     | 4484  | <b>1,29</b> |
| Chocó  | Carmen del Darien       | 5462  | 1321     | 4141  | <b>3,13</b> |
| Chocó  | Cértegui                | 10068 | 6293     | 3775  | 0,6         |
| Chocó  | Condoto                 | 14660 | 10324    | 4336  | 0,42        |
| Chocó  | El Carmen de Atrato     | 14049 | 6797     | 7252  | <b>1,07</b> |
| Chocó  | El Litoral del San Juan | 15251 | 1341     | 13910 | <b>10,4</b> |
| Chocó  | Istmina                 | 25351 | 20112    | 5239  | 0,26        |
| Chocó  | Juradó                  | 3319  | 1620     | 1699  | <b>1,05</b> |
| Chocó  | Lloró                   | 11197 | 3406     | 7791  | <b>2,29</b> |
| Chocó  | Medio Atrato            | 29487 | 1093     | 28394 | <b>26</b>   |
| Chocó  | Medio Baudó             | 13560 | 621      | 12939 | <b>20,8</b> |
| Chocó  | Medio San Juan          | 16317 | 5805     | 10512 | <b>1,81</b> |
| Chocó  | Nóvita                  | 7957  | 3192     | 4765  | <b>1,49</b> |
| Chocó  | Nuquí                   | 8576  | 3753     | 4823  | <b>1,29</b> |
| Chocó  | Río Iro                 | 9695  | 1592     | 8103  | <b>5,09</b> |
| Chocó  | Río Quito               | 8961  | 2584     | 6377  | <b>2,47</b> |
| Chocó  | Riosucio(2)             | 28832 | 8458     | 20374 | <b>2,41</b> |
| Chocó  | San José del Palmar     | 4822  | 1132     | 3690  | <b>3,26</b> |
| Chocó  | Sipí                    | 4048  | 348      | 3700  | <b>10,6</b> |
| Chocó  | Tadó                    | 18906 | 12266    | 6640  | 0,54        |
| Chocó  | Unguía                  | 15126 | 4714     | 10412 | <b>2,21</b> |
| Chocó  | Unión Panamericana      | 9592  | 4215     | 5377  | <b>1,28</b> |
| Huila  | Agrado                  | 9064  | 5308     | 3756  | 0,71        |
| Huila  | Aipe                    | 26219 | 16530    | 9689  | 0,59        |
| Huila  | Algeciras               | 24499 | 15505    | 8994  | 0,58        |
| Huila  | Altamira                | 4293  | 2901     | 1392  | 0,48        |
| Huila  | Baraya                  | 9610  | 5058     | 4552  | 0,9         |
| Huila  | Colombia                | 12413 | 2529     | 9884  | <b>3,91</b> |
| Huila  | Elías                   | 3930  | 1247     | 2683  | <b>2,15</b> |
| Huila  | Guadalupe               | 21271 | 5130     | 16141 | <b>3,15</b> |
| Huila  | Hobo                    | 6927  | 5337     | 1590  | 0,3         |
| Huila  | Iquirá                  | 12730 | 2377     | 10353 | <b>4,36</b> |
| Huila  | Isnos                   | 27147 | 5862     | 21285 | <b>3,63</b> |
| Huila  | La Argentina            | 14021 | 4844     | 9177  | <b>1,89</b> |
| Huila  | Nátaga                  | 6342  | 2189     | 4153  | <b>1,9</b>  |
| Huila  | Oporapa                 | 13514 | 3877     | 9637  | <b>2,49</b> |
| Huila  | Paicol                  | 5565  | 2427     | 3138  | <b>1,29</b> |
| Huila  | Palestina               | 11560 | 2080     | 9480  | <b>4,56</b> |
| Huila  | Pital                   | 13684 | 5065     | 8619  | <b>1,7</b>  |
| Huila  | Rivera                  | 18797 | 10681    | 8116  | 0,76        |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                             |       |          |       |             |
|--|-----------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio                   | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Huila  | Saladoblanco                | 11462 | 2776     | 8686  | <b>3,13</b> |
| Huila  | Santa María                 | 11346 | 3207     | 8139  | <b>2,54</b> |
| Huila  | Suaza                       | 18965 | 4345     | 14620 | <b>3,36</b> |
| Huila  | Tarqui                      | 17601 | 5036     | 12565 | <b>2,5</b>  |
| Huila  | Tesalia                     | 9248  | 5392     | 3856  | 0,72        |
| Huila  | Tello                       | 14193 | 6627     | 7566  | <b>1,14</b> |
| Huila  | Teruel                      | 8749  | 4380     | 4369  | 1           |
| Huila  | Timaná                      | 20315 | 7321     | 12994 | <b>1,77</b> |
| Huila  | Villavieja                  | 7314  | 2459     | 4855  | <b>1,97</b> |
| Huila  | Yaguará                     | 8952  | 7587     | 1365  | 0,18        |
| La Guajira   | Albania                     | 26606 | 13315    | 13291 | 1           |
| La Guajira   | Distracción                 | 15790 | 5310     | 10480 | <b>1,97</b> |
| La Guajira   | El Molino                   | 8728  | 6017     | 2711  | 0,45        |
| La Guajira   | Hatonuevo                   | 24916 | 13989    | 10927 | 0,78        |
| La Guajira   | La Jagua del Pilar          | 3213  | 2276     | 937   | 0,41        |
| La Guajira   | Urumita                     | 17910 | 10413    | 7497  | 0,72        |
| La Guajira   | Villanueva                  | 27657 | 19428    | 8229  | 0,42        |
| Magdalena  | Algarrobo                   | 12576 | 8376     | 4200  | 0,5         |
| Magdalena  | Cerro San Antonio           | 7845  | 4363     | 3482  | 0,8         |
| Magdalena  | Chivolo                     | 15960 | 10801    | 5159  | 0,48        |
| Magdalena  | Concordia                   | 9388  | 4214     | 5174  | <b>1,23</b> |
| Magdalena  | El Piñon                    | 16752 | 6162     | 10590 | <b>1,72</b> |
| Magdalena  | El Retén                    | 20981 | 16270    | 4711  | 0,29        |
| Magdalena  | Guamal                      | 27253 | 7852     | 19401 | <b>2,47</b> |
| Magdalena  | Nueva Granada               | 19783 | 8175     | 11608 | <b>1,42</b> |
| Magdalena  | Pedraza                     | 8066  | 2472     | 5594  | <b>2,26</b> |
| Magdalena  | Pijiño del Carmen           | 15759 | 7874     | 7885  | <b>1</b>    |
| Magdalena  | Remolino                    | 8150  | 5561     | 2589  | 0,47        |
| Magdalena  | Sabanas de San Angel        | 16865 | 4165     | 12700 | <b>3,05</b> |
| Magdalena  | Salamina                    | 7089  | 4441     | 2648  | 0,6         |
| Magdalena  | San Sebastián de Buenavista | 17483 | 5768     | 11715 | <b>2,03</b> |
| Magdalena  | San Zenón                   | 9107  | 1850     | 7257  | <b>3,92</b> |
| Magdalena  | Santa Ana                   | 25938 | 13034    | 12904 | 0,99        |
| Magdalena  | Santa Bárbara de Pinto      | 12610 | 7342     | 5268  | 0,72        |
| Magdalena  | Tenerife                    | 12243 | 6156     | 6087  | 0,99        |
| Magdalena  | Zapayán                     | 8801  | 3620     | 5181  | <b>1,43</b> |
| Meta   | Barranca de Upía            | 3926  | 2858     | 1068  | 0,37        |
| Meta   | Cabuyaro                    | 4018  | 1749     | 2269  | <b>1,3</b>  |
| Meta   | Castilla la Nueva           | 9612  | 4851     | 4761  | 0,98        |
| Meta   | Cubarral                    | 5946  | 3890     | 2056  | 0,53        |
| Meta   | Cumaral                     | 18020 | 12230    | 5790  | 0,47        |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                      |       |          |       |             |
|--|----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio            | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Meta   | El Calvario          | 2240  | 803      | 1437  | <b>1,79</b> |
| Meta   | El Castillo          | 6362  | 2061     | 4301  | <b>2,09</b> |
| Meta   | El Dorado            | 3429  | 1471     | 1958  | <b>1,33</b> |
| Meta   | Fuente de Oro        | 13263 | 7336     | 5927  | 0,81        |
| Meta   | Guamal               | 9366  | 6812     | 2554  | 0,37        |
| Meta   | Mapiripán            | 17229 | 1370     | 15859 | <b>11,6</b> |
| Meta   | Mesetas              | 11287 | 3661     | 7626  | <b>2,08</b> |
| Meta   | Uribe                | 16155 | 3851     | 12304 | <b>3,2</b>  |
| Meta   | Lejanías             | 9403  | 4400     | 5003  | <b>1,14</b> |
| Meta   | Puerto Concordia     | 20897 | 10358    | 10539 | <b>1,02</b> |
| Meta   | Puerto Gaitán        | 18556 | 7705     | 10851 | <b>1,41</b> |
| Meta   | Puerto Lleras        | 9817  | 2975     | 6842  | <b>2,3</b>  |
| Meta   | Puerto Rico          | 18626 | 5182     | 13444 | <b>2,59</b> |
| Meta   | Restrepo             | 10599 | 7407     | 3192  | 0,43        |
| Meta   | San Carlos de Guaroa | 9581  | 4626     | 4955  | <b>1,07</b> |
| Meta   | San Juan de Arama    | 8837  | 3898     | 4939  | <b>1,27</b> |
| Meta   | San Juanito          | 2165  | 807      | 1358  | <b>1,68</b> |
| Meta   | San Martín           | 24670 | 21960    | 2710  | 0,12        |
| Meta   | Vistahermosa         | 25461 | 8975     | 16486 | <b>1,84</b> |
| Nariño   | Albán                | 22131 | 8065     | 14066 | <b>1,74</b> |
| Nariño   | Aldana               | 6085  | 1424     | 4661  | <b>3,27</b> |
| Nariño   | Ancuyá               | 7083  | 1601     | 5482  | <b>3,42</b> |
| Nariño   | Arboleda             | 7550  | 1116     | 6434  | <b>5,77</b> |
| Nariño   | Belén                | 7518  | 2968     | 4550  | <b>1,53</b> |
| Nariño   | Buesaco              | 25063 | 6099     | 18964 | <b>3,11</b> |
| Nariño   | Colón                | 10127 | 1588     | 8539  | <b>5,38</b> |
| Nariño   | Consaca              | 9386  | 1811     | 7575  | <b>4,18</b> |
| Nariño   | Contadero            | 6954  | 2331     | 4623  | <b>1,98</b> |
| Nariño   | Córdoba              | 14006 | 2331     | 11675 | <b>5,01</b> |
| Nariño   | Cuaspud              | 8592  | 2344     | 6248  | <b>2,67</b> |
| Nariño   | Cumbitara            | 15239 | 1793     | 13446 | <b>7,5</b>  |
| Nariño   | Chachagüí            | 13784 | 7144     | 6640  | 0,93        |
| Nariño   | El Peñol             | 6500  | 1037     | 5463  | <b>5,27</b> |
| Nariño   | El Rosario           | 10201 | 3390     | 6811  | <b>2,01</b> |
| Nariño   | El Tablón de Gómez   | 12757 | 905      | 11852 | <b>13,1</b> |
| Nariño   | El Tambo             | 12271 | 5310     | 6961  | <b>1,31</b> |
| Nariño   | Funes                | 6498  | 2117     | 4381  | <b>2,07</b> |
| Nariño   | Guachucal            | 15652 | 3012     | 12640 | <b>4,2</b>  |
| Nariño   | Guaitarilla          | 12011 | 4206     | 7805  | <b>1,86</b> |
| Nariño   | Gualmatán            | 5767  | 2232     | 3535  | <b>1,58</b> |
| Nariño   | Iles                 | 8701  | 1940     | 6761  | <b>3,49</b> |
| Nariño   | Imués                | 6236  | 587      | 5649  | <b>9,62</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                      |       |          |       |             |
|--|----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio            | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Nariño   | La Cruz              | 18220 | 6609     | 11611 | <b>1,76</b> |
| Nariño   | La Florida           | 9555  | 1817     | 7738  | <b>4,26</b> |
| Nariño   | La Llanada           | 5813  | 1840     | 3973  | <b>2,16</b> |
| Nariño   | La Tola              | 12584 | 9344     | 3240  | 0,35        |
| Nariño   | La Unión             | 26078 | 10690    | 15388 | <b>1,44</b> |
| Nariño   | Leiva                | 13849 | 4388     | 9461  | <b>2,16</b> |
| Nariño   | Linares              | 10042 | 2402     | 7640  | <b>3,18</b> |
| Nariño   | Los Andes            | 19414 | 7662     | 11752 | <b>1,53</b> |
| Nariño   | Magüi                | 22437 | 4610     | 17827 | <b>3,87</b> |
| Nariño   | Mallama              | 7755  | 1231     | 6524  | <b>5,3</b>  |
| Nariño   | Mosquera             | 16270 | 5738     | 10532 | <b>1,84</b> |
| Nariño   | Nariño               | 4870  | 3690     | 1180  | 0,32        |
| Nariño   | Ospina               | 8713  | 2437     | 6276  | <b>2,58</b> |
| Nariño   | Francisco Pizarro    | 15039 | 7541     | 7498  | 0,99        |
| Nariño   | Policarpa            | 16834 | 2973     | 13861 | <b>4,66</b> |
| Nariño   | Potosí               | 12137 | 2148     | 9989  | <b>4,65</b> |
| Nariño   | Providencia          | 13256 | 5411     | 7845  | <b>1,45</b> |
| Nariño   | Puerres              | 8384  | 3040     | 5344  | <b>1,76</b> |
| Nariño   | Pupiales             | 19388 | 5971     | 13417 | <b>2,25</b> |
| Nariño   | Ricaurte             | 18666 | 2504     | 16162 | <b>6,45</b> |
| Nariño   | Roberto Payán        | 22613 | 1221     | 21392 | <b>17,5</b> |
| Nariño   | Sandoná              | 25685 | 11893    | 13792 | <b>1,16</b> |
| Nariño   | San Bernardo         | 19201 | 4163     | 15038 | <b>3,61</b> |
| Nariño   | San Lorenzo          | 19849 | 2772     | 17077 | <b>6,16</b> |
| Nariño   | San Pablo            | 17492 | 4029     | 13463 | <b>3,34</b> |
| Nariño   | San Pedro de Cartago | 7539  | 698      | 6841  | <b>9,8</b>  |
| Nariño   | Santa Bárbara        | 14752 | 2934     | 11818 | <b>4,03</b> |
| Nariño   | Santacruz            | 28171 | 6611     | 21560 | <b>3,26</b> |
| Nariño   | Sapuyes              | 6355  | 1425     | 4930  | <b>3,46</b> |
| Nariño   | Taminango            | 20537 | 4980     | 15557 | <b>3,12</b> |
| Nariño   | Tangua               | 9629  | 2328     | 7301  | <b>3,14</b> |
| Nariño   | Yacuanquer           | 10968 | 2815     | 8153  | <b>2,9</b>  |
| Nte de Santander                                       | Arboledas            | 8984  | 2490     | 6494  | <b>2,61</b> |
| Nte de Santander                                       | Bochalema            | 6973  | 2509     | 4464  | <b>1,78</b> |
| Nte de Santander                                       | Bucarasica           | 4570  | 592      | 3978  | <b>6,72</b> |
| Nte de Santander                                       | Cácota               | 1925  | 563      | 1362  | <b>2,42</b> |
| Nte de Santander                                       | Cachirá              | 10970 | 1700     | 9270  | <b>5,45</b> |
| Nte de Santander                                       | Chinácota            | 16348 | 11086    | 5262  | 0,47        |
| Nte de Santander                                       | Chitagá              | 10373 | 3650     | 6723  | <b>1,84</b> |
| Nte de Santander                                       | Convención           | 13569 | 5173     | 8396  | <b>1,62</b> |
| Nte de Santander                                       | Cucutilla            | 7686  | 1224     | 6462  | <b>5,28</b> |
| Nte de Santander                                       | Durania              | 3768  | 1802     | 1966  | <b>1,09</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                  |       |          |       |             |
|--|------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio        | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Nte de Santander                                       | El Carmen        | 14005 | 2346     | 11659 | <b>4,97</b> |
| Nte de Santander                                       | El Tarra         | 10957 | 4452     | 6505  | <b>1,46</b> |
| Nte de Santander                                       | El Zulia         | 22843 | 13671    | 9172  | 0,67        |
| Nte de Santander                                       | Gramalote        | 5567  | 2748     | 2819  | <b>1,03</b> |
| Nte de Santander                                       | Hacarí           | 10657 | 1220     | 9437  | <b>7,74</b> |
| Nte de Santander                                       | Herrán           | 4045  | 1034     | 3011  | <b>2,91</b> |
| Nte de Santander                                       | Labateca         | 5867  | 1427     | 4440  | <b>3,11</b> |
| Nte de Santander                                       | La Esperanza     | 12012 | 1712     | 10300 | <b>6,02</b> |
| Nte de Santander                                       | La Playa         | 8546  | 641      | 7905  | <b>12,3</b> |
| Nte de Santander                                       | Lourdes          | 3365  | 1221     | 2144  | <b>1,76</b> |
| Nte de Santander                                       | Mutiscua         | 3759  | 536      | 3223  | <b>6,01</b> |
| Nte de Santander                                       | Pamplonita       | 4932  | 900      | 4032  | <b>4,48</b> |
| Nte de Santander                                       | Puerto Santander | 10249 | 9514     | 735   | 0,08        |
| Nte de Santander                                       | Ragonvalia       | 6891  | 2897     | 3994  | <b>1,38</b> |
| Nte de Santander                                       | Salazar          | 8964  | 3747     | 5217  | <b>1,39</b> |
| Nte de Santander                                       | San Calixto      | 13514 | 2153     | 11361 | <b>5,28</b> |
| Nte de Santander                                       | San Cayetano     | 5424  | 2092     | 3332  | <b>1,59</b> |
| Nte de Santander                                       | Santiago         | 2823  | 1358     | 1465  | <b>1,08</b> |
| Nte de Santander                                       | Sardinata        | 22632 | 9188     | 13444 | <b>1,46</b> |
| Nte de Santander                                       | Silos            | 4445  | 986      | 3459  | <b>3,51</b> |
| Nte de Santander                                       | Teorama          | 21524 | 2702     | 18822 | <b>6,97</b> |
| Nte de Santander                                       | Toledo           | 17283 | 4470     | 12813 | <b>2,87</b> |
| Nte de Santander                                       | Villa Caro       | 5192  | 1961     | 3231  | <b>1,65</b> |
| Quindío  | Buenavista       | 2834  | 1191     | 1643  | <b>1,38</b> |
| Quindío  | Circasia         | 29886 | 22471    | 7415  | 0,33        |
| Quindío  | Córdoba          | 5305  | 2995     | 2310  | 0,77        |
| Quindío  | Filandia         | 13414 | 7151     | 6263  | 0,88        |
| Quindío  | Génova           | 7916  | 3984     | 3932  | 0,99        |
| Quindío  | Pijao            | 6139  | 3689     | 2450  | 0,66        |
| Quindío  | Salento          | 7111  | 3791     | 3320  | 0,88        |
| Risaralda  | Apía             | 18976 | 8236     | 10740 | <b>1,3</b>  |
| Risaralda  | Balboa           | 6331  | 1846     | 4485  | <b>2,43</b> |
| Risaralda  | Belén de Umbría  | 27721 | 13126    | 14595 | <b>1,11</b> |
| Risaralda  | Guática          | 15306 | 3969     | 11337 | <b>2,86</b> |
| Risaralda  | La Celia         | 8598  | 3430     | 5168  | <b>1,51</b> |
| Risaralda  | Marsella         | 23299 | 13348    | 9951  | 0,75        |
| Risaralda  | Mistrató         | 16177 | 4252     | 11925 | <b>2,8</b>  |
| Risaralda  | Pueblo Rico      | 13283 | 3338     | 9945  | <b>2,98</b> |
| Risaralda  | Santuario        | 15715 | 7258     | 8457  | <b>1,17</b> |
| Santander  | Aguada           | 1855  | 225      | 1630  | <b>7,24</b> |
| Santander  | Albania          | 5096  | 602      | 4494  | <b>7,47</b> |
| Santander  | Aratoca          | 8312  | 2435     | 5877  | <b>2,41</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                      |       |          |       |             |
|--|----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio            | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Santander  | Barbosa              | 28635 | 23070    | 5565  | 0,24        |
| Santander  | Barichara            | 7215  | 2617     | 4598  | <b>1,76</b> |
| Santander  | Betulia              | 5110  | 1114     | 3996  | <b>3,59</b> |
| Santander  | Bolívar              | 12351 | 1319     | 11032 | <b>8,36</b> |
| Santander  | Cabrera              | 2267  | 634      | 1633  | <b>2,58</b> |
| Santander  | California           | 1984  | 1062     | 922   | 0,87        |
| Santander  | Capitanejo           | 5593  | 3120     | 2473  | 0,79        |
| Santander  | Carcasí              | 5039  | 652      | 4387  | <b>6,73</b> |
| Santander  | Cepitá               | 1865  | 526      | 1339  | <b>2,55</b> |
| Santander  | Cerrito              | 5708  | 2586     | 3122  | <b>1,21</b> |
| Santander  | Charalá              | 10540 | 5831     | 4709  | 0,81        |
| Santander  | Charta               | 2670  | 592      | 2078  | <b>3,51</b> |
| Santander  | Chima                | 3087  | 862      | 2225  | <b>2,58</b> |
| Santander  | Chipatá              | 5088  | 688      | 4400  | <b>6,4</b>  |
| Santander  | Concepción           | 5292  | 2555     | 2737  | <b>1,07</b> |
| Santander  | Confines             | 2705  | 402      | 2303  | <b>5,73</b> |
| Santander  | Contratación         | 3491  | 2698     | 793   | 0,29        |
| Santander  | Coromoro             | 7558  | 1033     | 6525  | <b>6,32</b> |
| Santander  | Curití               | 11899 | 3586     | 8313  | <b>2,32</b> |
| Santander  | El Carmen de Chucurí | 20099 | 5830     | 14269 | <b>2,45</b> |
| Santander  | El Guacamayo         | 2005  | 424      | 1581  | <b>3,73</b> |
| Santander  | El Peñón             | 5140  | 893      | 4247  | <b>4,76</b> |
| Santander  | El Playón            | 11776 | 5618     | 6158  | <b>1,1</b>  |
| Santander  | Encino               | 2497  | 461      | 2036  | <b>4,42</b> |
| Santander  | Enciso               | 3323  | 640      | 2683  | <b>4,19</b> |
| Santander  | Florián              | 6301  | 1480     | 4821  | <b>3,26</b> |
| Santander  | Galán                | 2311  | 614      | 1697  | <b>2,76</b> |
| Santander  | Gambita              | 5044  | 390      | 4654  | <b>11,9</b> |
| Santander  | Guaca                | 6395  | 2193     | 4202  | <b>1,92</b> |
| Santander  | Guadalupe            | 4756  | 1543     | 3213  | <b>2,08</b> |
| Santander  | Guapotá              | 2139  | 532      | 1607  | <b>3,02</b> |
| Santander  | Guavatá              | 3679  | 730      | 2949  | <b>4,04</b> |
| Santander  | Güepsa               | 3849  | 1904     | 1945  | <b>1,02</b> |
| Santander  | Hato                 | 2345  | 823      | 1522  | <b>1,85</b> |
| Santander  | Jesús María          | 3137  | 854      | 2283  | <b>2,67</b> |
| Santander  | Jordán               | 1103  | 56       | 1047  | <b>18,7</b> |
| Santander  | La Belleza           | 8587  | 1910     | 6677  | <b>3,5</b>  |
| Santander  | Landázuri            | 15374 | 3672     | 11702 | <b>3,19</b> |
| Santander  | La Paz               | 5152  | 832      | 4320  | <b>5,19</b> |
| Santander  | Los Santos           | 12185 | 1899     | 10286 | <b>5,42</b> |
| Santander  | Macaravita           | 2378  | 290      | 2088  | <b>7,2</b>  |
| Santander  | Málaga               | 18382 | 15371    | 3011  | 0,2         |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                       |       |          |       |             |
|--|-----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio             | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Santander  | Matanza               | 5297  | 1099     | 4198  | <b>3,82</b> |
| Santander  | Mogotes               | 10880 | 3831     | 7049  | <b>1,84</b> |
| Santander  | Molagavita            | 5193  | 773      | 4420  | <b>5,72</b> |
| Santander  | Ocamonte              | 4775  | 671      | 4104  | <b>6,12</b> |
| Santander  | Oiba                  | 11738 | 5547     | 6191  | <b>1,12</b> |
| Santander  | Onzaga                | 5054  | 1229     | 3825  | <b>3,11</b> |
| Santander  | Palmar                | 3330  | 987      | 2343  | <b>2,37</b> |
| Santander  | Palmas del Socorro    | 2241  | 683      | 1558  | <b>2,28</b> |
| Santander  | Páramo                | 4112  | 1388     | 2724  | <b>1,96</b> |
| Santander  | Pinchote              | 5201  | 1521     | 3680  | <b>2,42</b> |
| Santander  | Puente Nacional       | 12476 | 5611     | 6865  | <b>1,22</b> |
| Santander  | Puerto Parra          | 7548  | 3661     | 3887  | <b>1,06</b> |
| Santander  | Rionegro              | 27114 | 6759     | 20355 | <b>3,01</b> |
| Santander  | Sabana de Torres      | 18652 | 12236    | 6416  | 0,52        |
| Santander  | San Andrés            | 8540  | 2621     | 5919  | <b>2,26</b> |
| Santander  | San Benito            | 3986  | 464      | 3522  | <b>7,59</b> |
| Santander  | San Joaquín           | 2488  | 667      | 1821  | <b>2,73</b> |
| Santander  | San José de Miranda   | 4346  | 887      | 3459  | <b>3,9</b>  |
| Santander  | San Miguel            | 2379  | 389      | 1990  | <b>5,12</b> |
| Santander  | Santa Bárbara         | 2137  | 404      | 1733  | <b>4,29</b> |
| Santander  | Santa Helena del Opón | 4304  | 610      | 3694  | <b>6,06</b> |
| Santander  | Simacota              | 7789  | 2480     | 5309  | <b>2,14</b> |
| Santander  | Suaita                | 10277 | 1848     | 8429  | <b>4,56</b> |
| Santander  | Sucre                 | 8397  | 404      | 7993  | <b>19,8</b> |
| Santander  | Suratá                | 3295  | 688      | 2607  | <b>3,79</b> |
| Santander  | Tona                  | 7085  | 558      | 6527  | <b>11,7</b> |
| Santander  | Valle de San José     | 4670  | 1942     | 2728  | <b>1,4</b>  |
| Santander  | Vélez                 | 19057 | 10231    | 8826  | 0,86        |
| Santander  | Vetas                 | 2435  | 1319     | 1116  | 0,85        |
| Santander  | Villanueva            | 5858  | 3608     | 2250  | 0,62        |
| Santander  | Zapatoca              | 8929  | 5673     | 3256  | 0,57        |
| Sucre  | Buenvista             | 9552  | 8095     | 1457  | 0,18        |
| Sucre  | Caimito               | 12077 | 3347     | 8730  | <b>2,61</b> |
| Sucre  | Coloso                | 5838  | 3024     | 2814  | 0,93        |
| Sucre  | Coveñas               | 13530 | 3812     | 9718  | <b>2,55</b> |
| Sucre  | Chalán                | 4354  | 2721     | 1633  | 0,6         |
| Sucre  | El Roble              | 10550 | 4375     | 6175  | <b>1,41</b> |
| Sucre  | Galeras               | 20188 | 12364    | 7824  | 0,63        |
| Sucre  | Guaranda              | 17422 | 6576     | 10846 | <b>1,65</b> |
| Sucre  | La Unión              | 11170 | 6016     | 5154  | 0,86        |
| Sucre  | Los Palmitos          | 19257 | 9014     | 10243 | <b>1,14</b> |
| Sucre  | Morroa                | 14429 | 6612     | 7817  | <b>1,18</b> |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                     |       |          |       |             |
|--|---------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio           | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Sucre  | Ovejas              | 21091 | 11947    | 9144  | 0,77        |
| Sucre  | Palmito             | 13682 | 5345     | 8337  | <b>1,56</b> |
| Sucre  | San Benito Abad     | 25442 | 5314     | 20128 | <b>3,79</b> |
| Sucre  | San Juan de Betulia | 12544 | 6508     | 6036  | 0,93        |
| Sucre  | San Pedro           | 16038 | 11139    | 4899  | 0,44        |
| Sucre  | Sucre               | 22386 | 7781     | 14605 | <b>1,88</b> |
| Sucre  | Tolú Viejo          | 18897 | 5445     | 13452 | <b>2,47</b> |
| Tolima   | Alpujarra           | 4992  | 1863     | 3129  | <b>1,68</b> |
| Tolima   | Alvarado            | 8834  | 3379     | 5455  | <b>1,61</b> |
| Tolima   | Ambalema            | 6837  | 5231     | 1606  | 0,31        |
| Tolima   | Anzoátegui          | 18434 | 2109     | 16325 | <b>7,74</b> |
| Tolima   | Armero              | 11960 | 8441     | 3519  | 0,42        |
| Tolima   | Ataco               | 22513 | 5189     | 17324 | <b>3,34</b> |
| Tolima   | Cajamarca           | 19656 | 9968     | 9688  | 0,97        |
| Tolima   | Carmen de Apicalá   | 8793  | 6849     | 1944  | 0,28        |
| Tolima   | Casabianca          | 6684  | 1464     | 5220  | <b>3,57</b> |
| Tolima   | Coello              | 9740  | 1866     | 7874  | <b>4,22</b> |
| Tolima   | Coyaima             | 28304 | 4783     | 23521 | <b>4,92</b> |
| Tolima   | Cunday              | 9719  | 2270     | 7449  | <b>3,28</b> |
| Tolima   | Dolores             | 8108  | 3266     | 4842  | <b>1,48</b> |
| Tolima   | Falan               | 9218  | 1651     | 7567  | <b>4,58</b> |
| Tolima   | Flandes             | 29106 | 25056    | 4050  | 0,16        |
| Tolima   | Herveo              | 8100  | 2063     | 6037  | <b>2,93</b> |
| Tolima   | Honda               | 24781 | 24023    | 758   | 0,03        |
| Tolima   | Icononzo            | 10982 | 3430     | 7552  | <b>2,2</b>  |
| Tolima   | Lérida              | 17584 | 14309    | 3275  | 0,23        |
| Tolima   | Murillo             | 5029  | 1493     | 3536  | <b>2,37</b> |
| Tolima   | Natagaima           | 22574 | 15071    | 7503  | 0,5         |
| Tolima   | Palocabildo         | 9197  | 2843     | 6354  | <b>2,23</b> |
| Tolima   | Piedras             | 5619  | 1764     | 3855  | <b>2,19</b> |
| Tolima   | Planadas            | 29935 | 7621     | 22314 | <b>2,93</b> |
| Tolima   | Prado               | 7791  | 3274     | 4517  | <b>1,38</b> |
| Tolima   | Purificación        | 29284 | 17702    | 11582 | 0,65        |
| Tolima   | Rioblanco           | 24553 | 4673     | 19880 | <b>4,25</b> |
| Tolima   | Roncesvalles        | 6331  | 1489     | 4842  | <b>3,25</b> |
| Tolima   | Rovira              | 20641 | 9913     | 10728 | <b>1,08</b> |
| Tolima   | Saldaña             | 14447 | 8621     | 5826  | 0,68        |
| Tolima   | San Antonio         | 14400 | 4230     | 10170 | <b>2,4</b>  |
| Tolima   | San Luis            | 19164 | 3705     | 15459 | <b>4,17</b> |
| Tolima   | Santa Isabel        | 6382  | 2283     | 4099  | <b>1,8</b>  |
| Tolima   | Suárez              | 4555  | 2161     | 2394  | <b>1,11</b> |
| Tolima   | Valle de San Juan   | 6355  | 2900     | 3455  | <b>1,19</b> |



| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                |       |          |       |             |
|--|----------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio      | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Tolima   | Venadillo      | 19586 | 14294    | 5292  | 0,37        |
| Tolima   | Villahermosa   | 10696 | 3682     | 7014  | <b>1,9</b>  |
| Tolima   | Villarrica     | 5449  | 2197     | 3252  | <b>1,48</b> |
| Valle del Cauca  | Alcalá         | 21352 | 11440    | 9912  | 0,87        |
| Valle del Cauca  | Andalucía      | 17811 | 14658    | 3153  | 0,22        |
| Valle del Cauca  | Ansermanuevo   | 19557 | 13192    | 6365  | 0,48        |
| Valle del Cauca  | Argelia        | 6440  | 3110     | 3330  | <b>1,07</b> |
| Valle del Cauca  | Bolívar        | 13474 | 3437     | 10037 | <b>2,92</b> |
| Valle del Cauca  | Bugalagrande   | 21167 | 11902    | 9265  | 0,78        |
| Valle del Cauca  | Caicedonia     | 29824 | 24441    | 5383  | 0,22        |
| Valle del Cauca  | Calima         | 15763 | 9363     | 6400  | 0,68        |
| Valle del Cauca  | El Águila      | 11069 | 2689     | 8380  | <b>3,12</b> |
| Valle del Cauca  | El Cairo       | 9976  | 2812     | 7164  | <b>2,55</b> |
| Valle del Cauca  | El Dovio       | 8508  | 5057     | 3451  | 0,68        |
| Valle del Cauca  | Ginebra        | 21055 | 10119    | 10936 | <b>1,08</b> |
| Valle del Cauca  | La Cumbre      | 11512 | 2494     | 9018  | <b>3,62</b> |
| Valle del Cauca  | La Victoria    | 13247 | 9439     | 3808  | 0,4         |
| Valle del Cauca  | Obando         | 14980 | 11104    | 3876  | 0,35        |
| Valle del Cauca  | Restrepo       | 16227 | 9091     | 7136  | 0,78        |
| Valle del Cauca  | Riofrío        | 14716 | 4869     | 9847  | <b>2,02</b> |
| Valle del Cauca  | San Pedro      | 18128 | 7246     | 10882 | <b>1,5</b>  |
| Valle del Cauca  | Toro           | 16394 | 9303     | 7091  | 0,76        |
| Valle del Cauca  | Trujillo       | 18100 | 8193     | 9907  | <b>1,21</b> |
| Valle del Cauca  | Ulloa          | 5457  | 2680     | 2777  | <b>1,04</b> |
| Valle del Cauca  | Versalles      | 7214  | 3000     | 4214  | <b>1,4</b>  |
| Valle del Cauca  | Vijes          | 11010 | 7112     | 3898  | 0,55        |
| Valle del Cauca  | Yotoco         | 16263 | 8297     | 7966  | 0,96        |
| Arauca   | Cravo Nte      | 3331  | 2319     | 1012  | 0,44        |
| Arauca   | Fortul         | 25379 | 13081    | 12298 | 0,94        |
| Arauca   | Puerto Rondón  | 3844  | 2864     | 980   | 0,34        |
| Casanare   | Chameza        | 2460  | 1617     | 843   | 0,52        |
| Casanare   | Hato Corozal   | 12147 | 5280     | 6867  | <b>1,3</b>  |
| Casanare   | La Salina      | 1420  | 610      | 810   | <b>1,33</b> |
| Casanare   | Maní           | 11135 | 7522     | 3613  | 0,48        |
| Casanare   | Monterrey      | 14828 | 12515    | 2313  | 0,18        |
| Casanare   | Nunchía        | 8827  | 2112     | 6715  | <b>3,18</b> |
| Casanare   | Orocué         | 8309  | 5215     | 3094  | 0,59        |
| Casanare   | Paz de Ariporo | 26605 | 19135    | 7470  | 0,39        |
| Casanare   | Pore           | 7919  | 3968     | 3951  | 1           |
| Casanare   | Recetor        | 4070  | 1487     | 2583  | <b>1,74</b> |
| Casanare   | Sabanalarga    | 2987  | 1506     | 1481  | 0,98        |
| Casanare   | Sácama         | 2001  | 1414     | 587   | 0,42        |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                       |       |          |       |             |
|--|-----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio             | Total | cabecera | Rural | IPU         |
| Casanare   | San Luis de Palenque  | 7765  | 2279     | 5486  | <b>2,41</b> |
| Casanare   | Támara                | 7040  | 2328     | 4712  | <b>2,02</b> |
| Casanare   | Tauramena             | 22076 | 14771    | 7305  | 0,49        |
| Casanare   | Trinidad              | 14741 | 8400     | 6341  | 0,75        |
| Casanare   | Villanueva            | 23859 | 20512    | 3347  | 0,16        |
| Putumayo   | Colón                 | 5519  | 3276     | 2243  | 0,68        |
| Putumayo   | Puerto Caicedo        | 14575 | 5198     | 9377  | <b>1,8</b>  |
| Putumayo   | Puerto Guzmán         | 23699 | 4692     | 19007 | <b>4,05</b> |
| Putumayo   | Leguízamo             | 15445 | 9029     | 6416  | 0,71        |
| Putumayo   | Sibundoy              | 14136 | 10280    | 3856  | 0,38        |
| Putumayo   | San Francisco         | 7083  | 4152     | 2931  | 0,71        |
| Putumayo   | San Miguel            | 26551 | 5811     | 20740 | <b>3,57</b> |
| Putumayo   | Santiago              | 10428 | 4259     | 6169  | <b>1,45</b> |
| Putumayo   | Villagarzón           | 21134 | 10914    | 10220 | 0,94        |
| San Andrés   | Providencia           | 5137  | 2266     | 2871  | <b>1,27</b> |
| Amazonas   | El Encanto (CD)       | 4841  | 0        | 4841  | 0           |
| Amazonas   | La Chorrera (CD)      | 3878  | 0        | 3878  | 0           |
| Amazonas   | La Pedrera (CD)       | 4985  | 0        | 4985  | 0           |
| Amazonas   | La Victoria (CD)      | 1102  | 0        | 1102  | 0           |
| Amazonas   | Miriti - Paraná (CD)  | 1531  | 0        | 1531  | 0           |
| Amazonas   | Puerto Alegría (CD)   | 1941  | 0        | 1941  | 0           |
| Amazonas   | Puerto Arica (CD)     | 1350  | 0        | 1350  | 0           |
| Amazonas   | Puerto Nariño         | 8162  | 2164     | 5998  | <b>2,77</b> |
| Amazonas   | Puerto Santander (CD) | 2932  | 0        | 2932  | 0           |
| Amazonas   | Tarapacá (CD)         | 4195  | 0        | 4195  | 0           |
| Guainía  | Inírida               | 19816 | 12690    | 7126  | 0,56        |
| Guainía  | Barranco Minas (CD)   | 4862  | 0        | 4862  | 0           |
| Guainía  | Mapiripana (CD)       | 2845  | 0        | 2845  | 0           |
| Guainía  | San Felipe (CD)       | 2050  | 0        | 2050  | 0           |
| Guainía  | Puerto Colombia (CD)  | 4736  | 0        | 4736  | 0           |
| Guainía  | La Guadalupe (CD)     | 358   | 0        | 358   | 0           |
| Guainía  | Cacahual (CD)         | 2474  | 0        | 2474  | 0           |
| Guainía  | Pana Pana (CD)        | 3149  | 0        | 3149  | 0           |
| Guainía  | Morichal (CD)         | 1192  | 0        | 1192  | 0           |
| Guaviare   | Calamar               | 9091  | 5305     | 3786  | 0,71        |
| Guaviare   | El Retorno            | 22975 | 11684    | 11291 | 0,97        |
| Guaviare   | Miraflores            | 14439 | 3469     | 10970 | <b>3,16</b> |
| Vaupés   | Caruru                | 3327  | 686      | 2641  | <b>3,85</b> |
| Vaupés   | Pacoa (CD)            | 5709  | 0        | 5709  | 0           |
| Vaupés   | Taraira               | 976   | 146      | 830   | <b>5,68</b> |
| Vaupés   | Papunaua (CD)         | 845   | 0        | 845   | 0           |
| Vaupés   | Yavaraté (CD)         | 1240  | 0        | 1240  | 0           |

| <b>GRUPO G1 municipios menores a 30.000 habitantes</b> |                |       |          |       |      |
|--|----------------|-------|----------|-------|------|
| Departamento   | Municipio      | Total | cabecera | Rural | IPU  |
| Vichada  | Puerto Carreño | 15753 | 13217    | 2536  | 0,19 |
| Vichada  | La Primavera   | 15342 | 8502     | 6840  | 0,8  |
| Vichada  | Santa Rosalía  | 4012  | 2622     | 1390  | 0,53 |

| <b>GRUPO G2 municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes</b> |                      |              |              |              |             |
|--|----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Departamento   | Municipio            | Total        | Cabecera     | Rural        | IPU         |
| <b>Antioquia</b>   | <b>Andes</b>         | <b>45814</b> | <b>22667</b> | <b>23147</b> | <b>1,02</b> |
| Antioquia  | Arboletes            | 40147        | 16870        | 23277        | 1,38        |
| Antioquia  | Barbosa              | 50050        | 23003        | 27047        | 1,18        |
| Antioquia  | Cáceres              | 37806        | 8695         | 29111        | 3,35        |
| Antioquia  | Caldas               | 77854        | 61343        | 16511        | 0,27        |
| Antioquia  | Carepa               | 55788        | 42808        | 12980        | 0,30        |
| Antioquia  | El Carmen de Viboral | 46751        | 30107        | 16644        | 0,55        |
| Antioquia  | Chigorodó            | 76202        | 66530        | 9672         | 0,15        |
| Antioquia  | Copacabana           | 70171        | 61281        | 8890         | 0,15        |
| Antioquia  | El Bagre             | 49583        | 25955        | 23628        | <b>0,91</b> |
| Antioquia  | Girardota            | 54219        | 32453        | 21766        | 0,67        |
| Antioquia  | La Ceja              | 52723        | 45779        | 6944         | 0,15        |
| Antioquia  | La Estrella          | 62344        | 35099        | 27245        | 0,78        |
| Antioquia  | Marinilla            | 53374        | 41861        | 11513        | 0,28        |
| Antioquia  | Necoclí              | 62365        | 15419        | 46946        | 3,04        |
| Antioquia  | Puerto Berrío        | 46883        | 42084        | 4799         | 0,11        |
| Antioquia  | Sabaneta             | 51868        | 41380        | 10488        | 0,25        |
| Antioquia  | San Pedro de Uraba   | 31280        | 14104        | 17176        | 1,22        |
| Antioquia  | Santa Rosa de Osos   | 35650        | 18640        | 17010        | <b>0,91</b> |
| Antioquia  | Segovia              | 40174        | 31934        | 8240         | 0,26        |
| Antioquia  | Sonson               | 35405        | 15109        | 20296        | 1,34        |
| Antioquia  | Tarazá               | 42641        | 26693        | 15948        | 0,60        |
| Antioquia  | Urrao                | 44648        | 17401        | 27247        | 1,57        |
| Antioquia  | Yarumal              | 46865        | 30515        | 16350        | 0,54        |
| Antioquia  | Zaragoza             | 30738        | 13978        | 16760        | 1,20        |
| Atlántico  | Baranoa              | 57845        | 48570        | 9275         | 0,19        |
| Atlántico  | Galapa               | 42706        | 38730        | 3976         | 0,10        |
| Atlántico  | Sabanagrande         | 31678        | 30641        | 1037         | 0,03        |
| Atlántico  | Sabanalarga          | 98173        | 80432        | 17741        | 0,22        |
| Bolívar  | Arjona               | 72514        | 57002        | 15512        | 0,27        |
| Bolívar  | El Carmen de Bolívar | 75151        | 59639        | 15512        | 0,26        |
| Bolívar  | María La Baja        | 48079        | 21159        | 26920        | 1,27        |
| Bolívar  | Mompós               | 44124        | 25785        | 18339        | 0,71        |
| Bolívar  | San Juan Nepomuceno  | 33466        | 26441        | 7025         | 0,27        |
| Bolívar  | San Pablo            | 33291        | 29395        | 3896         | 0,13        |

| <b>GRUPO G2 municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes</b> |                        |       |          |       |             |
|--|------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio              | Total | Cabecera | Rural | IPU         |
| Bolívar  | Santa Rosa del Sur     | 42003 | 22563    | 19440 | 0,86        |
| Bolívar  | Turbaco                | 72168 | 66913    | 5255  | 0,08        |
| Boyacá   | Chiquinquirá           | 65274 | 56061    | 9213  | 0,16        |
| Boyacá   | Paipa                  | 30740 | 18950    | 11790 | 0,62        |
| Boyacá   | Puerto Boyacá          | 55286 | 37722    | 17564 | 0,47        |
| Caldas   | Anserma                | 33792 | 21425    | 12367 | 0,58        |
| Caldas   | Chinchiná              | 51492 | 45875    | 5617  | 0,12        |
| Caldas   | La Dorada              | 76963 | 69227    | 7736  | 0,11        |
| Caldas   | Neira                  | 30513 | 16209    | 14304 | 0,88        |
| Caldas   | Riosucio               | 61535 | 18990    | 42545 | 2,24        |
| Caldas   | Villamaría             | 56288 | 46479    | 9809  | 0,21        |
| Caquetá  | Cartagena del Chairá   | 33391 | 12198    | 21193 | 1,74        |
| Caquetá  | Puerto Rico            | 33347 | 14207    | 19140 | 1,35        |
| Caquetá  | San Vicente del Caguán | 67994 | 41948    | 26046 | 0,62        |
| Cauca  | Bolívar                | 44611 | 5282     | 39329 | 7,45        |
| Cauca  | Buenos Aires           | 32225 | 2451     | 29774 | 12,15       |
| Cauca  | Cajibío                | 37522 | 1725     | 35797 | 20,75       |
| Cauca  | Caldono                | 33122 | 1454     | 31668 | 21,78       |
| Cauca  | Corinto                | 31872 | 12932    | 18940 | 1,46        |
| Cauca  | El Tambo               | 47525 | 6822     | 40703 | 5,97        |
| Cauca  | Inzá                   | 30803 | 2266     | 28537 | 12,59       |
| Cauca  | La Vega                | 45563 | 3239     | 42324 | 13,07       |
| Cauca  | Miranda                | 39718 | 28454    | 11264 | 0,40        |
| Cauca  | Paez                   | 35059 | 2711     | 32348 | 11,93       |
| Cauca  | Patía                  | 36205 | 13444    | 22761 | 1,69        |
| Cauca  | Piendamó               | 42886 | 14696    | 28190 | 1,92        |
| Cauca  | Puerto Tejada          | 45678 | 40304    | 5374  | 0,13        |
| Cauca  | Santander de Quilichao | 93545 | 52970    | 40575 | 0,77        |
| Cauca  | Silvia                 | 32159 | 4289     | 27870 | 6,50        |
| Cauca  | Timbío                 | 33883 | 13269    | 20614 | 1,55        |
| Cesar  | Aguachica              | 92957 | 80978    | 11979 | 0,15        |
| Cesar  | Agustín Codazzi        | 50829 | 38727    | 12102 | 0,31        |
| Cesar  | Bosconia               | 37248 | 33889    | 3359  | 0,10        |
| Cesar  | Chimichagua            | 30658 | 11715    | 18943 | 1,62        |
| Córdoba  | Ayapel                 | 51164 | 26475    | 24689 | <b>0,93</b> |
| Córdoba  | Cereté                 | 91525 | 52675    | 38850 | 0,74        |
| Córdoba  | Chinú                  | 48304 | 24043    | 24261 | <b>1,01</b> |
| Córdoba  | Ciénaga de Oro         | 64226 | 25671    | 38555 | 1,50        |
| Córdoba  | Montelíbano(1)(3)      | 81341 | 64109    | 17232 | 0,27        |
| Córdoba  | Planeta Rica           | 67188 | 42461    | 24727 | 0,58        |
| Córdoba  | Pueblo Nuevo           | 38559 | 15011    | 23548 | 1,57        |
| Córdoba  | Puerto Libertador      | 47643 | 19549    | 28094 | 1,44        |

| <b>GRUPO G2 municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes</b> |                         |       |          |       |             |
|--|-------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio               | Total | Cabecera | Rural | IPU         |
| Córdoba  | Sahagún                 | 89867 | 48172    | 41695 | 0,87        |
|  | San Andrés Sotavento    |       |          |       |             |
| Córdoba  | (1) (3)                 | 42747 | 12541    | 30206 | 2,41        |
| Córdoba  | San Antero              | 31365 | 17506    | 13859 | 0,79        |
| Córdoba  | San Bernardo del Viento | 34782 | 9193     | 25589 | 2,78        |
| Córdoba  | San Pelayo              | 43584 | 8208     | 35376 | 4,31        |
| Córdoba  | Tierralta               | 99911 | 43884    | 56027 | 1,28        |
| Córdoba  | Tuchín (1)              | 37716 | 6031     | 31685 | 5,25        |
| Córdoba  | Valencia                | 42971 | 15601    | 27370 | 1,75        |
| Cundinamarca   | Cajicá                  | 56875 | 35700    | 21175 | 0,59        |
| Cundinamarca   | Funza                   | 75350 | 70622    | 4728  | 0,07        |
| Cundinamarca   | Guaduas                 | 38366 | 19434    | 18932 | <b>0,97</b> |
| Cundinamarca   | La Mesa                 | 31350 | 17521    | 13829 | 0,79        |
| Cundinamarca   | Madrid                  | 77627 | 67527    | 10100 | 0,15        |
| Cundinamarca   | Mosquera                | 82750 | 79316    | 3434  | 0,04        |
| Cundinamarca   | Sibaté                  | 38412 | 25903    | 12509 | 0,48        |
| Cundinamarca   | Tocancipá               | 31975 | 13618    | 18357 | 1,35        |
|  | Villa de San Diego de   |       |          |       |             |
| Cundinamarca   | Ubate                   | 38809 | 25141    | 13668 | 0,54        |
| Chocó  | Alto Baudo              | 36773 | 9563     | 27210 | 2,85        |
| Huila  | Acevedo                 | 32897 | 6341     | 26556 | 4,19        |
| Huila  | Campoalegre             | 34309 | 25993    | 8316  | 0,32        |
| Huila  | Garzón                  | 88213 | 42377    | 45836 | <b>1,08</b> |
| Huila  | Gigante                 | 33313 | 17976    | 15337 | 0,85        |
| Huila  | La Plata                | 62722 | 25936    | 36786 | 1,42        |
| Huila  | Palermo                 | 32677 | 15760    | 16917 | <b>1,07</b> |
| Huila  | San Agustín             | 32898 | 11366    | 21532 | 1,89        |
| La Guajira   | Barrancas               | 34619 | 17585    | 17034 | <b>0,97</b> |
| La Guajira   | Dibulla                 | 32983 | 5388     | 27595 | 5,12        |
| La Guajira   | Fonseca                 | 33254 | 21442    | 11812 | 0,55        |
| La Guajira   | San Juan del Cesar      | 37327 | 24445    | 12882 | 0,53        |
| Magdalena  | Aracataca               | 39473 | 27235    | 12238 | 0,45        |
| Magdalena  | Ariguaní                | 32166 | 19972    | 12194 | 0,61        |
| Magdalena  | El Banco                | 55530 | 35368    | 20162 | 0,57        |
| Magdalena  | Fundación               | 57344 | 55099    | 2245  | 0,04        |
| Magdalena  | Pivijay                 | 33924 | 19201    | 14723 | 0,77        |
| Magdalena  | Plato                   | 57848 | 44307    | 13541 | 0,31        |
| Magdalena  | Puebloviejo             | 30462 | 11763    | 18699 | 1,59        |
| Magdalena  | Sitionuevo              | 31706 | 15560    | 16146 | <b>1,04</b> |
| Magdalena  | Zona Bananera           | 60524 | 4944     | 55580 | 11,24       |
| Meta   | Acacías                 | 68888 | 58128    | 10760 | 0,19        |
| Meta   | Granada                 | 62209 | 52185    | 10024 | 0,19        |
| Meta   | La Macarena             | 32861 | 4458     | 28403 | 6,37        |

| <b>GRUPO G2 municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes</b> |                        |       |          |       |             |
|--|------------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio              | Total | Cabecera | Rural | IPU         |
| Meta   | Puerto López           | 33440 | 22152    | 11288 | 0,51        |
| Nariño   | Barbacoas              | 37851 | 16169    | 21682 | 1,34        |
| Nariño   | Cumbal                 | 37635 | 8428     | 29207 | 3,47        |
| Nariño   | El Charco              | 36856 | 10078    | 26778 | 2,66        |
| Nariño   | Olaya Herrera          | 31204 | 9768     | 21436 | 2,19        |
| Nariño   | Samaniego              | 49545 | 18852    | 30693 | 1,63        |
| Nariño   | Túquerres              | 40599 | 17503    | 23096 | 1,32        |
| Norte de Santander   | Abrego                 | 37997 | 17009    | 20988 | 1,23        |
| Norte de Santander   | Los Patios             | 76524 | 74272    | 2252  | 0,03        |
| Norte de Santander   | Ocaña                  | 98229 | 88908    | 9321  | 0,10        |
| Norte de Santander   | Pamplona               | 57393 | 54401    | 2992  | 0,05        |
| Norte de Santander   | Tibú                   | 36502 | 13566    | 22936 | 1,69        |
| Norte de Santander   | Villa del Rosario      | 88433 | 84609    | 3824  | 0,05        |
| Quindío  | Calarca                | 77598 | 59630    | 17968 | 0,30        |
| Quindío  | La Tebaida             | 42141 | 39478    | 2663  | 0,07        |
| Quindío  | Montenegro             | 41286 | 33800    | 7486  | 0,22        |
| Quindío  | Quimbaya               | 34945 | 29146    | 5799  | 0,20        |
| Risaralda  | La Virginia            | 32039 | 31505    | 534   | 0,02        |
| Risaralda  | Quinchía               | 33754 | 8195     | 25559 | 3,12        |
| Risaralda  | Santa Rosa de Cabal    | 72228 | 60191    | 12037 | 0,20        |
| Santander  | Cimitarra              | 44733 | 17903    | 26830 | 1,50        |
| Santander  | Lebríja                | 38560 | 18747    | 19813 | <b>1,06</b> |
| Santander  | Puerto Wilches         | 31511 | 16851    | 14660 | 0,87        |
| Santander  | San Gil                | 45445 | 40336    | 5109  | 0,13        |
| Santander  | San Vicente de Chucurí | 34640 | 13667    | 20973 | 1,53        |
| Santander  | Socorro                | 30577 | 25125    | 5452  | 0,22        |
| Sucre  | Corozal                | 62409 | 51157    | 11252 | 0,22        |
| Sucre  | Majagual               | 33258 | 10883    | 22375 | 2,06        |
| Sucre  | Sampués                | 37925 | 20954    | 16971 | 0,81        |
| Sucre  | San Marcos             | 57071 | 33629    | 23442 | 0,70        |
| Sucre  | San Onofre             | 50214 | 24333    | 25881 | <b>1,06</b> |
| Sucre  | San Luis de Sincé      | 33688 | 25551    | 8137  | 0,32        |
| Sucre  | Santiago de Tolú       | 33296 | 27290    | 6006  | 0,22        |
| Tolima   | Chaparral              | 47195 | 26622    | 20573 | 0,77        |
| Tolima   | Espinal                | 76227 | 58367    | 17860 | 0,31        |
| Tolima   | Fresno                 | 30284 | 14878    | 15406 | <b>1,04</b> |
| Tolima   | Guamo                  | 32373 | 16706    | 15667 | <b>0,94</b> |
| Tolima   | Líbano                 | 40456 | 25192    | 15264 | 0,61        |
| Tolima   | Mariquita              | 33309 | 24237    | 9072  | 0,37        |
| Tolima   | Melgar                 | 36047 | 29809    | 6238  | 0,21        |
| Tolima   | Ortega                 | 32524 | 8098     | 24426 | 3,02        |
| Valle del Cauca  | Candelaria             | 81697 | 22705    | 58992 | 2,60        |

| <b>GRUPO G2 municipios entre 30.000 y 100.000 habitantes</b> |                       |       |          |       |             |
|--|-----------------------|-------|----------|-------|-------------|
| Departamento   | Municipio             | Total | Cabecera | Rural | IPU         |
| Valle del Cauca  | Dagua                 | 36400 | 8113     | 28287 | 3,49        |
| Valle del Cauca  | El Cerrito            | 57463 | 35516    | 21947 | 0,62        |
| Valle del Cauca  | Florida               | 58122 | 42959    | 15163 | 0,35        |
| Valle del Cauca  | Guacarí               | 34522 | 20677    | 13845 | 0,67        |
| Valle del Cauca  | La Unión              | 37703 | 29634    | 8069  | 0,27        |
| Valle del Cauca  | Pradera               | 55137 | 48107    | 7030  | 0,15        |
| Valle del Cauca  | Roldanillo            | 32778 | 24774    | 8004  | 0,32        |
| Valle del Cauca  | Sevilla               | 45142 | 34484    | 10658 | 0,31        |
| Valle del Cauca  | Zarzal                | 45227 | 31956    | 13271 | 0,42        |
| Arauca   | Arauca                | 88481 | 76431    | 12050 | 0,16        |
| Arauca   | Arauquita             | 41309 | 18723    | 22586 | 1,21        |
| Arauca   | Saravena              | 47203 | 32035    | 15168 | 0,47        |
| Arauca   | Tame                  | 52768 | 20011    | 32757 | 1,64        |
| Casanare   | Aguazul               | 38515 | 29153    | 9362  | 0,32        |
| Putumayo   | Mocoa                 | 42074 | 34111    | 7963  | 0,23        |
| Putumayo   | Orito                 | 52580 | 23633    | 28947 | 1,22        |
| Putumayo   | Puerto Asís           | 60138 | 32692    | 27446 | 0,84        |
| Putumayo   | Valle del Guamuez     | 51842 | 20488    | 31354 | 1,53        |
| Archipiélago de San Andrés                                   | San Andrés            | 71305 | 52733    | 18572 | 0,35        |
| Amazonas   | Leticia               | 41326 | 26226    | 15100 | 0,58        |
| Guaviare   | San José del Guaviare | 64555 | 44692    | 19863 | 0,44        |
| Vaupés   | Mitú                  | 31568 | 16032    | 15536 | <b>0,97</b> |
| Vichada  | Cumaribo              | 36867 | 6840     | 30027 | 4,39        |

| <b>GRUPO G3 municipios mayores a 100.000 habitantes</b> |              |         |          |       |             |
|---|--------------|---------|----------|-------|-------------|
| Departamento  | Municipio    | Total   | Cabecera | Rural | IPU         |
| Antioquia   | Medellín     | 2464322 | 2434647  | 29675 | <b>0,01</b> |
| Antioquia   | Apartadó     | 178257  | 154284   | 23973 | <b>0,16</b> |
| Antioquia   | Bello        | 455807  | 448928   | 6879  | <b>0,02</b> |
| Antioquia   | Caucasia     | 112168  | 92180    | 19988 | <b>0,22</b> |
| Antioquia   | Envigado     | 222410  | 214692   | 7718  | <b>0,04</b> |
| Antioquia   | Itagui       | 267872  | 245081   | 22791 | <b>0,09</b> |
| Antioquia   | Rionegro     | 120249  | 78804    | 41445 | <b>0,53</b> |
| Antioquia   | Turbo        | 159268  | 63503    | 95765 | 1,51        |
| Atlántico   | Barranquilla | 1218737 | 1214513  | 4224  | <b>0,00</b> |
| Atlántico   | Malambo      | 121289  | 114306   | 6983  | <b>0,06</b> |
| Atlántico   | Soledad      | 615349  | 614759   | 590   | <b>0,00</b> |
| Bogotá, D.C.  | Bogotá, D.C. | 7878783 | 7862277  | 16506 | <b>0,00</b> |
| Bolívar   | Cartagena    | 1001680 | 959570   | 42110 | <b>0,04</b> |
| Bolívar   | Magangué     | 123737  | 85691    | 38046 | <b>0,44</b> |

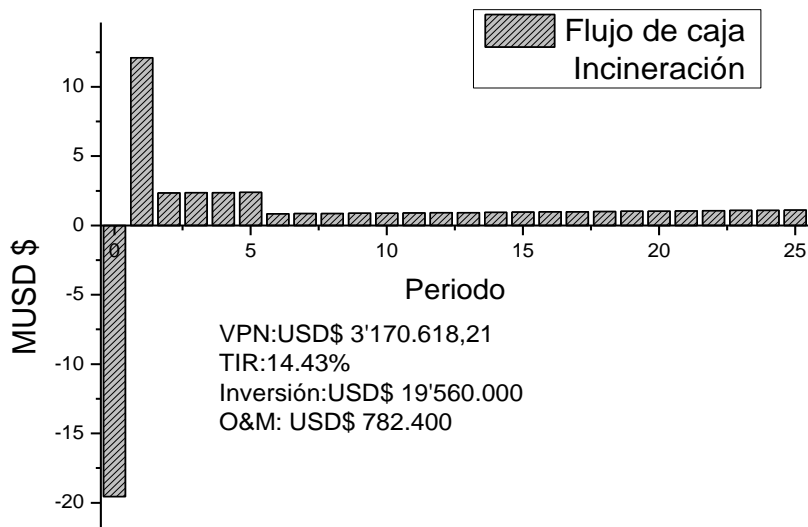
| <b>GRUPO G3 municipios mayores a 100.000 habitantes</b> |                      |               |               |              |             |
|---|----------------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| Departamento  | Municipio            | Total         | Cabecera      | Rural        | IPU         |
| Boyacá  | Tunja                | 188340        | 180554        | 7786         | <b>0,04</b> |
| Boyacá  | Duitama              | 112692        | 102519        | 10173        | <b>0,10</b> |
| Boyacá  | Sogamoso             | 113295        | 98550         | 14745        | <b>0,15</b> |
| Caldas  | Manizales            | 396102        | 368655        | 27447        | <b>0,07</b> |
| Caquetá   | Florencia            | 172341        | 150908        | 21433        | <b>0,14</b> |
| Cauca   | Popayán              | 277441        | 247417        | 30024        | <b>0,12</b> |
| Cesar   | Valledupar           | 453205        | 386684        | 66521        | <b>0,17</b> |
| Córdoba   | Montería             | 441260        | 341331        | 99929        | <b>0,29</b> |
| Córdoba   | Lorica               | 118237        | 54541         | 63696        | 1,17        |
| Cundinamarca  | Chía                 | 126647        | 99226         | 27421        | <b>0,28</b> |
| Cundinamarca  | Facatativá           | 132106        | 119294        | 12812        | <b>0,11</b> |
| Cundinamarca  | Fusagasugá           | 134523        | 108157        | 26366        | <b>0,24</b> |
| Cundinamarca  | Girardot             | 105085        | 101610        | 3475         | <b>0,03</b> |
| Cundinamarca  | Soacha               | 511262        | 505319        | 5943         | <b>0,01</b> |
| Cundinamarca  | Zipaquirá            | 122347        | 107278        | 15069        | <b>0,14</b> |
| Chocó   | Quibdó               | 115694        | 107639        | 8055         | <b>0,07</b> |
| Huila   | Neiva                | 342221        | 322536        | 19685        | <b>0,06</b> |
| Huila   | Pitalito             | 125823        | 74762         | 51061        | <b>0,68</b> |
| La Guajira  | Riohacha             | 259509        | 220610        | 38899        | <b>0,18</b> |
| La Guajira  | Maicao               | 157054        | 107554        | 49500        | <b>0,46</b> |
| La Guajira  | Manaure              | 103961        | 44868         | 59093        | 1,32        |
| La Guajira  | Uribia               | 174287        | 12477         | 161810       | 12,97       |
| Magdalena   | Santa Marta          | 483722        | 466296        | 17426        | <b>0,04</b> |
| Magdalena   | Ciénaga              | 104319        | 98694         | 5625         | <b>0,06</b> |
| Meta  | Villavicencio        | 484429        | 460704        | 23725        | <b>0,05</b> |
| <b>Nariño</b>   | <b>Pasto</b>         | <b>440040</b> | <b>365650</b> | <b>74390</b> | <b>0,20</b> |
| Nariño  | Ipiales              | 138679        | 99682         | 38997        | <b>0,39</b> |
| Nariño  | San Andres de Tumaco | 199659        | 111589        | 88070        | <b>0,79</b> |
| Norte de Santander                                      | Cúcuta               | 649983        | 628082        | 21901        | <b>0,03</b> |
| Quindío   | Armenia              | 296691        | 288686        | 8005         | <b>0,03</b> |
| Risaralda   | Pereira              | 469644        | 396187        | 73457        | <b>0,19</b> |
| Risaralda   | Dosquebradas         | 198874        | 190388        | 8486         | <b>0,04</b> |
| Santander   | Bucaramanga          | 527985        | 521520        | 6465         | <b>0,01</b> |
| Santander   | Barrancabermeja      | 191768        | 173424        | 18344        | <b>0,11</b> |
| Santander   | Floridablanca        | 265452        | 255885        | 9567         | <b>0,04</b> |
| Santander   | Girón                | 180305        | 161402        | 18903        | <b>0,12</b> |
| Santander   | Piedecuesta          | 149219        | 121987        | 27232        | <b>0,22</b> |
| Sucre   | Sincelejo            | 275218        | 257663        | 17555        | <b>0,07</b> |

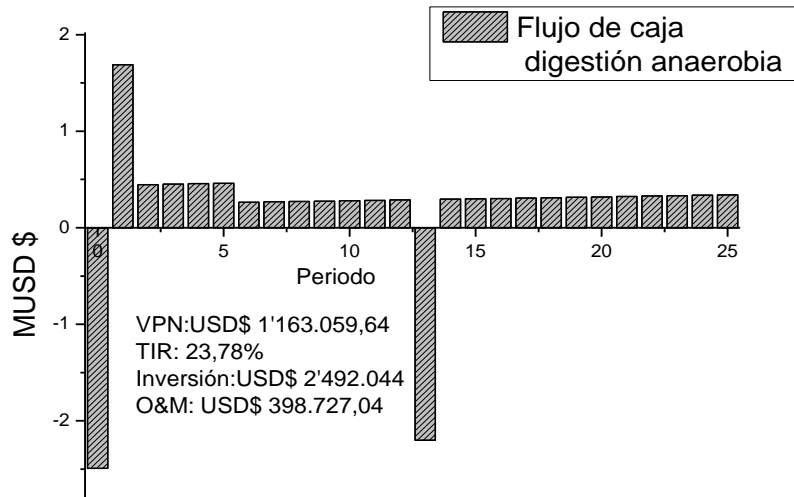
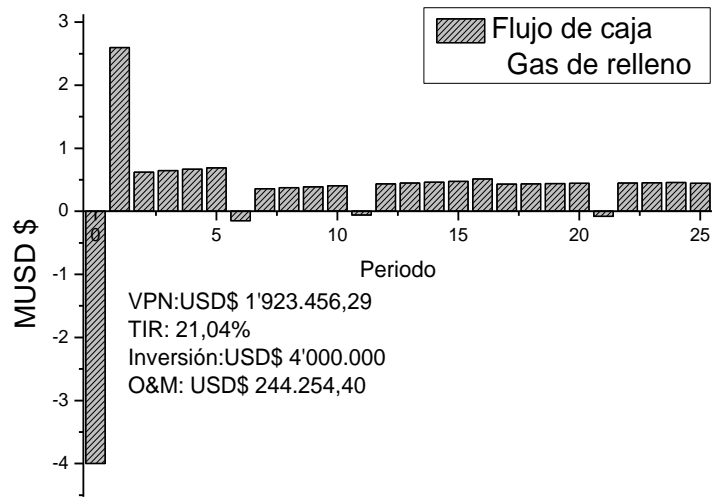


| <b>GRUPO G3 municipios mayores a 100.000 habitantes</b> |                     |         |          |       |             |
|---|---------------------|---------|----------|-------|-------------|
| Departamento  | Municipio           | Total   | Cabecera | Rural | IPU         |
| Tolima  | Ibagué              | 553526  | 523068   | 30458 | <b>0,06</b> |
| Valle del Cauca   | Cali                | 2369829 | 2333213  | 36616 | <b>0,02</b> |
| Valle del Cauca   | Buenaventura        | 399619  | 365607   | 34012 | <b>0,09</b> |
| Valle del Cauca   | Guadalajara de Buga | 115249  | 99106    | 16143 | <b>0,16</b> |
| Valle del Cauca   | Cartago             | 132251  | 130283   | 1968  | <b>0,02</b> |
| Valle del Cauca   | Jamundí             | 119532  | 81474    | 38058 | <b>0,47</b> |
| Valle del Cauca   | Palmira             | 304763  | 244406   | 60357 | <b>0,25</b> |
| Valle del Cauca   | Tuluá               | 211581  | 182674   | 28907 | <b>0,16</b> |
| Valle del Cauca   | Yumbo               | 117118  | 102836   | 14282 | <b>0,14</b> |
| Casanare  | Yopal               | 139734  | 124518   | 15216 | <b>0,12</b> |

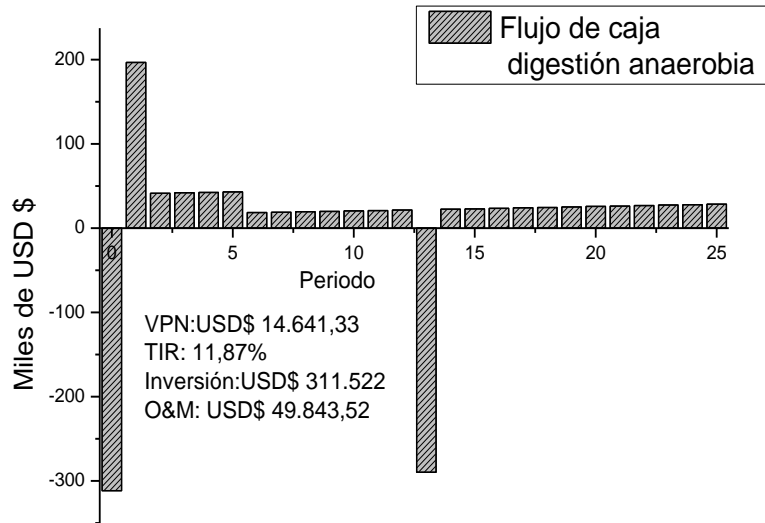
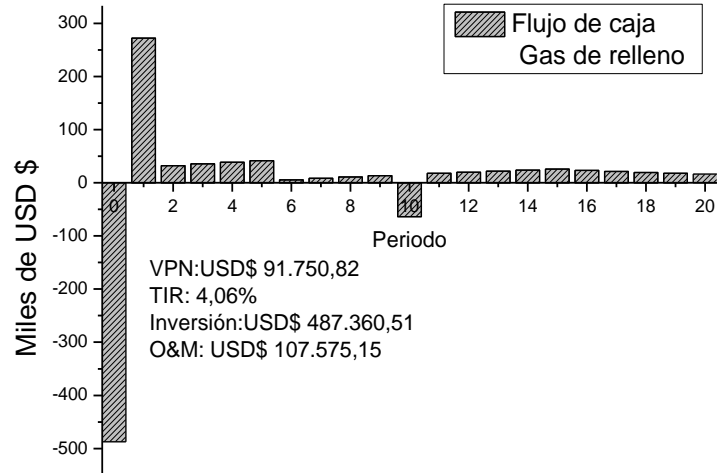
## B. Anexo: Flujos de caja de los diferentes escenarios (Caso 4)

Municipio de Pasto

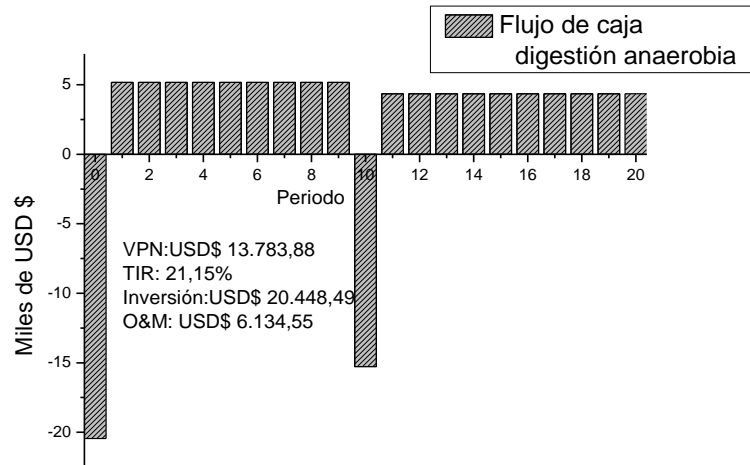




## Municipio de Andes



## Municipio de Guayatá



## C. Anexo: Modelo CAPM ajustado

Las firmas que invierten internacionalmente asumen riesgos de incertidumbre como las tasas de impuestos, regulaciones y normas legales, régimen de cambio, políticas macroeconómicas. Todo ello genera volatilidad en los negocios. Se proponen ajustar el CAPM de dos maneras (modelo de Godfrey y Espinosa): primero adicionando a la tasa libre de riesgo, el spread entre el retorno de un bono soberano del mercado emergente y el retorno de un bono comparable en los Estados Unidos. Segundo, usando un beta ajustado, definido como el 60% de la razón entre la desviación estándar de los retornos en el mercado emergente y la desviación estándar de los retornos en el mercado de los Estados Unidos. La expresión para el cálculo de la tasa de descuento incluyendo los dos parámetros mencionados se muestra a continuación:

$$Ra = Rf_{USD} + Credit\ spread_i + 60\% * \beta_{ai} * (R_m - R_f)$$

Donde:

$Ra$  = Tasa de descuento

$Rf_{USD}$  = Tasa de interés libre de riesgo en Estados Unidos

$Credit\ spread_i$  = Refleja la calidad de crédito país i. Mide la diferencia entre los bonos soberanos en moneda local y los denominados en moneda extranjera, recogiendo así la percepción del riesgo país por el mercado internacional.

$(R_m - R_f)$ : Risk Premium, tasa de retorno por encima del mercado en país desarrollado.

$\beta_{ai}$ : Beta ajustado para el país i. Definido como el 60% de la razón equivalente a volatilidad del mercado foráneo/volatilidad del mercado en los Estados Unidos.

Para evaluar este modelo se tomaron los valores mostrados en la siguiente tabla. Estos fueron utilizados por Sánchez en su estudio, para el cálculo de la tasa de descuento en economías emergentes como es el caso colombiano (Sánchez 2010).

| Parámetro                  | Valor                              |
|----------------------------|------------------------------------|
| $(R_{f_{USD}})$            | 4,97                               |
| Credit spread <sub>i</sub> | 3,126%                             |
| Beta                       | 0,58                               |
| $\beta_{ai}$               | 0,35 (Beta ajustado = Beta * 0.60) |
| $(R_m - R_f)$              | 3,92%                              |
| Tasa en USD                | 9,47 % $\approx$ 10%               |

# Bibliografía

- Abd Kadir, Sharifah Aishah Syed et al. 2013. "Incineration of Municipal Solid Waste in Malaysia: Salient Issues, Policies and Waste-to-Energy Initiatives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24: 181–86. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113002001> (September 21, 2014).
- Abu-Hijleh, B.A/K et al. 1998. "Feasibility Study of a Municipality Solid Waste Incineration Plant in Jordan." *Energy Conversion and Management* 39(11): 1155–59. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000107> (September 22, 2014).
- Acevedo, Liliana, and Carlos Peláez. 2010. "Ciudad Postmoderna Sumidero de Materia Y Energía El Agujero Negro de La Biósfera." *Eolo-Revista Ambiental (Medellín)* 15: 63–68.
- Aguilar-Virgen, Quetzalli, Paul Taboada-González, and Sara Ojeda-Benítez. 2014. "Analysis of the Feasibility of the Recovery of Landfill Gas: A Case Study of Mexico." *Journal of Cleaner Production* 79: 53–60. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614004855> (September 23, 2014).
- Alcaldía de Andes. 2016. "Sitio Web Del Municipio de Andes En Antioquia." <http://www.andes-antioquia.gov.co>.
- Alcaldía de Pasto. 2016. "Información General - Pasto - Nariño - Colombia." *Mapas*. <http://www.pasto.gov.co/index.php/nuestro-municipio>.
- Área Metropolitana, Del Valle De Aburrá. 2006. "Manual Para El Manejo Integral De Residuos En El Valle De Aburrá." : 1–47.
- Arroyave Tobón, Isabel Cristina. 2005. "Plan De Gestión De Residuos Sólidos Municipio De Andes 2006-2020." : 43–45.
- Autret, Erwan, Francine Berthier, Audrey Luszezanec, and Florence Nicolas. 2007. "Incineration of Municipal and Assimilated Wastes in France: Assessment of Latest Energy and Material Recovery Performances." *Journal of hazardous materials* 139(3): 569–74. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389406002470> (September 7, 2014).



- 
- Bajić, Bojana Ž. et al. 2015. "Waste-to-Energy Status in Serbia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50: 1437–44.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115005614>.
- Baker & McKenzie International. 2014. "Bondades de La Ley 1715 de 2014."
- Banco de la República. 2016. "Comunicado-25-11-2016 Del Banco de La República."  
<http://www.banrep.gov.co/es/comunicado-25-11-2016>.
- Bancomundial. 2016. "Promedio Detallado de Precipitaciones (Mm Anuales)."  
<http://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM?locations=CO&view=map&year=1962>.
- Bébar, Ladislav, Petr Stehlík, Leoš Havlen, and Jaroslav Oral. 2005. "Analysis of Using Gasification and Incineration for Thermal Processing of Wastes." *Applied Thermal Engineering* 25(7): 1045–55.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431104002340> (October 14, 2014).
- Beylot, Antoine, and Jacques Villeneuve. 2013. "Environmental Impacts of Residual Municipal Solid Waste Incineration: A Comparison of 110 French Incinerators Using a Life Cycle Approach." *Waste management (New York, N.Y.)* 33(12): 2781–88.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1300305X> (September 23, 2014).
- Bidart, Christian, Magnus Fröhling, and Frank Schultmann. 2013. "Municipal Solid Waste and Production of Substitute Natural Gas and Electricity as Energy Alternatives." *Applied Thermal Engineering* 51(1–2): 1110.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112006771> (September 7, 2014).
- Bove, Roberto, and Piero Lunghi. 2006. "Electric Power Generation from Landfill Gas Using Traditional and Innovative Technologies." *Energy Conversion and Management* 47(11–12): 1395.  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890405002153> (October 14, 2014).
- Cadena, Juan, Sandra Pérez, and Juan Mora. 2012. "Análisis de Viabilidad Financiera de Una Central de Generación de Energía Eléctrica a Partir Del Biogás de Vertedero." *Scientia et Technica Año XVI* 51(88): 2.
- CalRecycle. 2015. *Landfill Tipping Fees in California*. California.  
[www.calrecycle.ca.gov/Publications/](http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/).
- Castells, Xavier Elías. 2005. *Tratamiento Y Valorización Energética de Residuos*. ed. Días de Santos. España.
- Chang, Y. F. et al. 2007. "Multiple Regression Models for the Lower Heating Value of Municipal Solid Waste in Taiwan." *Journal of Environmental Management* 85(4): 891–99.
- Coimbra-Araújo, Carlos H et al. 2014. "Brazilian Case Study for Biogas Energy: Production of Electric Power, Heat and Automotive Energy in Condominiums of Agroenergy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40: 826–39.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004766>.

Comision de Regulación de Energía y Gas (CREG). 2016. “Desarrollo de La Prestación Del Servicio Domiciliario de Gas Combustible Con Biogás.” : 26. <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=51162>.

Commodity Exchange Bratislavava. 2016. “Carbon Place.” <http://www.carbonplace.eu/info-commodities-CER>.

Consonni, Stefano, and Federico Viganò. 2012. “Waste Gasification vs. Conventional Waste-To-Energy: A Comparative Evaluation of Two Commercial Technologies.” *Waste Management* 32(4): 653–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.019>.

Contraloría general de la república. 2016. “Glosario de Términos Del Mercado Financiero Para Uso de Los Operadores Jurídicos En Su Función de Búsqueda de Bienes a Nivel Nacional E Internacional.” 1.

Corredor Becerra, Oscar Fernando. 2008. “Evaluación Del Potencial Energético de La Biomasa Residual Proveniente de Cultivos Energéticos.”

DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas. 2009. ESTUDIOS POSTCENSALES No. 7 ISBN 978-958-624-078-9 BOGOTÁ - COLOMBIA - 2009 *Proyecciones Nacionales Y Departamentales de Poblacion 2005-2020*.

EBSA. 2016. “Tarifa Mes de Mayo Empresa de Energía de Boyacá.” [http://www.ebsa.com.co/ser/tar/SitePages/Tarifas mes.aspx](http://www.ebsa.com.co/ser/tar/SitePages/Tarifas%20mes.aspx).

Ellyin, Claudine, and Nickolas J Themelis. 2012. “Small Scale Waste-To-Energy Technologies.” Columbia.

Emvarias-grupo EPM. 2016. “Información Tarifaria.” <http://www.emvarias.com.co/SitePages/tarifas.aspx>.

Environment and Plastics Industry Council (EPIC). 2004. *A Review of the Options for the Thermal Treatment of Plastics*. Ontario. [http://www.plastics.ca/\\_files/file.php?fileid=0&filename=file\\_files\\_Review\\_of\\_options\\_for\\_the\\_thermal\\_treatment\\_of\\_plastics\\_full\\_paper\\_14\\_Oct.\\_04.pdf](http://www.plastics.ca/_files/file.php?fileid=0&filename=file_files_Review_of_options_for_the_thermal_treatment_of_plastics_full_paper_14_Oct._04.pdf).

Estrada Wiechers, Andres. 2015. “Pre-Feasibility Study of Using the Circulating Fluid Bed ( CFB ) Waste-to-Energy Technology in Mexico City.” Columbia University. [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Andres Estrada\\_thesis.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Andres%20Estrada_thesis.pdf).

Farming futures. 2016. “Focus on: Farm Anaerobic.” *Farming futures* 17: 2.

Fernandez de Castro del Castillo, José Antonio. 2005. “Una Nueva Concepción Del Municipio Colombiano.” Pontificia Universidad Javeriana.

GICON. 2016. “Valorización Energética de Los Residuos a Través de Tratamientos Biológicos - Tecnología de Biogás.” In *1ª Conferencia Panamericana - Waste to Energy 2016*, Medellín, 41–50.

Gómez, Antonio et al. 2010. “Potential and Cost of Electricity Generation from Human and Animal Waste in Spain.” *Renewable Energy* 35(2): 498–505.

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109003139> (September 7, 2014).
- Grupo epm. 2016. "Gestión Y Valorización de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Evaluación de Nuevas Oportunidades de Negocio." In *1ª Conferencia Panamericana - Waste to Energy 2016*, Medellín, 25.
- Guerrero, Raul delgado. 2006. "Plan de Gestion Integral de Residuos Sólidos Pgirs Municipio de Pasto." : 63–70. [http://www.cortolima.gov.co/2006/images/stories/pgirs/resumen\\_ejecutivo\\_ibague.pdf](http://www.cortolima.gov.co/2006/images/stories/pgirs/resumen_ejecutivo_ibague.pdf).
- Gutierrez, Elver. 2009. "Caracterización Del Gas de Síntesis de Una Planta Piloto a Alta Presión ."
- Hao, Xiaoli, Hongxing Yang, and Guoqiang Zhang. 2008. "Trigeneration: A New Way for Landfill Gas Utilization and Its Feasibility in Hong Kong." *Energy Policy* 36(10): 3662–73. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508002747> (September 23, 2014).
- Hitachi Zosen Inova. 2016. "Desarrollo Y Viabilidad de Una Planta WTE: Punto de Vista de Un Contratista." In *1ª Conferencia Panamericana - Waste to Energy 2016*, Medellín.
- Hossain, Zakir, Quazi Hasna H, Minhaj Uddin M, and Tofayal Ahmed. 2014. "Municipal Solid Waste (MSW) as a Source of Renewable Energy in Bangladesh: Revisited." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 35–41. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004596> (August 7, 2014).
- IDAE. 2007. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) *Biomasa: Digestores Anaerobios*. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_digestores\\_07\\_a996b846.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf).
- IPSE. 2014. "LEY 1715 DEL 13 DE MAYO DE 2014." (May): 9–10. <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/893-nueva-ley-1715-de-2014-promueve-el-aprovechamiento-de-las-fuentes-no-convencionales-de-energia>.
- Jaramillo, Jorge. 1999. "Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales - GIRSM." In *Seminario Internacional Gestión Integral de Residuos Sólidos Y Peligrosos, Siglo XXI*, 1–20.
- Jiang, Jianguo et al. 2007. "Prospects of Anaerobic Digestion Technology in China." *Tsinghua Science and Technology* 12(4): 435–40. <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6071775> (October 14, 2014).
- Kalyani, Khanjan Ajaybhai, and Krishan K. Pandey. 2014. "Waste to Energy Status in India: A Short Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 113–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>.

- Khan, MR, and Haris Tanveer. 2012. "Production of Thermoelectric Power from Solid Waste of Urban Lahore." [http://202.154.59.182/ejournal/files/PRODUCTION OF THERMOELECTRIC POWER FROM THE SOLID WASTE OF URBAN LAHORE.pdf](http://202.154.59.182/ejournal/files/PRODUCTION_OF_THERMOELECTRIC_POWER_FROM_THE_SOLID_WASTE_OF_URBAN_LAHORE.pdf).
- Kothari, Richa et al. 2014. "Different Aspects of Dry Anaerobic Digestion for Bio-Energy: An Overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39: 174–95. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>.
- Larochelle, Leo, Michael Turner, and Michael LaGiglia. 2012. *Evaluation of NAMA Opportunities in Colombia's Solid Waste Sector*. [http://ccap.org/assets/Evaluation-of-NAMA-Opportunities-in-Colombias-Solid-Waste-Sector\\_CCAP-Oct-2012.pdf](http://ccap.org/assets/Evaluation-of-NAMA-Opportunities-in-Colombias-Solid-Waste-Sector_CCAP-Oct-2012.pdf).
- Leckner, Bo. 2015. "Process Aspects in Combustion and Gasification Waste-to-Energy (WtE) Units." *Waste Management* 37: 14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.04.019>.
- Local United. 2016. *Energy Farms - Anaerobic Digestion*.
- Lombardi, Lidia, Ennio Carnevale, and Andrea Corti. 2014. "A Review of Technologies and Performances of Thermal Treatment Systems for Energy Recovery from Waste." *Waste Management* 37: 26–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>.
- Luz, Fábio Codignole et al. 2015. "Techno-Economic Analysis of Municipal Solid Waste Gasification for Electricity Generation in Brazil." *Energy Conversion and Management* 103: 321–37. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415006226>.
- Maier, Sebastian, and Luciano Basto Oliveira. 2014. "Economic Feasibility of Energy Recovery from Solid Waste in the Light of Brazil's Waste Policy: The Case of Rio de Janeiro." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35: 484–98. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002524>.
- Mambeli Barros, Regina, Geraldo Lúcio Tiago Filho, and Tiago Rodrigo da Silva. 2014. "The Electric Energy Potential of Landfill Biogas in Brazil." *Energy Policy* 65: 150–64. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513010501> (September 7, 2014).
- Mbuligwe, Stephen E, and Gabriel R Kassenga. 2004. "Feasibility and Strategies for Anaerobic Digestion of Solid Waste for Energy Production in Dar Es Salaam City, Tanzania." *Resources, Conservation and Recycling* 42(2): 183–203. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344904000679> (September 7, 2014).
- Melikoglu, Mehmet. 2013. "Vision 2023: Assessing the Feasibility of Electricity and Biogas Production from Municipal Solid Waste in Turkey." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19: 52–63. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006284> (September 7, 2014).
- Ministerio de Minas y Energía de Brasil. 2014. "Inventário Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos." : 25.

- 
- Moratorio, Diego, Ignacio Rocco, and Marcelo Castelli. 2012. "Conversión de Residuos Sólidos Urbanos En Energía Converting Municipal Solid Waste into Energy." *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica* 10: 119.
- Moriarty, Kristi. 2013. "Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St . Bernard , Louisiana." *National Renewable Energy Laboratory* (January).
- Mpio de Guayatá. 2015. *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos PGIRS Municipio de Guayatá*. Guayatá.
- Municipio de Guayatá. 2008. "Plan de Salud Territorial."
- Münster, Marie, and Henrik Lund. 2009. "Use of Waste for Heat, Electricity and transport—Challenges When Performing Energy System Analysis." *Energy* 34(5): 636–44. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208002338> (July 29, 2014).
- Murphy, J.D., and K. McCarthy. 2005. "The Optimal Production of Biogas for Use as a Transport Fuel in Ireland." *Renewable Energy* 30(14): 2113. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096014810500042X>.
- Murphy, J.D., and E. McKeogh. 2004. "Technical, Economic and Environmental Analysis of Energy Production from Municipal Solid Waste." *Renewable Energy* 29(7): 1043–57. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148103003951> (July 9, 2014).
- Mustafa, Sameer S., Sameerah S. Mustafa, and Ali H. Mutlag. 2013. "Kirkuk Municipal Waste to Electrical Energy." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 44(1): 506–13. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512004139> (September 7, 2014).
- New York City Economic Development Corporation. 2010. *Hunts Point Anaerobic Digestion Feasibility Study*. New York.
- Ofori-Boateng, Cynthia, Keat Teong Lee, and Moses Mensah. 2013. "The Prospects of Electricity Generation from Municipal Solid Waste (MSW) in Ghana: A Better Waste Management Option." *Fuel Processing Technology* 110: 94–102. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838201200447X>.
- Ordoñez Ordoñez, Maria Del Carmen. 2011. "Evaluacion De La Generacion De Biogas En Rellenos Sanitarios En Colombia En El Marco Del Protocolo De Kyoto." Universidad Tecnológica de Pereira. <http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesisdigitales/texto/363728O65.pdf>.
- Ouda, Omar K.M. et al. 2015. "Waste-to-Energy Potential in the Western Province of Saudi Arabia." *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*: 2–5. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1018363915000033>.
- Palacio Suárez, FABIAN FELIPE. 2007. 3 "Estudio de La Prefactibilidad de Generar Energía Eléctrica Utilizando Como Fuente Primaria La Cacota Del Café Que Se Produce En La Región de Cajamarca Para Satisfacer Las Necesidades de Una Finca Que Consume 1MWh Por Mes." Universidad de la Salle.

- Panesso, A F, J A Cadena, and M C Ordoñez. 2012. "Estudio Del Biogás Captado En Un Relleno Sanitario Para Su Posible Utilización Como Combustible Primario En La Generación de Energía Eléctrica." 7(88): 1170–82.
- Pirotta, F.J.C., E.C. Ferreira, and C.A. Bernardo. 2013. "Energy Recovery and Impact on Land Use of Maltese Municipal Solid Waste Incineration." *Energy* 49: 1–11. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212008298> (September 4, 2014).
- Poletto Filho, José Antonio. 2008. "Viabilidade Energética E Econômica Da Incineração De Resíduo Sólido Urbano Considerando a Segregação Para Reciclagem. Universidade Estadual Paulista." Universidad Estadual Paulista.
- Posada Hernandez, Gabriel Jaime. 2010. "Agrupación de Municipios Colombianos Según Características de Ruralidad." Universidad Nacional de Colombia.
- Ramli, Makbul a.M., and Ssennoga Twaha. 2015. "Analysis of Renewable Energy Feed-in Tariffs in Selected Regions of the Globe: Lessons for Saudi Arabia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 649–61. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115001239>.
- Rodriguez Perdigon, Luis Alejandro. 2014. "Viabilidad Técnica Para Producción de Biogás a Partir de La Fracción Orgánica de Los Residuos Sólidos Urbanos-FORSUM." Universidad EAN.
- Sabalza, Otoniel, and Oscar Villamizar. 2009. "Evaluacion Del Potencial Energetico De Los Residuos Sólidos Organicos Urbanos Provenientes De Las Plazas De Mercado Y Diseño Conceptual De Una Planta De Digestion Anaerobia Para Su Aprovechamiento Industrial En Colombia." Universidad Industrial de Santander.
- Sánchez, Jairo Humberto. 2010. "The Discount Rate in Emerging Countries-Application of the Colombian Case." *Revista EAN* (69): 120–34. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-81602010000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-81602010000200008&lng=en&nrm=iso&tlng=es).
- Sánchez Tolosa, Jorge León. 2012. "Modelación de La Incineración de Residuos Sólidos Urbanos Como Alternativa Complementaria Al Relleno Sanitario Doña Juana En Bogotá." : 14.
- Scarlat, N et al. 2015. "Evaluation of Energy Potential of Municipal Solid Waste from African Urban Areas." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50: 1271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia. 2015. *Disposición Final de Residuos Sólidos - Informe Nacional*.
- Tan, Sie Ting et al. 2015. "Energy, Economic and Environmental (3E) Analysis of Waste-to-Energy (WTE) Strategies for Municipal Solid Waste (MSW) Management in Malaysia." *Energy Conversion and Management* 102: 116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>.
- Themelis, Nickolas J et al. 2013. *Guidebook for the Application of Waste to Energy*

---

*Technologies in Latin America and the Caribbean.*

- Tsai, W T. 2007. "Bioenergy from Landfill Gas (LFG) in Taiwan." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(2): 331–44.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000250>.
- Tsai, Wen-Tien, and Kuan-Chi Kuo. 2010. "An Analysis of Power Generation from Municipal Solid Waste (MSW) Incineration Plants in Taiwan." *Energy* 35(12): 4824–30. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210004846>.
- UPME. 2016. *Plan de Expansión E Integración de Energías Renovables En El Sistema Interconectado Nacional-SIN*.
- Vicente L, Marcio Montagnana et al. 2014. "Techno-Economic Analysis and Environmental Impact Assessment of Energy Recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil." *Resources, Conservation and Recycling* 87: 11. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344914000615> (July 23, 2014).
- Walla, C., and W. Schneeberger. 2008. "The Optimal Size for Biogas Plants." *Biomass and Bioenergy* 32(6): 553.
- Z, Juan Cadena, Juan Mora F, and Sandra Pérez L. 2012. "Análisis de Viabilidad Financiera de Una Central de Generación de Energía Eléctrica a Partir Del Biogás de Vertedero." (51): 1–7.
- Zaman, Atiq Uz, and Steffen Lehmann. 2013. "The Zero Waste Index: A Performance Measurement Tool for Waste Management Systems in a 'Zero Waste City.'" *Journal of Cleaner Production* 50: 123–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041>.
- Zhao, Xin gang, Gui wu Jiang, Ang Li, and Ling Wang. 2016. "Economic Analysis of Waste-to-Energy Industry in China." *Waste Management* 48: 604–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.014>.
- Zhao, Yan et al. 2012. "Environmental Impact Assessment of the Incineration of Municipal Solid Waste with Auxiliary Coal in China." *Waste management (New York, N.Y.)* 32(10): 1989–98. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12002218> (September 7, 2014).
- Zheng, Lijun et al. 2014. "Preferential Policies Promote Municipal Solid Waste (MSW) to Energy in China: Current Status and Prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36: 135–48. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002871> (July 17, 2014).