

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“CUANTIFICACIÓN DEL PODER CALÓRICO SUPERIOR E INFERIOR DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: PAPEL, CARTÓN, MADERA, MATERIA
ORGÁNICA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. AÑO 2014-2015”**

Realizado por:

LORENA ALEJANDRA MAFLA CARVAJAL

Director del proyecto:

ING. KATTY CORAL

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Quito, 16 de Julio de 2015

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, LORENA ALEJANDRA MAFLA CARVAJAL, con cédula de identidad # 171741063-1, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



Lorena Alejandra Mafla Carvajal

C.C.: 171741063-1

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

**“CUANTIFICACIÓN DEL PODER CALÓRICO SUPERIOR E INFERIOR DE
LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS: PAPEL, CARTÓN, MADERA Y
MATERIA ORGÁNICA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO. AÑO
2014-2015”**

Realizado por:

LORENA ALEJANDRA MAFLA CARVAJAL

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

ha sido dirigido por la profesora

ING. KATTY CORAL MSc

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



Ing. Katty Coral MSc

DIRECTORA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

ING. ESTEBAN OVIEDO

ING. ANA RODRIGUEZ

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante
el tribunal examinador



Ing. Esteban Oviedo



Ing. Ana Rodriguez

Quito, 10 de julio de 2015

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres: Carlos y Jacqueline, por su amor, su esfuerzo, su guía, su apoyo, su protección y consejos, por ser la luz en mi camino, porque sin ellos no hubiera podido llegar a ser quien soy hoy y porque esta meta cumplida es gracias a ellos.

A mis abuelitos, Emilio, Luz, Jaime y Lucía, porque con su amor me enseñaron a creer que el mundo es hermoso, que la vida es un milagro y una oportunidad para ser, para estar, para amar y para compartir.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera y permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Gracias Diosito por ser siempre mi refugio, mi protector, mi guía y mi fortaleza. Gracias porque en los tiempos difíciles me has enseñado a valorar aún más tu infinito amor.

A mis padres por apoyarme en todo momento, por ser mi ejemplo a seguir, por su incansable labor como padres y amigos. Gracias por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Gracias por ser un excelente ejemplo de vida a seguir.

A mi hermano Andrés por ser parte importante de mi vida, por creer en mí, por su apoyo y confianza, por los momentos alegres, por las peleas, por las risas, por todas las historias vividas y por las mil más que nos falta vivir.

A Katty Coral, Esteban Oviedo y Anita Rodríguez por su confianza, apoyo y dedicación durante estos 5 años de carrera universitaria, especialmente durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por darme la oportunidad de crecer profesionalmente

y aprender cosas nuevas, por haber compartido conmigo sus conocimientos y sobre todo su amistad.

Por último, quiero agradecer de manera especial a mis familiares y amigos por creer en mí, por haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré. A Estefy por estar conmigo cuando más he necesitado, por todo lo que hemos compartido, por las aventuras vividas y por las que nos falta por vivir, gracias amiga. Gracias a las personas que están, a las que estuvieron y a las que sé que siempre van a estar conmigo. Gracias a todos por ser parte de mi vida.

Índice de Contenido

CAPÍTULO I.....	3
INTRODUCCIÓN	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA.....	3
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO.....	7
1.4. OBJETIVOS.....	9
1.1.1. Objetivo General	9
1.1.2. Objetivos Específicos.....	9
1.5. CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE ESTUDIO	10
CAPÍTULO II	13
MARCO TEÓRICO	13
2.2. MARCO LEGAL	18
El marco legal que se presenta a continuación está dedicado a regular la responsabilidad de gestionar los residuos sólidos urbanos que básicamente trata que los municipios tienen la responsabilidad del manejo integrados de los RSU.	18
2.2.2. Convenio de Basilea.....	19
2.2.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización	19
2.2.4. Ley Orgánica de la Salud	20
2.2.5. Ley de Gestión Ambiental.....	20
2.2.6. Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental.....	21
2.2.7. Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Título IV.....	21
2.2.8. Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente.	22
2.2.9. Ordenanza Metropolitana No. 332. Ordenanza de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito.	23
2.2.10. Acuerdo Ministerial No. 028 Que sustituye el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria por el Libro VI de la Calidad Ambiental	26
2.2.11. Resolución No. 002 - SA.- 2014.....	27
2.3. MARCO CONCEPTUAL	28
2.3.1. Residuos Sólidos Urbanos.....	28
2.3.2. Estación de transferencia.....	29
2.3.3. Valorización Energética	30
2.3.4. Poder Calórico.....	31

CAPÍTULO III	33
METODOLOGÍA	33
3.1. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE MUESTRA.....	33
3.2. METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL PODER CALÓRICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	35
3.2.1. Fase documental.....	35
La fase documental consistió en una investigación holística de estudios anteriores tanto en el Ecuador como a nivel mundial de manera que esta investigación tenga un sustento bibliográfico que le da consistencia y validez a los resultados obtenidos. Además, a lo largo de la realización de este trabajo se revisó minuciosamente el manual de la bomba calorimétrica (No. 204M) especialmente para el manejo de las variables y de los cálculos que implican determinar el PCS y PCI. De esta manera, se desarrollaron tablas para manejar de mejor manera los datos obtenidos.	35
3.2.2. Fase de Campo	35
3.2.2.1. Muestreo	36
3.2.3. Fase de laboratorio	38
CAPÍTULO IV	60
RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	60
4.1. LEVANTAMIENTO DE DATOS	60
4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	62
4.2.1. Resultados para la cuantificación de poder calórico de RSU del DMQ	64
4.2.2. Resultados de Cuantificación de Poder Calórico de RSU del DMQ	73
4.2.3. Resultados Totales de Cuantificación de Poder Calórico de RSU del DMQ.....	84
CAPÍTULO V	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
5.1. CONCLUSIONES.....	88
5.2. RECOMENDACIONES	92
CAPÍTULO VI.....	95
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Datos Temperatura	61
Tabla 2 . Formato de Porcentaje de Humedad	62
Tabla 3 . Formato de Porcentaje de Azufre	62
Tabla 4 . Formato de Poder Calórico	63
Tabla 5 . Resumen de Datos para la Cuantificación de Poder Calórico.....	63
Tabla 6 . Porcentaje de Humedad del Papel.....	64
Tabla 7 . Porcentaje de Humedad del Cartón.....	66
Tabla 8 . Porcentaje de Humedad de la Madera.....	68
Tabla 9 . Porcentaje de Humedad de la Materia Orgánica.....	70
Tabla 10 . Porcentaje Promedio de Humedad de los Residuos	72
Tabla 11 . Poder Calórico de Papel.....	73
Tabla 12 . Poder Calórico de Cartón.....	75
Tabla 13 . Poder Calórico de Madera.....	77
Tabla 14 . Poder Calórico de Materia Orgánica.....	79
Tabla 15 . Poder Calórico Promedio de los Residuos	81
Tabla 16 . Resultados de Humedad y Poder Calórico de los Residuos.....	84
Tabla 17 . Resumen de Datos Promedios para la Cuantificación de Poder Calórico.....	87

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Composición de RSU en el DMQ.....	14
Gráfico 2. Generadores de RSU en el Distrito Metropolitano de Quito	29
Gráfico 3 . Porcentaje de Humedad del Papel.....	65
Gráfico 4 . Porcentaje de Humedad del Cartón.....	67
Gráfico 5 . Porcentaje de Humedad de la Madera.....	69
Gráfico 6 . Porcentaje de Humedad de la Materia Orgánica.....	71
Gráfico 7 . Porcentaje Promedio de Humedad de los Residuos.....	72
Gráfico 8 . Poder Calórico de Papel.....	74
Gráfico 9 . Poder Calórico del Cartón.....	76
Gráfico 10 . Poder Calórico de la Madera.....	78
Gráfico 11 . Poder Calórico de la Materia Orgánica.....	80

Gráfico 12 . Comparación de Poder Calórico Promedio de los Residuos.....	82
Gráfico 13 . Comparación de Poder Calórico Inferior Promedio de los Residuos con respecto al requerido para Incineración.....	83

Índice de Imágenes

Imagen 1. Estación de Transferencia Sur (ET1)	11
Imagen 2. Estación de Transferencia Norte (ET2).....	11
Imagen 3. Relleno Sanitario “El Inga”	12
Imagen 4. Metodología de muestreo	36
Imagen 5. Muestras trituradas	39
Imagen 6. Muestras comprimidas	44
Imagen 7 . Bomba Calorimétrica	48
Imagen 8. Soluciones de Anaranjado de Metilo, BaCl ₂ y Na ₂ CO ₃	50
Imagen 9. Precipitado (Sulfato de Bario).....	51
Imagen 10. Secado de Crisoles + Papel filtro	52

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Determinación del tamaño de la muestra	33
Ecuación 2. Porcentaje de Humedad.....	40
Ecuación 4. Cálculo de la Constante del Equipo.	40
Ecuación 3. Porcentaje de Azufre	53
Ecuación 5. Cálculo del Aumento de Temperatura.....	53
Ecuación 6. Cálculo del calor bruto de combustión.....	56
Ecuación 7. Cálculo de poder calórico inferior.....	57
Ecuación 8. Media Aritmética.....	57
Ecuación 9. Desviación Estándar	58
Ecuación 10. Error Relativo Porcentual	58

Índice de Anexos

Anexo A. Registro de temperatura, determinación de humedad.....	100
y poder calórico del residuo papel	
Anexo B. Registro de temperatura, determinación de humedad.....	101
y poder calórico del residuo cartón	
Anexo C. Registro de temperatura, determinación de humedad.....	102
y poder calórico del residuo madera	
Anexo D. Registro de temperatura, determinación de humedad.....	103
y poder calórico del residuo materia orgánica	
Anexo E. Registro Fotográfico.....	104

RESUMEN

El manejo de los residuos sólidos urbanos dentro del Distrito Metropolitano de Quito se ha basado únicamente en su disposición en el Relleno Sanitario “El Inga”, mas no en su aprovechamiento energético. Este hecho, junto al creciente consumismo de la población, ha incrementado la producción de desechos que dificultan su manejo, generando pérdidas ambientales y económicas para el Distrito. El presente proyecto tuvo como objetivo la cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito, mediante la validación de la metodología de análisis realizada en laboratorio, en el que por medio del uso de una bomba calorimétrica se calcula el calor liberado por una muestra específica. La determinación del poder calórico permite valorar energéticamente a los residuos, estableciendo así la posibilidad de utilizarlos como combustible o en la obtención de energía térmica y/o eléctrica. Durante la investigación, se analizaron cuatro categorías: papel, cartón, madera, materia orgánica. Se determinó que todos los residuos tienen un poder calórico óptimo, de manera que los datos obtenidos abren paso a la posibilidad de incorporar un tratamiento térmico al sistema de manejo de los residuos urbanos generados dentro del Distrito, sin embargo, la cantidad de agua que contiene la materia orgánica hace necesario un análisis más profundo.

Palabras Clave: Residuos sólidos; Valorización energética; Bomba calorimétrica; Poder calórico

ABSTRACT

The management of solid waste within the Metropolitan District of Quito has been focused primarily on its disposal in the sanitary landfill “El Inga”, but not in its energy recovery. This fact and the growing consumerism of the population have increased the production of waste that hinders its management, which generates environmental and economic losses for the District. The following project aims to quantify Higher Heating Value (HHV) and Lower Heating Value (LHV) of Municipal Solid Waste (MSW) released at the Metropolitan District of Quito by validating a laboratory-tested methodology of analysis. Heating Value of several samples was calculated with the help of a calorimeter bomb. The determination of Heating Value allows valuing the waste energetically, thus establishing the possibility of using it as fuel or for obtaining thermal energy and / or electricity. During the investigation, four categories were analyzed: paper, cardboard, wood, organic matter. It was determined that all of these have an optimal heating value, so that the data give way to the possibility of incorporating a thermal treatment into the management system of urban waste generated inside the District, however the amount of water that matter organic contains makes necessary a deeper analysis.

Key Words: Solid Waste; Energy recovery; Calorimeter bomb; Heating Value

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA

Una de las más grandes problemáticas que el mundo vive actualmente, es la imparable generación de residuos sólidos urbanos (RSU) como resultado del descontrolado crecimiento poblacional y el estilo de vida consumista que practica la población. Las consecuencias se magnifican debido a la masiva generación de residuos, además de requerir de grandes espacios para su deposición. Su manejo es inapropiado y causa afecciones a nivel ambiental, social y económico. En el caso del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), el manejo de los RSU se basa únicamente en su deposición en el Relleno Sanitario “El Inga”. Es por ello que en busca de una solución, se pretende aprovechar los residuos sólidos urbanos como combustible en el proceso de incineración con valorización energética. Este aprovechamiento de los RSU, además de ser una fuente energética alternativa, ayudará a reducir significativamente el volumen de desechos que son dispuestos en el relleno sanitario de Quito.

Para aprovechar energéticamente los RSU, se necesita cuantificar su Poder Calórico Superior (PCS) y su Poder Calórico Inferior (PCI), ya que forman parte de los parámetros básicos a tomar en cuenta en un proceso de valoración energética. De esta manera, se establece qué tan óptimos son los distintos tipos de RSU para utilizarlos como combustible o en la obtención de energía térmica y/o eléctrica.

Para este proyecto de fin de carrera, la cuantificación del Poder Calórico Superior (PCS) e Inferior (PCI) se realizó en cuatro tipos de residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera,

materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ); se decidió utilizar el método experimental, el cual permitió obtener datos más precisos y cercanos a la realidad de lo que se tendría al escoger un método de cálculo teórico. Se recolectaron muestras de: papel, cartón, madera, materia orgánica en las dos estaciones de transferencia con las que cuenta el Distrito Metropolitano de Quito, la Estación de Transferencia Sur (ET1) y la Estación de Transferencia Norte (ET2). Estas muestras fueron tratadas y analizadas en el laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de la Universidad Internacional SEK, en el que se utilizó como equipo principal una Bomba Calorimétrica.

La cuantificación del PCS y PCI de los residuos sólidos urbanos anteriormente mencionados, continuó con la metodología utilizada por Inés Ayala en el 2013 y Joe Ribadeneira en el 2014 para aseverar la fiabilidad del estudio. Dentro de este estudio, el Poder Calorífico tuvo cuantificaciones caloríficas diferentes entre cada tipo de residuo, por lo que la medición de las muestras se realizó de manera continua desde marzo hasta junio del año 2015, generando datos confiables. Se utilizó la metodología del Dr. Kunitoshi Sakurai para los muestreos realizados en la Estación de Transferencia Sur (ET1) y en la Estación de Transferencia Norte (ET2) del DMQ. Al igual que los estudios anteriores, este proyecto se puso a disposición de la empresa pública EMGIRS EP.

1.2. ANTECEDENTES

El manejo de los residuos sólidos urbanos ha representado un reto para la humanidad desde los primeros asentamientos humanos con el comienzo de la vida sedentaria. Con variantes en su magnitud y tipo, las necesidades de alimentación, vestimenta, protección y entretenimiento

de egipcios, griegos, aztecas, incas o chinos han estado asociadas con la generación de residuos, lo mismo que ocurre en el presente (Semmartín et al, 2010).

Probablemente, el primer método utilizado para tratar los residuos sólidos consistió en arrojarlos al suelo o al mar, seguramente porque resultaba ser una alternativa fácil y cómoda. Sin embargo, al ir creciendo la población y distribuyéndose en grupos más numerosos, la práctica de arrojar indiscriminadamente los residuos al suelo fue haciéndose cada vez más incómoda y nociva para el ambiente, llegando hasta el punto de tener ciudades que resultaban insatisfactorias para la población. Al ver que esta situación no tenía más cabida, los molestos basureros se sacaron de las ciudades y se reubicaron en terrenos más aislados (MOPT, 1992). Poco a poco se fueron acondicionando lugares para la deposición de los residuos sólidos urbanos, siendo actualmente los más comunes y utilizados, los rellenos sanitarios.

En el mundo, los países escandinavos son los que más aprovechan los RSU. Suecia es el líder mundial en generación de energía a partir de basura mediante el proceso de incineración. Suecia utiliza los residuos para generar energía, sin embargo en ocasiones se queda sin esa materia prima e importa más basura (Sanz, 2012). Esto le permite cubrir gran parte de la demanda interna de energía de su territorio.

Por otro lado, en Sudamérica se han empezado a realizar estudios de aprovechamiento energético, pero aún no son utilizados a gran escala. En el caso de Ecuador, por la escasez de estudios en cuanto al aprovechamiento energético de los RSU, no se han podido desarrollar nuevas tecnologías para la explotación del potencial energético de los residuos.

En el Ecuador, a lo largo de la historia, el manejo de los residuos sólidos urbanos no ha sido tratado técnicamente. Antes del año 2000, a pesar de que mejoró la recolección, había un

gran atraso en su disposición final, debido a que existían problemas en el barrido, la recolección, el transporte, y por ende la disposición final sin la existencia de un aprovechamiento de los residuos. Para Agosto del año 2000, Quito era una de las dos capitales de América, junto con Asunción, que no contaban con un relleno sanitario. Sao Paulo, Brasilia, Buenos Aires, Bogotá, Santiago, San José, San Juan y La Paz a esa fecha, y desde mucho antes, mantenían buenos sistemas de rellenos sanitarios controlados; menos tecnificadas: Lima, Montevideo y Caracas (Vida para Quito, 2008).

El Relleno Sanitario de Quito opera desde enero del 2003, primero a cargo de la Fundación "Vida para Quito" y a partir del 2010, a cargo de la empresa pública EMGIRS EP que fue creada por el Municipio de Quito, con la finalidad de que asuma la operación del Relleno Sanitario y las Estaciones de Transferencia. Este relleno sanitario cuenta con un área de 200 000 m² y 20 piscinas para el depósito de lixiviados, llegan aproximadamente 2000 toneladas de desechos que generan 300 m³ de lixiviados diariamente. El Relleno Sanitario funciona como respuesta técnica al problema de la disposición final de desechos sólidos urbanos (no peligrosos), cuyo manejo técnico logra minimizar o eliminar un alto porcentaje de las afectaciones negativas al ambiente, a la salud y a la calidad de vida de las personas (EMGIRS EP, s.f.).

La Empresa Pública Metropolitana de Aseo de Quito, EMASEO EP, es actualmente la instancia municipal encargada del barrido y recolección de residuos sólidos domiciliarios e industriales no peligrosos, barrido del espacio público, baldeo de plazas emblemáticas y el transporte de residuos del Norte, Centro, Sur y Parroquias no descentralizadas de Quito. La recolección domiciliaria se realiza a través de la modalidad "a pie de vereda" en la mayor parte de la ciudad y por contenerización en las que algunas zonas del Norte y del Sur de la ciudad. El servicio de recolección trabaja con horarios diurnos y nocturnos en un servicio inter-diario

(EMASEO EP, 2014). Datos establecidos por EMGIRS EP indican que los residuos sólidos que se producen diariamente en el DMQ alcanzan las 2000 toneladas (EMGIRS EP, 2014).

La Universidad Internacional SEK y la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales en convenio con la EMGIRS EP– Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos, acuerdan llevar a cabo proyectos de fin de carrera que permitan generar datos científicos confiables sobre los RSU del DMQ. El presente trabajo de fin de carrera “Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2014-2015” se fundamenta principalmente en los estudios de María José Castillo llevado a cabo en el año 2012 y el realizado por Inés Ayala en el año 2013, cuyo mismo tema fue desarrollado posteriormente por Joe Ribadeneira en el año 2014 para completar el muestreo respectivo de Ayala, con la finalidad de buscar generar información que permita aprovechar energéticamente los residuos sólidos urbanos del DMQ.

1.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

El manejo de residuos urbanos es una de las actividades que requieren mayor atención dentro de la gestión urbana. La implementación de nuevas metodologías de gestión surgió como una alternativa de solución para esta problemática, de manera que se logre reducir el volumen de los desechos y los impactos que estos generan. Para alcanzar este propósito es necesario que se desarrolle e implemente un sistema integrado de gestión de residuos que supla las necesidades ambientales, sociales (de la salud y el confort de la población), estético y económico.

El espacio urbano disponible limita la creación de más rellenos sanitarios, obligando a considerar nuevas alternativas de manejo de los desechos. Si bien, en algunos casos la deposición

en un relleno es una alternativa válida, existen otro tipo de residuos cuyas características permiten la aplicación de otros tratamientos o que pueden ser aprovechados en la elaboración de nuevos productos o generación de energía.

Según Grau y Farré, (2011), para la gestión de los residuos, se introduce una jerarquía donde se establece una prioridad a la hora de gestionarlos con el orden de: prevención, reutilización, reciclado, valorización material y energética, y por último, la eliminación de los mismos. Dentro de la valoración energética, uno de los métodos más utilizados a nivel internacional es la incineración, la cual según Romero (2010) constituye uno de los procesos térmicos más eficientes en cuanto al tratamiento de residuos urbanos, contribuyendo a disminuir el volumen y aprovechar la energía que los desechos contienen.

De esta forma, si se logra el aprovechamiento energético de los distintos tipos de residuos sólidos urbanos, estos dejarán de ser dispuestos en los Rellenos Sanitarios y se obtendría un rédito energético actualmente no aprovechado.

En el Distrito Metropolitano de Quito se desperdicia el potencial energético de los residuos sólidos urbanos debido a la falta de estudios experimentales y analíticos que permitan realizar tratamientos óptimos de los desechos y gestionar integralmente los residuos urbanos. Para ello, se intentó consolidar una consistente base informativa que, se espera, contribuya a la realización de un tratamiento óptimo a los residuos tanto para la producción de energía como para la reducción significativa de desechos destinados a ser depositados en el relleno sanitario del DMQ.

La incorporación de una nueva tecnología resulta no solamente un adelanto en cuanto al manejo de los desechos, sino que podría ser considerada como una inversión, ya que se aprovecharían recursos que actualmente están siendo desperdiciados (Ayala, 2013). La incineración como parte del tratamiento de los RSU, representa la reducción significativa de la

cantidad de residuos que se depositan en el relleno sanitario, por esta razón es considerado importante el estudio de la viabilidad de este tratamiento térmico dentro del DMQ.

La mayoría de los sistemas de tratamiento, en especial los que hacen referencia a la incineración y al compostaje, se diseñan a partir de una composición del tipo de residuos (García & Toro, 2000), así, para aplicar estas nuevas tecnologías, se requiere conocer el PCS (Poder calórico superior) y el PCI (Poder calórico inferior) de los residuos. Sin embargo, al ser el aprovechamiento energético un tema poco estudiado en el DMQ y al no existir al momento una metodología determinada para su cuantificación, se aplicó la metodología aplicada en estudios previos, con la finalidad de contribuir a validar los datos obtenidos anteriormente y aumentar la base de los datos estadísticos y técnicos que sirvan de sustento de futuros estudios. Para ello se tomaron en cuenta las recomendaciones mencionadas por los proyectos de investigación anteriores con el propósito de mejorar el desarrollo del estudio.

1.4. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo General

Cuantificar el poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Identificar los tipos de residuos considerados como materia prima óptima para procesos de aprovechamiento energético.
- Determinar la humedad de los residuos sólidos urbanos (papel, cartón, madera, materia orgánica) para tomar en cuenta para procesos de aprovechamiento energético.

- Determinar si los residuos sólidos urbanos (papel, cartón, madera, materia orgánica) presentan el poder calórico suficiente para funcionar como combustible en el proceso de incineración.

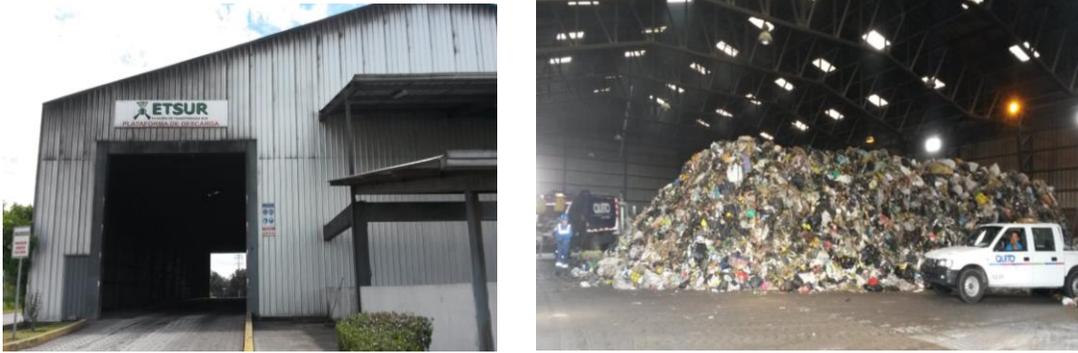
1.5. CARACTERÍSTICAS DEL LUGAR DE ESTUDIO

El presente proyecto se llevó a cabo en el Distrito Metropolitano de Quito que cuenta con dos estaciones de transferencia, una en el norte en el sector de Zámbriza y otra en Santa Rosa en el sur y cuya recolección final de residuos depara en el relleno sanitario “El Inga”.

En una Estación de Transferencia se reciben los residuos sólidos asimilables a domésticos no peligrosos recogidos en camiones recolectores de la Empresa Municipal de Aseo de la Ciudad y vehículos particulares autorizados por la Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito a lo largo de las diferentes zonas de la ciudad. Ahí se pueden realizar labores de separación de reutilizables para posteriormente compactar los desechos resultantes en vehículos de mayor tamaño, que realizan el traslado a su disposición final (Relleno Sanitario) (EMGIRS, s.f.).

La Estación de Transferencia Sur (ET1) está ubicada en Santa Rosa en la Av. Simón Bolívar al sur del intercambiador hacia Guajaló, Barrio San Blas II. La ET1 es una estación de descarga y almacenamiento de alta capacidad que cuenta con una superficie de 1800 m², en la que se receptan los residuos recolectados en la zona sur y parte del centro del DMQ. Los residuos son pesados y compactados para ser transportados al relleno sanitario, sin embargo actualmente no se realiza separación de material reutilizable.

Imagen 1. Estación de Transferencia Sur (ET1)



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

La Estación de Transferencia Norte (ET2), ubicada en Zábiza, es una estación de descarga y almacenamiento de alta capacidad en la que se reciben los residuos generados en la zona centro-norte del Distrito Metropolitano de Quito. La Estación se mantiene operativa las 24 horas, de lunes a sábado, y los domingos permanece cerrada de 14:00 a 22:00 horas. A diferencia de la ET1, la separación de residuos es realizada de forma manual por la Asociación “Vida Nueva”, la cual está integrada por 225 recicladores divididos en dos turnos; en el día 150 y 75 en la noche. Los recicladores se encargan de recolectar botellas de plástico y PET, aluminio, cartón, papel y vidrio (EMGIRS, s.f.).

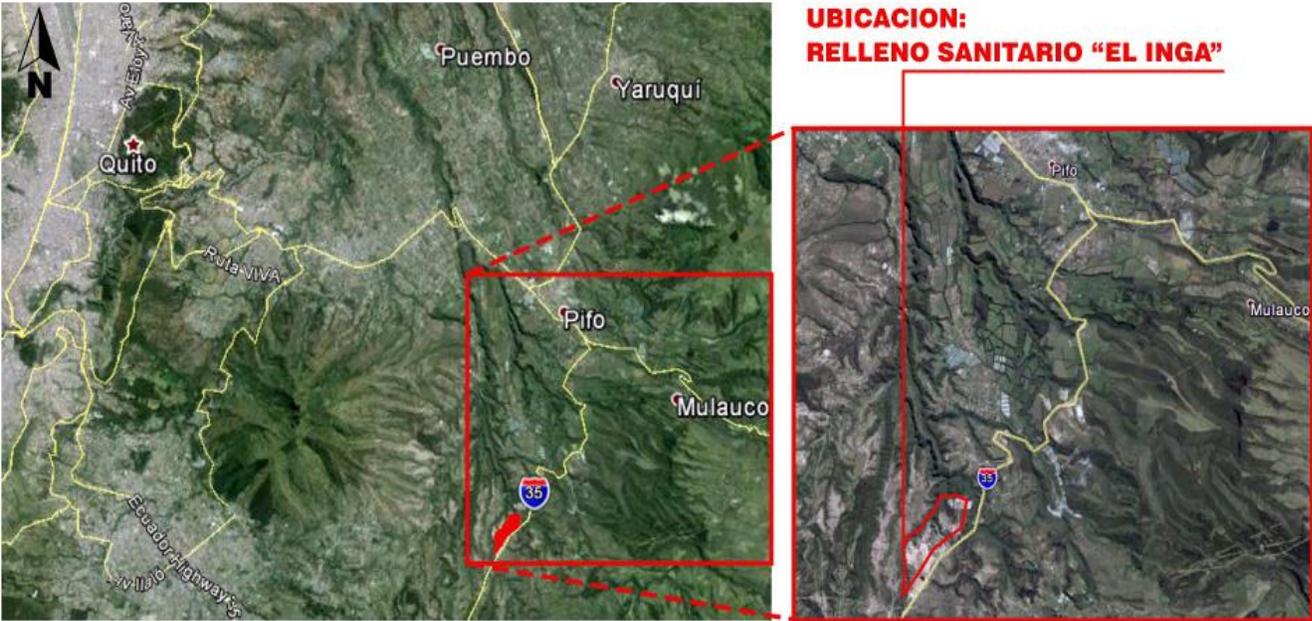
Imagen 2. Estación de Transferencia Norte (ET2)



Fuente: EMGIRS EP, 2014.

Luego de ser recolectados y compactados los residuos sólidos urbanos, son transportados y transferidos al relleno sanitario El Inga. El relleno sanitario del Distrito Metropolitano de Quito se encuentra ubicado a 45 km de la ciudad de Quito, dentro de una zona industrial de alto impacto, en el sector de El Inga Bajo, entre Pifo y Sangolquí, sobre la vía E35. La administración de este se encuentra a cargo del EMGIRS EP, la que se encarga del tratamiento y la disposición final de desechos sólidos urbanos. Además de recibir los desechos de las Estaciones de Transferencia Norte y Sur de Quito, se tienen descargas por parte del Municipio de Rumiñahui y por gestores privados autorizados (EMGIRS EP, s.f.).

Imagen 3. Relleno Sanitario “El Inga”



Fuente: Google Earth, 2012

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ESTUDIOS PREVIOS

El presente proyecto de fin de carrera “Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2014-2015”, se fundamenta en estudios previos los cuales han servido de base para su óptimo desarrollo.

Las investigaciones de mayor relevancia se nombran a continuación:

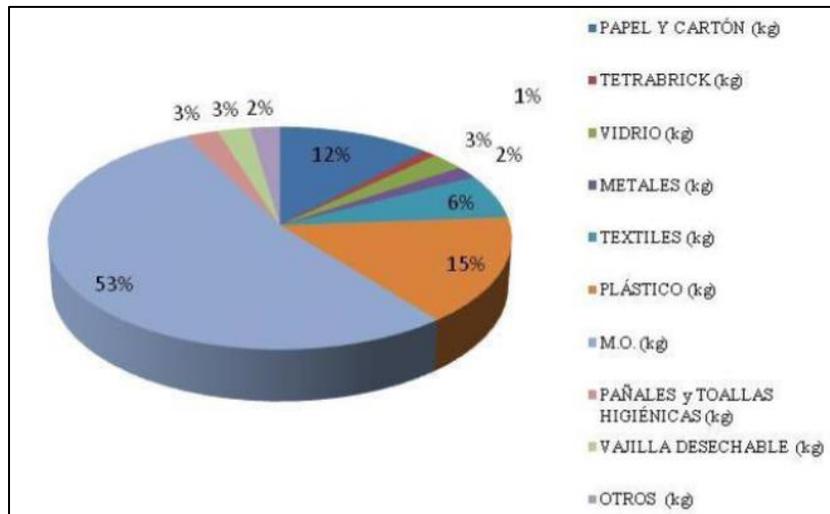
Dueñas, (2012) llevó a cabo el proyecto de fin de carrera “Cuantificación del porcentaje de humedad y porcentaje de cenizas contenido en los residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito” a cargo de la Universidad Internacional SEK. Esta investigación aportó al presente estudio con información experimental y metodológica en cuanto a la determinación del porcentaje de humedad como uno de los parámetros fisicoquímicos de los Residuos Sólidos Urbanos. Por lo tanto, para este estudio se ha adoptado la técnica utilizada para la determinación de humedad descrita por Dueñas (2012), en la que los residuos al colocarse en la estufa son sometidos a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, con el fin de eliminar completamente el agua contenida en los residuos.

Si bien la determinación del porcentaje de humedad no forma parte del proceso de cuantificación del poder calórico, este resulta importante al momento de determinar la eficiencia de los distintos residuos como combustibles en la incineración. El porcentaje de humedad afecta

directamente el desarrollo de este tratamiento, ya que mientras mayor agua contenga el residuo menor va a ser su poder calórico.

Castillo, (2012) en su proyecto de fin de carrera “Determinación de la Composición y Densidad de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Metropolitano de Quito con fines de aprovechamiento energético y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero” a cargo de la Universidad Internacional SEK, contribuye con información importante al momento de analizar la posibilidad de incorporar nuevos tratamientos al sistema de manejo de residuos actual. De forma que al analizar la caracterización de los desechos dentro del DMQ se podría estimar que existe una gran posibilidad de que estos sean aptos para el tratamiento mediante un proceso de incineración con aprovechamiento de energía.

Gráfico 1. Composición de RSU en el DMQ



Fuente: Castillo, 2012

En base a la caracterización de los residuos del DMQ llevadas a cabo por Castillo (2012), a estudios de poder calórico llevado a cabo en otros países y a la continuidad requerida en este

proyecto, se establecieron las categorías de interés específicas para la presente investigación debido a su alto contenido en carbono que al combustionarse presenta un poder calórico elevado. Se determinó que las categorías a analizar serían materia orgánica, madera, papel y cartón, de las cuales las dos últimas han sido identificadas por varios autores como materia prima óptima para el proceso de incineración.

Calvachi & Navarro, (2013). “Evaluación Ambiental de la Incineración de los Residuos Sólidos Biodegradables de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Metropolitano de Quito”, a cargo de la Universidad Politécnica Nacional del Ecuador. Este proyecto de titulación consistió en la investigación bibliográfica sobre la gestión de los residuos sólidos orgánicos biodegradables mediante incineración y una investigación experimental en el laboratorio para la determinación de los parámetros del proyecto, los que resultaron ser favorables.

De esta manera, este estudio contribuyó a la realización del presente proyecto de fin de carrera en cuanto a la metodología utilizada y al análisis de las muestras, ya que permitió realizar una correlación en los datos que a posterior permitieron llegar a conclusiones más concisas y fundamentadas.

En la Universidad Internacional SEK se han llevado a cabo dos estudios previos de Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos en los cuales la presente investigación se ha basado teórica y experimentalmente. El primer trabajo es el de Inés Ayala (2013) que formula la metodología para la determinación del Poder Calórico Superior (PCS) e Inferior (PCI), la cual se aplicó en proyecto de fin de carrera de Joe Ribadeneira (2014), la misma que se aplicó en el presente estudio, con la finalidad de validar la metodología, fortalecer esta investigación de varios años y proporcionar una base de datos para uso en estudios futuros.

Ayala (2013), analizó cuatro tipos de residuos: papel, cartón, madera, materia orgánica, desarrolló una metodología de análisis realizada en laboratorio, en la que por medio del uso de una bomba calorimétrica se calcula el calor liberado por una muestra específica, determinó que para el proceso de combustión de las muestras se debe llenar la bomba calorimétrica con oxígeno hasta 25 atmósferas de presión, en el caso de la categoría de papel y cartón, y hasta 30 atmósferas en el caso de la materia orgánica y madera. Estas concentraciones se mantuvieron en ese estudio puesto que ayudaban a que se dé una combustión completa.

De igual manera, se tomaron en cuenta las conclusiones y recomendaciones dadas por Ayala (2013) para poder mejorar el presente estudio. Es así que, una de sus conclusiones determina que la metodología desarrollada en base a análisis de laboratorio y fundamentos bibliográficos es factible de ser considerada en futuros estudios como un procedimiento apto para la cuantificación del poder calórico de los RSU del DMQ, específicamente para las categorías de madera, materia orgánica y papel y cartón, ya que la similitud encontrada entre los resultados teóricos y prácticos indicó la efectividad y validez de dicha metodología.

Dentro de las recomendaciones acogidas, se encuentra la adopción del correcto protocolo de manejo de las muestras en todo momento con el fin de minimizar la posibilidad de alterar los resultados debido a errores humanos, ya sea en el trabajo de campo como de laboratorio, así como las medidas de seguridad personal que deben ser consideradas. Además, a lo largo del desarrollo del estudio, se han realizado procedimientos periódicos con muestras estándar de ácido benzoico, con la finalidad de corroborar la eficiencia de la metodología desarrollada, así como el correcto funcionamiento del equipo utilizado. Finalmente, se han analizado las muestras lo antes posible para evitar variaciones en las características iniciales de los residuos.

Ribadeneira (2014), analizó cinco tipos de residuos: papel, cartón, madera, materia orgánica y textil, y un residuo total que constituyó la mezcla de los residuos anteriores.

Este estudio ha ayudado a validar la metodología utilizada por Ayala (2013), lo que ha dado confianza para que se siga utilizando la misma en el presente y futuros estudios. Así mismo, acogiéndose a las recomendaciones dadas por Ribadeneira (2013), se ha incorporado un cronograma adecuado del uso de los laboratorios para que no se crucen con alumnos que estén ocupando los mismos equipos, lo que se ha llevado de manera adecuada para la presente investigación, facilitando el trabajo de todos los usuarios. Además, se han seguido recomendaciones de un adecuado uso de los equipos utilizados en laboratorio, especialmente de la bomba calorimétrica y de la bomba de oxígeno, que requieren de mayor cuidado.

Los países latinoamericanos empiezan a pisar este campo de investigación con la finalidad de aprovechar energéticamente los residuos. Países como México, Chile, Brasil y Argentina están tomando la iniciativa en cuanto a una mejor gestión de los residuos, por lo que han optado por realizar una serie de estudios y han empezado de a poco con el planteamiento de ciertos proyectos con fines de aprovechamiento energético. Sin embargo, quienes están a la vanguardia en cuanto al aprovechamiento de residuos son los países nórdicos, cuya gente tiene una cultura en cuanto al reciclaje y aprovechamiento de residuos.

Por dar un ejemplo, Suecia, es uno de los países que se encuentran muy avanzados en cuanto a proyectos de aprovechamiento energético, lo que les ha permitido reducir casi en su totalidad la disposición final de los residuos que generan, de forma que los basureros públicos sólo reciben el 4% de sus desechos. En Suecia, el 96% de los desperdicios se recicla o se deriva a las plantas de incineración, 250 mil hogares se abastecen de electricidad generada por los desechos y el 20% de los hogares gozan de calefacción proveniente del tratamiento de basura (Diario Ecología, s.f.).

De forma que el análisis de sus estudios en cuanto a aprovechamiento energético de los residuos contribuyen a este trabajo para proporcionar una base de datos e información con

enfoque a la aplicación de proyectos de aprovechamiento energético en Quito y en todo el Ecuador.

2.2. MARCO LEGAL

El marco legal que se presenta a continuación está dedicado a regular la responsabilidad de gestionar los residuos sólidos urbanos que básicamente trata que los municipios tienen la responsabilidad del manejo integrados de los RSU.

2.2.1. La Constitución de la República del Ecuador

Registro Oficial N° 1 del 11 de Agosto de 1998

En este apartado se destaca las principales normativas que constituyen el marco jurídico de este proyecto de fin de carrera “Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito. Año 2014-2015”.

El artículo 15 de la Constitución de la República señala que el Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto.

El artículo 264, numeral cuarto de la Constitución de la República establece que los gobiernos municipales tienen, entre otras competencias exclusivas, el prestar el servicio público de manejo de desechos sólidos y actividades de saneamiento ambiental.

Que, el artículo 415 de la Constitución de la República establece que los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de reducción, reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos.

2.2.2. Convenio de Basilea

Ratificado: 7 de junio de 2004

En el artículo 4, numeral 2, literal (a) se señala que cada Estado debe tomar medidas para reducir al mínimo la generación de desechos, teniendo en cuenta aspectos sociales, tecnológicos y económicos.

En el artículo 7, literal (d) se señala que los Estados deberán cooperar con sus políticas nacionales, a la transferencia de tecnología y los sistemas de administración relacionados con el manejo ambientalmente racional de los desechos.

2.2.3. Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización

Registro Oficial N° 303 del 19 de Octubre del 2010

En el artículo 55 se establece que la prestación los servicios públicos, entre ellos la depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, actividades de saneamiento ambiental, es competencia exclusiva del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal.

En su artículo 136 establece el ejercicio de la tutela estatal sobre el ambiente y la corresponsabilidad de la ciudadanía en su preservación, a través del sistema nacional descentralizado de gestión ambiental que tendrá a su cargo la defensoría del ambiente y la naturaleza a través de la gestión concurrente y subsidiaria de las competencias de este sector, con sujeción a las políticas, regulaciones técnicas y control de la autoridad ambiental nacional.

En el artículo 137 se establece que son competencias de los gobiernos autónomos descentralizados municipales la prestación de servicios públicos de alcantarillado, depuración de aguas residuales, manejo de desechos sólidos, y actividades de saneamiento ambiental, en todas sus fases.

En el artículo 418, en el literal (e) indica que se constituyen bienes afectados al servicio público, los activos destinados a servicios públicos como el de recolección, procesamiento y disposición final de desechos sólidos.

2.2.4. Ley Orgánica de la Salud

Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006.

El artículo 100 establece que la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de desechos es responsabilidad de los municipios que la realizarán de acuerdo con las leyes, reglamentos y ordenanzas que se dicten para el efecto, con observancia de las normas de bioseguridad y control determinadas por la autoridad sanitaria nacional. El Estado entregará los recursos necesarios para el cumplimiento de lo dispuesto en este artículo.

2.2.5. Ley de Gestión Ambiental

Codificación 19, Registro Oficial Suplemento 418 de 10 de Septiembre del 2004.

El artículo 2 señala que la gestión ambiental se sujeta a los principios de solidaridad, corresponsabilidad, cooperación, coordinación, reciclaje y reutilización de desechos, utilización de tecnologías alternativas ambientalmente sustentables y respecto a las culturas y prácticas tradicionales.

En el capítulo II de la Autoridad Ambiental, el literal (j) del artículo 9 indica que le corresponde al Ministerio del Ramo coordinar con los organismos competentes sistemas de control para la verificación del cumplimiento de las normas de calidad ambiental referentes al aire, agua, suelo, ruido, desechos y agentes contaminantes.

2.2.6. Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental

Decreto Supremo No. 374. RO/ 97 de 31 de Mayo de 1976.

En el Capítulo VII De la Prevención y Control de la Contaminación de los Suelos:

En el artículo 20 se señala que queda prohibido descargar, sin sujetarse a las correspondientes normas técnicas y relaciones, cualquier tipo de contaminantes que puedan alterar la calidad del suelo y afectar a la salud humana, la flora, la fauna, los recursos naturales y otros bienes.

En el artículo 21 se indica que para los efectos de esta Ley, serán considerados como fuentes potenciales de contaminación, las sustancias radioactivas y los desechos sólidos, líquidos, o gaseosos de procedencia industrial, agropecuaria, municipal o doméstica.

En el artículo 23 se expresa que el Ministerio de Salud, en coordinación con las municipalidades, planificará, regulará, normará, limitará y supervisará los sistemas de recolección, transporte y disposición final de basuras en el medio urbano y rural.

2.2.7. Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Título IV

Se encuentra incluido dentro del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. El Decreto Ejecutivo No. 3516 del 28 de diciembre de 2002, fue publicado íntegramente en Registro Oficial No. 51 del 31 de marzo de 2003.

En el artículo 45 referente a los Principios Generales, toda acción relacionada a la gestión ambiental deberá planificarse y ejecutarse sobre la base de los principios de sustentabilidad, equidad, consentimiento informado previo, representatividad validada, coordinación, precaución, prevención, mitigación y remediación de impactos negativos, solidaridad, corresponsabilidad,

cooperación, reciclaje y reutilización de desechos, conservación de recursos en general, minimización de desechos, uso de tecnologías más limpias, tecnologías alternativas ambientalmente responsables y respeto a las culturas y prácticas tradicionales y posesiones ancestrales. Igualmente deberán considerarse los impactos ambientales de cualquier producto, industrializados o no, durante su ciclo de vida.

2.2.8. Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente.

Decreto Ejecutivo 3516, 31 de marzo del 2003.

En el libro VI, título II, artículo 30 que habla sobre las Políticas Nacionales de Residuos Sólidos señala que el Estado Ecuatoriano declara como prioridad nacional la gestión integral de los residuos sólidos en el país, como una responsabilidad compartida por toda la sociedad, que contribuya al desarrollo sustentable a través de un conjunto de políticas intersectoriales nacionales que se determinan en el mismo cuerpo normativo.

Libro VI. Anexo 6.

La presente norma técnica es dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y se somete a las disposiciones de éstos, es de aplicación obligatoria y rige en todo el territorio nacional.

Esta Norma establece los criterios para el manejo de los desechos sólidos no peligrosos, desde su generación hasta su disposición final. La presente Norma Técnica no regula a los desechos sólidos peligrosos.

2.2.9. Ordenanza Metropolitana No. 332. Ordenanza de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito.

La presente ordenanza sustituye y en consecuencia deroga el Capítulo I, de la Ordenanza No. 213 que reglamenta y controla la gestión de los residuos sólidos urbanos, domésticos, comerciales, industriales y biológicos potencialmente: infecciosos en el Distrito Metropolitano de Quito.

El artículo 2 de fines del sistema de gestión integral de residuos sólidos, establece que los fines del sistema de gestión integral de residuos sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito, algunos de los cuales son:

b) Desarrollar y garantizar el sistema integral de gestión de los residuos sólidos, desde la prevención en su generación hasta la disposición final.

e) Fomentar la organización social, consciente de su responsabilidad en el ciclo de residuos sólidos, mediante el aprovechamiento de los mismos, su reutilización y reciclaje, generando economías de escala.

h) Promover el uso de tecnologías ambientalmente limpias y económicamente sustentables.

i) Procurar la utilización de métodos de disposición final que permitan aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios y su posterior eliminación.

o) Integrar nuevas actividades e inversiones en la cadena de valor asociada al reciclaje, al coprocesamiento, a la reconversión de residuos como fuente de desarrollo industrial inclusivo y de empleo, promoviendo el acceso a la certificación y aplicación del proyecto dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) en líneas de reducción y control de emisiones, captación, quema de biogás y metano, uso energético, biodigestores, entre otros.

El artículo 3 del ámbito de aplicación establece las normas, principios, instrucciones y mecanismos propios de la política municipal referida a la generación y manejo integral de residuos sólidos, para un eficiente y eficaz servicio de aseo público, recolección, transporte, reciclaje y disposición final; fija las funciones que tendrá cada actor en los procesos; promueve los principios, fines, e instrumentos de estímulo, control y sanción; y, da el marco para el financiamiento y asignación de los recursos necesarios para la gestión sustentable, responsable y moderna de los residuos sólidos.

Las condiciones para implantar, administrar y desarrollar el sistema integral de gestión de residuos sólidos del Distrito Metropolitano de Quito, con los procedimientos pertinentes para que todos los sujetos antes indicados, puedan intervenir en sus diferentes fases, tanto para evitar y reducir la contaminación, cuanto para separar, reciclar, reparar y reutilizar residuos antes de desecharlos y depositarlos o eliminarlos de forma definitiva, constituyen también ámbitos abordados en esta ordenanza.

Esta regulación comprende a todos los residuos sólidos que se generan, manejan y disponen en el Distrito Metropolitano de Quito, sean estos comunes, especiales o peligrosos, a excepción de los residuos radioactivos y mineros.

Sección IV. Transferencia de Residuos Sólidos y de la Estación de Transferencia

En el artículo 46 sobre el Transporte a Estaciones de Transferencia, se establece que una vez realizada la recolección de residuos sólidos sea a través del sistema ordinario o el sistema especial o de aseo contratado, la entidad prestadora del servicio deberá transportar los residuos a las Estaciones de Transferencia, a los centros de tratamiento o en su defecto a los rellenos sanitarios para su disposición final, según corresponda.

En el artículo 47 de las Estaciones de Transferencia, se señala que la Municipalidad, con base a la información proporcionada por las empresas prestadoras del servicio, podrá definir la

necesidad de establecer estaciones de transferencia, con base en los varios criterios, entre ellos: El numeral 5 menciona que las estaciones de transferencia podrán implementarse conjuntamente con los centros de separación, para garantizar la recuperación de materiales.

Sección V de Reducción, Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos. Sub Sección I: Reducción, Aprovechamiento y Tratamiento de Residuos Sólidos No Peligrosos.

El artículo 48 de los Procesos de reducción señala que el aprovechamiento, la reutilización y el reciclaje serán los procesos para la reducción de los residuos sólidos.

El artículo 49 de la conservación y ahorro energético señala que a fin de promover la conservación y ahorro energético, el Municipio incentivará la utilización de materiales desechados, previa selección de acuerdo a sus características, como materia prima en el proceso de producción. Para este propósito promoverá la instalación y operación de centros de tratamiento de residuos sólidos, con el objetivo de utilizarlos en las diferentes actividades de aprovechamiento. Así mismo, incentivará el trabajo de gestores ambientales calificados especialmente considerando las economías de escala.

Sección VI: Disposición Final. Sub Sección I: Disposición Final de Residuos Sólidos No Peligrosos.

El artículo 57, de la Disposición en rellenos sanitarios, señala que la disposición final de residuos sólidos no peligrosos se realizará únicamente en los rellenos sanitarios autorizados por la Municipalidad.

Los residuos sólidos también podrán servir como insumos para la conversión en energía eléctrica o ser industrializados, siempre y cuando las plantas respectivas sean técnicas, económicas y ambientalmente sustentables.

2.2.10. Acuerdo Ministerial No. 028 Que sustituye el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria por el Libro VI de la Calidad Ambiental

Registro Oficial Edición Especial N° 270 del 13 de febrero de 2015

Capítulo VI Gestión Integral De Residuos Sólidos No Peligrosos, y Desechos Peligrosos y/o Especiales

El artículo 51 que habla sobre las Políticas Nacionales de Residuos Sólidos señala que el Estado Ecuatoriano declara como prioridad nacional la gestión integral de los residuos sólidos no peligrosos y desechos peligrosos y/o especiales en el país, como una responsabilidad compartida por toda la sociedad, que contribuya al desarrollo sustentable a través de un conjunto de políticas intersectoriales nacionales que se determinan en el mismo cuerpo normativo.

El artículo 52 referente al ámbito de aplicación regula todas las fases de la gestión integral de residuos no peligrosos, desechos peligrosos y/o especiales en el país, así como los mecanismos de prevención y control de la contaminación en el territorio nacional, al tener de los procedimientos y normas técnicas previstos en la normativa ambiental vigente y en los convenios internacionales relacionados con esta materia, suscritos y ratificados por el Estado.

Sección I Gestión Integral de Residuos y/o Desechos Sólidos No Peligrosos

El artículo 59 De la gestión integral de residuos y/o desechos sólidos no peligrosos, señala los lineamientos a seguir para la gestión integral, (...) incluye las posibilidades de recuperación y aprovechamiento, comercialización o finalmente su disposición final. Está dirigida a la implementación de las fases de manejo de los residuos sólidos que son la minimización de su generación, separación en la fuente, almacenamiento, recolección, transporte, acopio y/o transferencia, tratamiento, aprovechamiento y disposición final.

El artículo 75 indica los requisitos que deben se deben cumplir las estaciones de transferencia para residuos sólidos no peligrosos.

El artículo 77 que habla del aprovechamiento de los residuos sólidos no peligrosos, señala que el marco de la gestión integral de residuos sólidos no peligrosos, es obligatorio para las empresas privadas y municipalidades el impulsar y establecer programas de aprovechamiento mediante procesos en los cuales los residuos recuperados, dadas sus características, son reincorporados en el ciclo económico y productivo en forma eficiente, por medio del reciclaje, reutilización, compostaje, incineración con fines de generación de energía, o cualquier otra modalidad que conlleve beneficios sanitarios, ambientales y/o económicos.

2.2.11. Resolución No. 002 - SA.- 2014

Normas Técnicas para la Aplicación de las Ordenanzas Metropolitanas sustitutiva del Título V, “Del Medio Ambiente” del Libro Segundo del Código Municipal

Norma Técnica del Suelo.

En el numeral 3.7 se señala que con el fin de prevenir y mitigar la contaminación del recurso suelo, se deberá incorporar técnicas apropiadas y procedimientos para la minimización, reuso y reciclaje de los residuos sólidos y líquidos.

Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales

En el numeral 7 Criterios para considerar a un desecho como no peligroso o especial, la Autoridad Ambiental Distrital podrá solicitar el análisis de cualquier otro parámetro que considere necesario para el cumplimiento ambiental.

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Residuos Sólidos Urbanos

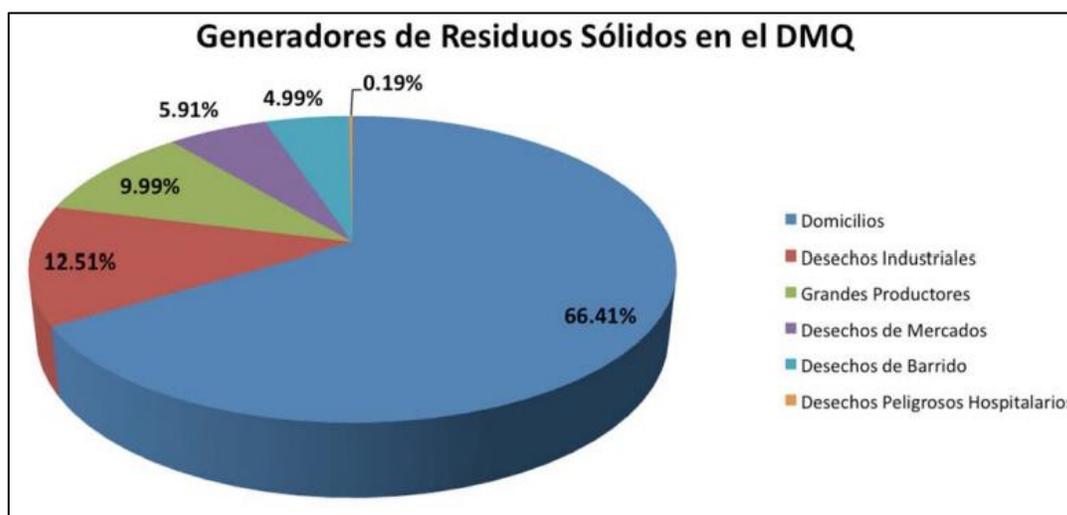
Según la organización de Cooperación y Desarrollo Económico OCDE, se denomina “residuos” a aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado ningún valor económico en el contexto que son producidas, es decir aquello que su propietario desecha por no serle útil, comprendiendo como “útil” una posible obtención de recursos económicos del producto (OCDE, s.f.).

Residuo Sólido Urbano (RSU) es todo material que sea desechado por la población, pudiendo ser este de origen comercial, industrial, desechos de la vía pública y los resultantes de la construcción y que no sea considerado como peligroso” (Berent et al, 2005). Los RSU, son considerados “No peligrosos” y se excluyen de los residuos peligrosos que se encuentran dentro de la clasificación CRETIB.

Según información publicada en la página del EMGIRS – EP en diciembre del 2014, el Distrito Metropolitano de Quito genera aproximadamente 2000 toneladas de RSU diarias.

Según EMASEO (2008), los generadores de los Residuos Sólidos Urbanos del DMQ son los siguientes:

Gráfico 2. Generadores de RSU en el Distrito Metropolitano de Quito



Fuente: EMASEO, 2008.

Citado en Plan de Servicios de Aseo y Administración Zonal Eloy Alfaro (2010).

Muchos de los residuos generados no han cumplido aún su ciclo de vida útil, por lo tanto, se los puede emplear para la producción de energía, reciclaje, compostaje, entre otros.

2.3.2. Estación de transferencia

Una Estación de Transferencia es una instalación ubicada en un punto próximo en las ciudades en la que los vehículos que efectúan la recolección de residuos (recolectores) hacen el trasvase de su carga a otros vehículos especialmente diseñados para optimizar la operación de transporte de residuos hasta los centros de tratamiento de los mismos (URBASER, 2014). El principal objetivo de este tipo de instalaciones es incrementar la eficiencia global del servicio de recolección a través de la disminución de costos en el sistema de transporte (Instituto Nacional de Ecología, 2001).

En la actualidad existen dos estaciones de transferencia funcionando dentro del DMQ, la Estación de Transferencia Sur (ET 1), ubicada en Quitumbe, y la Estación de Transferencia Norte

(ET 2), ubicada en el antiguo botadero de Zámbriza, reciben en total 2000 ton/día (EMGIRS EP, 2014).

La Estación de Transferencia Norte (Estación Porotohuaico), en donde se receptan los residuos generados por la zona centro-norte del Distrito, consta de 11 andenes, de los cuales tres están destinados a la separación y recuperación de residuos. Esta actividad es realizada por gestores calificados (recicladores) de la Asociación Vida Nueva, aproximadamente 225 personas realizan la separación manual del material reutilizable: PET, aluminio, cartón, papel, vidrio, entre otros; recuperando aproximadamente 580 toneladas mensuales de material reutilizable. La Estación se mantiene operativa las 24 horas, de lunes a sábado y los domingos permanece cerrada durante 8 horas de 14:00 a 22:00 (EMGIRS EP, 2014).

Por otra parte, la Estación de Transferencia Sur, en la que se receptan los residuos generados en la zona sur del DMQ, posee una superficie de 1800 m². Los residuos son depositados temporalmente en un galpón de transferencia, en donde son empujados hacia una tolva que conecta directamente con el sistema de compactación de residuos, para reducir el volumen y optimizar su transportación. Actualmente en esta Estación no se realiza una separación de material reutilizable. La ET 1 se mantiene operativa 24 horas al día los siete días de la semana (EMGIRS EP, 2014).

2.3.3. Valorización Energética

Según señala el artículo 3 de la Ley de Residuos española (10/1998), la valorización es “todo procedimiento que permita el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan causar perjuicios en el medioambiente”.

Carreras, et al. (2006) establece que existen dos tipos de valorización energética. La valorización energética en origen, la cual comprende operaciones que permitan el aprovechamiento del poder calórico, siempre y cuando estas sean llevadas a cabo en el mismo centro productivo donde se ha generado el residuo; y la valorización energética externa, que se realiza cuando las operaciones de valorización no pueden llevarse a cabo en el mismo centro productivo, por lo que se deberán realizar de forma externa por una empresa especializada.

Se trata de recuperar la energía almacenada en los residuos, mediante tratamientos que reducen su volumen y generan energía. El primer sistema utilizado para aprovechar la energía contenida en los residuos fue la incineración, que se basa en una combustión controlada en la que el elemento combustible son los propios residuos (Guía de Valorización Económica de Residuos, 2010). Estos se someten a un régimen de temperaturas medias (850-1200°C) y por efecto de la temperatura se produce un gran desprendimiento de calor (Castells, 2005), generalmente para mantener la reacción de combustión.

La incineración es un proceso que transforma los residuos sólidos urbanos en gases de combustión, escorias y cenizas, efectuándose una reducción en promedio de los residuos sólidos urbanos de un 90 % en volumen, y un 75 % en peso. Para el cálculo de las instalaciones de incineración son parámetros básicos los siguientes: Densidad de los residuos, heterogeneidad, humedad, material inerte y poder calorífico (ambientum.com, s.f.).

2.3.4. Poder Calórico

Según Perinat, Cólás y Alabern (2003), se denomina poder calórico de un gas combustible a la cantidad de calor que desprende en la combustión completa una unidad de masa o de volumen del gas. Se distinguen dos tipos de poder calorífico, el poder calorífico superior

(PCS) y el poder calórico inferior (PCI). Según Valderrama, (2006), el Poder Calorífico Superior (PCS) no considera corrección por humedad y el inferior (PCI) sí.

Poder calórico superior (PCS) es la cantidad de calor que desprende en la combustión completa una unidad de masa o de volumen de gas cuando los productos de la combustión son enfriados hasta la condensación del vapor de agua que contienen (Perinat et al, 2003).

Poder calórico inferior (PCI) es la cantidad de calor que desprende en la combustión completa una unidad de masa o de volumen de gas cuando los productos de la combustión son enfriados sin que llegue a producirse la condensación del vapor de agua (Perinat et al, 2003).

El poder calórico superior (PCS) y el poder calórico inferior (PCI) se miden utilizando una bomba de calor o bomba calorimétrica y sus unidades se expresan en unidades de energía por masa, [cal/g.], [kcal./kg.], [BTU/lb.].

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE MUESTRA

Para determinar el tamaño de la muestra, se utilizó la fórmula estadística aplicada a poblaciones finitas, es decir menos de 99.999 individuos. Se puede tomar como población un período de tiempo o toneladas diarias. Para este caso, se utilizó como población (N) los 365 días del año, descartando la segunda opción en razón de que una población de 2000 toneladas diarias implicaba una toma de muestras de varias toneladas al día, lo que era logísticamente imposible. La fórmula que se utilizó para dicho cálculo es:

Ecuación 1. Determinación del tamaño de la muestra

$$n = \frac{z^2 pqN}{z^2 pq + Nze^2}$$

Fuente: Webster, 1998

En donde:

n = tamaño de la muestra

Z = nivel de confianza

P = probabilidad de que ocurra el suceso

Q = probabilidad de que no ocurra el suceso

N = tamaño de la población

e = error muestral

Se decidió tomar para el nivel de confianza un valor estandarizado del 95.0 %, obteniéndose valores de $Z=1.96$ y $e=0.05$ con un error del 5%. De igual manera, se utilizaron valores estándares para P y Q asignando valores de $P=0.5$ y $Q=0.5$, siendo estos valores la probabilidad de éxito y de fracaso que significan el 50% respectivamente.

Se reemplazaron los valores en la fórmula anterior y se obtuvo un valor de n de 186 muestras, todas ellas repartidas en un periodo de un año quedando planteada de la siguiente manera:

$$n = \frac{(1.96)^2 \times 0.5 \times 0.5 \times 365}{(1.96^2 \times 0.5 \times 0.5) + (365 \times 1.96 \times (0.05)^2)}$$
$$n = 186$$

El número de muestras a tomar en un año son 186 por cada estación de transferencia, pero debido al retraso en la entrega del permiso de aprobación de entrada a las dos estaciones de transferencia ET1 y ET2, el tiempo de muestreo se redujo, iniciándose el muestreo en el mes de marzo del 2015 hasta la segunda semana de junio del mismo año. Los muestreos se realizaron una vez por semana en cada estación de transferencia en consecuencia al tiempo que se requiere en laboratorio para su análisis, de manera que se completó un total de 96 datos (24 datos por cada tipo de residuo), arrojando un total de 24 muestreos (12 de ellos en cada estación de transferencia). Sin embargo la cantidad de muestreos requeridos serán cubiertos por otro investigador en razón de que se continuará con el trabajo hasta cumplir este requerimiento.

3.2. METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL PODER CALÓRICO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

En la presente investigación se realizó un estudio exploratorio, en el que conjuntamente con las revisiones bibliográficas se realizaron investigaciones de campo para analizar el poder calórico de los residuos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito. Para llevar a cabo esta investigación, se realizaron una fase documental, una fase de campo y una fase de laboratorio que serán descritas a continuación, las mismas que sirvieron para elaborar una propuesta viable para la resolución de problemas provocados por la excesiva generación de residuos en el DMQ.

3.2.1. Fase documental

La fase documental consistió en una investigación holística de estudios anteriores tanto en el Ecuador como a nivel mundial de manera que esta investigación tenga un sustento bibliográfico que le da consistencia y validez a los resultados obtenidos. Además, a lo largo de la realización de este trabajo se revisó minuciosamente el manual de la bomba calorimétrica (No. 204M) especialmente para el manejo de las variables y de los cálculos que implican determinar el PCS y PCI. De esta manera, se desarrollaron tablas para manejar de mejor manera los datos obtenidos.

3.2.2. Fase de Campo

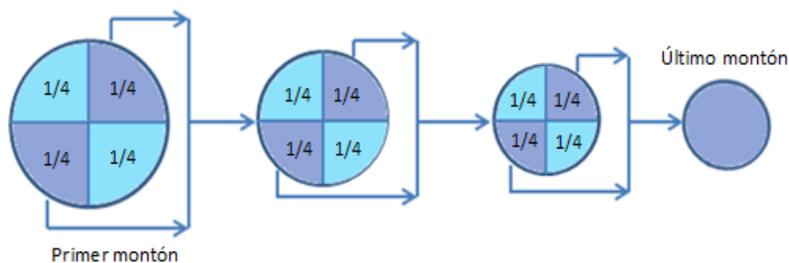
La fase de campo de la investigación se fundamentó en la toma de muestras realizadas en las dos estaciones de transferencia (ET1 y ET2) que funcionan dentro del DMQ. Los muestreos fueron realizados una vez por semana en cada una de las estaciones, siendo el día de la semana

determinado aleatoriamente, con el fin de obtener muestras representativas, debido a que la composición y características de los residuos pueden variar dependiendo del sector en el que fueron recolectados. Para llevar a cabo esta investigación, fue necesario tomar las debidas precauciones de seguridad, para lo cual como requisito previo, se realizó la vacunación contra las siguientes enfermedades: tétanos, hepatitis A y B y tifoidea; y para cada muestreo se utilizó el siguiente equipo de protección personal: casco, máscara contra partículas, gafas de seguridad, chaleco reflectivo, enterizo, botas de caucho y guantes irrompibles.

3.2.2.1. Muestreo

La toma de muestras se la realizó siguiendo la metodología establecida en la Guía HDT 17 “METODO SENCILLO DEL ANALISIS DE RESIDUOS SÓLIDOS” del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) y desarrollada por el Dr. Kunitoshi Sakurai. Esta metodología consiste en la elección de bolsas al azar, las cuales son pesadas y separadas hasta completar 50 kg, a continuación se realizan tres cuarteos tal como se indica en la siguiente imagen, obteniendo finalmente una muestra representativa de aproximadamente seis kilogramos en cada estación de transferencia (ET1 y ET2) (CEPIS, 2010).

Imagen 4. Metodología de muestreo



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Basada en el Método de CEPIS

El muestreo se lo realizó de la siguiente manera:

1. Se seleccionó el área de trabajo en la estación de transferencia, tomando en cuenta que no esté muy lejos de donde se encuentran las fundas con residuos y en especial que se encuentre sin residuos para que no interfiera con el procedimiento a realizarse. Ubicado el lugar apropiado, se realizó el método del cuarteo mencionado anteriormente.
2. Al azar se seleccionaron varias fundas de RSU en el centro de transferencia y se colocó en el área de trabajo previamente seleccionado.
3. Cada funda fue pesada con la balanza de mano hasta obtener un total de 50 kg de muestra inicial.
4. Se rompió las fundas de la muestra seleccionada y se homogenizó la muestra.
5. Se dividió la muestra en cuatro partes iguales y se escogió dos opuestas para formar otra muestra representativa más pequeña (cuarteo).
6. Se repitió el paso anterior dos veces más, hasta obtener una muestra representativa cuyo peso aproximado fue de 6 kg.

Esta muestra final fue separada en las categorías de interés: papel, cartón, madera, materia orgánica, las que fueron colocadas en bolsas debidamente etiquetadas (lugar de muestreo, responsable de muestreo, fecha de muestreo y número de muestra), estas muestras se colocaron en un contenedor e inmediatamente se trasladaron al Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de la Universidad Internacional SEK. Su traslado se realizó en vehículo personal.

3.2.3. Fase de laboratorio

Una vez en el laboratorio, se colocaron las muestras inmediatamente en refrigeración (a 10 °C) hasta el momento del análisis con el fin de preservar sus características y condiciones al momento del muestreo. El análisis de las muestras se realizó lo antes posible, para evitar cualquier alteración de sus características iniciales.

Para el estudio en el laboratorio se requirió el uso de mandil de manga larga, guantes de látex para manipular las muestras y mascarilla.

3.2.3.1. Preparación de las muestras para análisis

Una vez obtenidas las muestras, se procedió a homogenizar las mismas. Esto se lo realizó picando las muestras de cada categoría en pedazos no mayores a un centímetro, mezclando todos los componentes dentro de cada categoría para obtener una fracción representativa de todas y cada una de ellas. El papel, cartón y materia orgánica se picaron manualmente con tijeras, mientras que para la madera se utilizó un alicate de corte.

3.2.3.2. Secado de Muestras y Determinación del porcentaje de Humedad (%H)

A pesar de que la determinación del porcentaje de humedad no forma parte del proceso de cuantificación del poder calórico de los residuos, este resulta importante al momento de determinar la eficiencia de los distintos residuos como combustibles en la incineración. El porcentaje de humedad afecta directamente el desarrollo de este tratamiento, ya que mientras mayor cantidad de agua contenga el residuo, menor va a ser su poder calórico (Ayala, 2013).

El procedimiento para la determinación del porcentaje de humedad se adaptó del denominado Procedimiento de Técnicas para Análisis Químico de Suelos, del Laboratorio de Suelos y Agua de Sáenz Peña, Chaco, Argentina (2005). Una vez trituradas las muestras, se colocan alrededor de seis gramos de cada categoría (papel, cartón, madera, materia orgánica) en crisoles tarados de aproximadamente 30 mL y se procede a pesarlos en la balanza analítica. Cada crisol debe ser previamente marcado, con un código ya establecido en el que se especifica la Estación de Transferencia de la que proviene la muestra, el tipo de residuo y el número de muestra analizada. Este código se mantendrá durante toda la fase de laboratorio. Se prosigue a colocar los crisoles en una estufa a 105 ° C durante 24 horas, según la descripción del procedimiento mencionado. Una vez culminadas las 24 horas se pasa finalmente a pesar cada crisol con la muestra seca en la balanza analítica.

Imagen 5. Muestras trituradas



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

El cálculo del porcentaje en peso de humedad se efectuó siguiendo la fórmula establecida por el Laboratorio de Suelos y Agua de Sáenz Peña (2005), como se muestra a continuación:

Ecuación 2. Porcentaje de Humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{A-B}{A-C} \times 100$$

Fuente: Laboratorio de análisis Suelo Chaco, Argentina (2005)

En donde:

A = Peso Crisol + Muestra Húmeda (g).

B = Peso Crisol + Muestra Seca (g).

C = Peso del Crisol vacío y seco (g).

3.2.3.3. Cálculo de Constante del Equipo

Previo al procesamiento de las muestras, es necesario calcular la constante de la bomba calorimétrica, cada bomba presenta una constante específica que está determinada por las pequeñas diferencias que se puedan generar al momento de la fabricación (Ayala, 2013). Esta constante es obtenida al procesar una muestra estándar de ácido benzoico de aproximadamente un gramo. Este proceso se llevó a cabo con la bomba calorimétrica con la que se trabajó en el Laboratorio de Química de la Universidad Internacional SEK, obteniéndose así una constante. Al conocer el poder calórico de esta muestra estándar, es posible también utilizar este mismo proceso para verificar y validar la metodología implementada. La constante, identificada con la letra W, fue determinada con la siguiente fórmula, obtenida del Manual No 204M, propia del equipo:

Ecuación 3. Cálculo de la Constante del Equipo.

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_2}{t}$$

En donde:

W = Constante (cal / °C)

H = Calor de combustión de la muestra estándar de ácido benzoico (cal/g)

m = masa de la muestra estándar (g)

e1 = corrección en calorías por el calor de formación de ácido nítrico

e3 = corrección en calorías por el calor de combustión del cable de ignición

t = aumento de temperatura (°C)

Procedimiento para el cálculo de la constante del equipo (W)

Para el cálculo de la constante del equipo se sigue el procedimiento mencionado anteriormente. Para la determinación de cada variable, se deben tener las siguientes consideraciones:

- Para el calor de combustión de la muestra estándar de ácido benzoico (H), su valor viene dado en la etiqueta del frasco de las muestras de ácido benzoico. Se debe utilizar el valor que corresponda a las unidades requeridas en la fórmula (cal/g).
- Para la muestra (m), se debe utilizar el valor del pellet de ácido benzoico en gramos.
- Para la corrección por el calor de formación de ácido nítrico (e1), se debe utilizar el valor de la solución alcalina estándar usada en la titulación (Na_2CO_3).
- Para la corrección por el calor de combustión del cable de ignición, se debe utilizar el valor en centímetros del cable de ignición consumido durante la combustión.
- Para el aumento de temperatura (t), se sigue el procedimiento del *cálculo del aumento de temperatura* que se detalla en el punto 3.2.2.3.5 *Aumento de temperatura (t)*.

3.2.3.4. Cálculo del Poder Calórico

El objetivo de la presente metodología es lograr la cuantificación del poder calórico de los RSU, por medio de un uso adecuado del equipo y de los materiales.

Equipos y Materiales:

- Calorímetro Parr:
 - o Motor de accionamiento del agitador
 - o Polea del motor
 - o Cinturón del agitador
 - o Agitador con rodete
 - o Cubeta ovalada
 - o Sobrecubierta de calorímetro con tapa
 - o Bomba de combustión de oxígeno
 - o Conector para el termómetro
 - o Cable de ignición
 - o Termómetro digital
- Tanque de oxígeno
- Bomba de oxígeno
- Prensa de Pellets o Tabletas
- Estufa
- Cápsulas
- Balanza analítica
- Solución de Cloruro de Bario

- Solución de Carbonato de Sodio (0.0709 N)
- Indicador (Anaranjado de Metilo)
- Muestras Estándar (ácido benzoico)
- Muestra combustible (residuos)
- Agua Destilada
- Papel filtro
- Hilo de Algodón
- Pinzas
- Vaso de precipitación
- Pipeta
- Bureta
- Crisol
- Soporte

La cuantificación de poder calórico está conformada por distintos procedimientos, efectuados a todas las muestras sin diferenciación alguna. Es preciso resaltar que todo procedimiento que involucra el uso de la bomba calorimétrica se basó en el Manual de instrucciones para el funcionamiento de la bomba calorimétrica de oxígeno No. 204M, establecido por Parr Instrument Company. A continuación se presentan de manera detallada los pasos necesarios para determinar el poder calórico de las muestras de: papel, cartón, madera, materia orgánica.

3.2.2.3.1. Compresión de Muestras

Buscando la combustión total de la muestra seca, previo al preparado de la bomba, se realiza la compresión de cada muestra de: papel, cartón, madera, materia orgánica mediante el uso de la prensa Parr. La muestra comprimida, denominada pellet, debe pesar aproximadamente un gramo, siendo los límites superior e inferior 0.90 g y 1.5 g respectivamente (Parr Instrument Company, s.f). El Pellet debe ser manejado con cuidado debido a su fragilidad y su manipulación se realizó siempre con la ayuda de pinzas para evitar que absorba humedad proveniente del ambiente y de las manos del operador, la cual podría alterar los resultados del análisis.

Imagen 6. Muestras comprimidas



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

A continuación se detalla el procedimiento de compresión de la muestra con la prensa Parr:

Colocar el molde y su soporte en la base de la prensa. El molde debe ser colocado con el borde biselado hacia arriba y la base descansando sobre la superficie plana del soporte reversible.

- Introducir la carga (1 g) dentro de la cavidad del molde, presionar con una varilla de agitación si es necesario.

- Transferir el molde y su soporte a la prensa y empujar la palanca hacia abajo para comprimir la muestra. El tornillo regulador puede ser girado a conveniencia para obtener la compresión máxima.
- Levantar la palanca y deslizar el molde con su soporte fuera de la prensa.

3.2.2.3.2. Combustión de Muestras

Una vez realizado el Pellet, se pasa al procedimiento principal que consiste en la combustión de las muestras, utilizando la bomba calorimétrica. Al realizar el proceso de combustión con muestras secas se obtiene como resultado la cuantificación del poder calórico superior. En cuanto al poder calórico inferior, este dato será calculado por medio de la fórmula establecida por el Dr. Kunitoshi Sakurai en el año 2010, en su texto Método sencillo del análisis de residuos sólidos.

Para la preparación de la bomba, se aplica el siguiente procedimiento previo:

- Se conectan los cables de ignición a la unidad de ignición. Uno de los cables se conecta a la terminal etiquetada “10cm” y otro se conecta a la terminal etiquetada “Common”. No se debe encender la unidad de ignición si los cables conductores no han sido conectados a la bomba.
- Se coloca 2000 gramos de agua destilada en la cubeta ovalada.

Existen dos soportes, cada uno equipado con una base, una varilla de soporte y un anillo que se sujeta al extremo superior de la varilla. El soporte con el anillo de mayor tamaño se utiliza para sostener la tapa del calorímetro cuando es removida, mientras que el soporte con el anillo más pequeño sostiene la cabeza de la bomba.

- Ubicar la cabeza de la bomba en el soporte.

- Colocar la muestra, previamente comprimida de un gramo aproximadamente en la cápsula de acero inoxidable.
- Introducir el cable de ignición en la bomba y asegurarlo a los electrodos.
- Colocar un hilo de algodón de 10cm entrecruzado en el cable de ignición para facilitar el encendido de la muestra. Este hilo debe ser doblado sobre sí mismo, retorcido para formar una sola hebra e introducido en la cápsula que sostiene el Pellet procurando que éste haga contacto con la muestra. Este hilo es el encargado de conducir la energía hasta la muestra para que así, esta inicie su combustión.
- Comprobar que el anillo de sellado se encuentra en buenas condiciones. Para facilitar su deslizamiento dentro del cilindro, se lo puede humedecer con un poco de agua. Es necesario dejar la válvula de escape de gas abierta durante este proceso para liberar toda la presión de aire contenida en la bomba.
- Colocar la tapa rosca sobre el cilindro y cerrarla firmemente.
- Acoplar la conexión de llenado de oxígeno en el tanque y ajustarla fuertemente, manteniendo el manómetro hacia arriba.
- Deslizar completamente el conector de la manguera de oxígeno en la válvula de entrada en la cabeza de la bomba.
- Cerrar la válvula de salida en la cabeza de la bomba, abrir la válvula del tanque de oxígeno (no más de un cuarto de giro).
- Abrir lentamente la válvula de control de la conexión de llenado de oxígeno, hasta alcanzar una presión de 25 atm en el caso del papel y cartón y 30 atm en el caso de la materia orgánica y la madera, como lo determinó en un estudio previo Ayala (2013),

debido a que a 25 atm, la combustión de la madera y la materia orgánica no era completa, quedando hollín al finalizar la combustión.

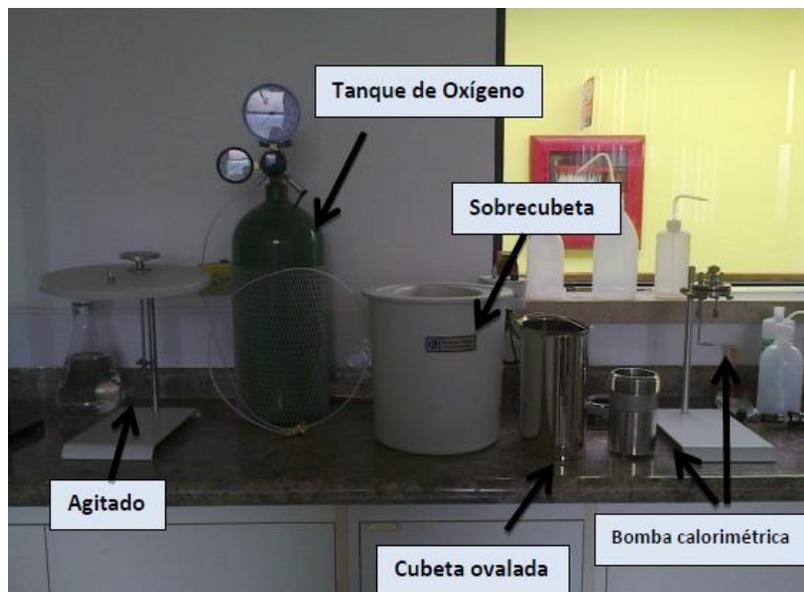
- Cerrar la válvula de control, la válvula de entrada de la bomba se cierra automáticamente.
- Una vez que se ha terminado de llenar la bomba calorimétrica, liberar la presión residual de la manguera de oxígeno empujando hacia abajo la palanca unida a la válvula de alivio.

3.2.2.3.3. Encendido de la Bomba:

- Colocar la cubeta ovalada previamente llenada con 2000g (2 L) de agua destilada dentro de la camisa adiabática.
- Colocar parcialmente la bomba dentro de la cubeta. Se debe tener cuidado de no mover la bomba al momento de introducirla en la cubeta, puesto que se podría mover la muestra.
- Presionar firmemente los tapones de los dos cables de ignición en los terminales de la cabeza de la bomba.
- Introducir totalmente la bomba dentro de la cubeta y comprobar que la bomba no tenga fugas.
- Prender el motor de agitación a la fuente de energía.
- Una vez, realizadas las debidas conexiones, encender el termómetro digital y el agitador y dejarlo correr por 5 minutos.
- Registrar la hora y la temperatura inicial.
- Continuar registrando la temperatura en intervalos de un minuto por exactamente cinco minutos.

- Alejarse del equipo y presionar el botón de encendido de la unidad de ignición por aproximadamente 3 segundos. No colocar ninguna parte del cuerpo sobre el calorímetro durante aproximadamente 30 segundos después del encendido.
- Durante un periodo de entre 10 y 15 minutos posteriores al encendido, en el que se experimenta un aumento acelerado de la temperatura, es necesario tomar lecturas de temperatura con un intervalo de 30 segundos hasta que esta permanezca constante.
- Continuar registrando la temperatura durante los siguientes 5 minutos, con intervalos de 30 segundos (10 mediciones). Cabe recalcar que en este estudio se realizaron 5 mediciones en intervalos de 30 segundos, sin embargo es necesario que se tomen 10 mediciones para facilitar los cálculos a realizarse.
- Una vez concluido el procesamiento de la muestra, se liberan los gases de combustión.
- Se enjuaga el interior de la bomba, cuyo lavado se lo realiza con 100 mL de agua destilada y se recolecta en un vaso de precipitación para su posterior análisis.

Imagen 7 . Bomba Calorimétrica



Fuente: Inés Ayala, 2013.

3.2.2.3.4. Determinación de Ácido Nítrico y Ácido Sulfúrico

La determinación tanto de ácido nítrico como de ácido sulfúrico es necesaria dentro del proceso de cuantificación de poder calórico ya que la formación de estos compuestos durante la combustión libera pequeñas cantidades de calor, las cuales deben ser corregidas en el resultado final con el objetivo de que este no se vea alterado. Para la determinación de Ácido Nítrico se debe utilizar Anaranjado de Metilo al 3% en peso y Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) al 5% en peso, mientras que para la determinación de Azufre se debe utilizar Cloruro de Bario (BaCl) al 5% en peso.

La preparación de estas soluciones se realizó de la siguiente manera:

- **Indicador Anaranjado de Metilo (3% en Peso)**

En un vaso de precipitación se colocó 3 gramos de Anaranjado de Metilo y se aforó con etanol hasta 100 mL. Luego, se agitó la solución con la ayuda de un agitador y se filtró la solución. Finalmente, el filtrado se colocó en un frasco con tapa tipo gotero.

- **Solución Carbonato de Sodio Na_2CO_3 (5% en Peso)**

En un vaso de precipitación se colocó 25 gramos de Na_2CO_3 (0.0709N) y se aforó con agua destilada hasta 500 mL. Luego, se agitó la solución con la ayuda de un agitador y se filtró la solución. Finalmente, el filtrado se colocó en un frasco de vidrio.

- **Solución Cloruro de Bario BaCl_2 (5% en Peso)**

En un vaso de precipitación se colocó 25 gramos de BaCl_2 y se aforó con agua destilada hasta 500 mL. Luego, se agitó la solución con la ayuda de un agitador y se filtró la solución. Finalmente, el filtrado se colocó en un frasco de vidrio.

Imagen 8. Soluciones de Anaranjado de Metilo, BaCl₂ y Na₂CO₃



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

A continuación se detalla el procedimiento para la determinación de Ácido Nítrico y Azufre:

Determinación de Ácido Nítrico:

El nitrógeno se encuentra en forma de ión nitrato y su cuantificación en esta titulación es indirecta ya que es visual.

- No manejar el equipo durante por lo menos 5 minutos después de la combustión para que las condiciones de temperatura interna de la bomba calorimétrica se estabilicen.
- Remover el cinturón del agitador y levantar la tapa del calorímetro (colocándola en el soporte).
- Limpiar el termómetro y el agitador.
- Retirar la bomba de la cubeta ovalada, remover los cables de ignición y limpiar la bomba.
- Abrir la válvula de salida para liberar la presión del gas, este proceso debe ser lento por un periodo no menor a un minuto.
- Destapar el cilindro y examinar el interior de la bomba en busca de evidencia de combustión incompleta, si tal evidencia es encontrada la prueba deberá ser descartada.

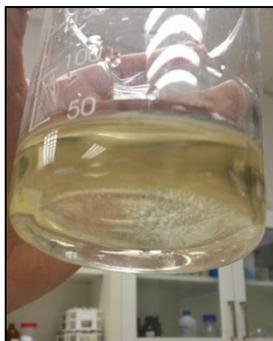
- Lavar el interior de la bomba con 100 mL de agua destilada y recoger el lavado un vaso de precipitación.
- Colocar tres gotas de Anaranjado de Metilo (3% en peso) en el lavado, esta cantidad se estableció debido a que permite observar el cambio de coloración al aplicarse el Na_2CO_3 .
- Titular el lavado de la bomba con una solución estándar de Carbonato de Sodio Na_2CO_3 (5% en peso) colocada gota a gota hasta observar un cambio de coloración, de un color rojizo a un color amarillo. El volumen de Na_2CO_3 consumido será utilizado en los posteriores cálculos.

Determinación de % de Azufre:

El azufre se encuentra en forma de ión sulfato y su cuantificación en esta titulación es directa ya que se realiza mediante filtración, secado y pesaje.

- Una vez finalizado el proceso de titulación, colocar gota a gota la solución de Cloruro de Bario (BaCl_2) al 5% en peso hasta observar la formación de Sulfato de Bario (precipitado de color blanco).

Imagen 9. Precipitado (Sulfato de Bario)



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

- Analizar la solución para determinar el contenido de azufre de la muestra.
- Dejar precipitar por 2 o 3 minutos
- Este precipitado debe ser filtrado utilizando un papel filtro previamente pesado.
- Transferir el papel filtro (con el material filtrado) a un crisol tarado.
- Colocar el crisol que contiene el papel filtro en la estufa a 105°C durante 24 horas para su secado.

Imagen 10. Secado de Crisoles + Papel filtro



Fuente: Lorena Mafla, 2015.

- Luego de las 24 horas, dejar enfriar el crisol por aproximadamente 20 minutos y pesar.
- Por diferencia de pesos iniciales con los finales, determinar el peso del precipitado de Sulfato de Bario.
- Calcular el porcentaje de azufre de la muestra mediante la fórmula determinada en el Manual de instrucciones para el funcionamiento para la bomba calorimétrica de oxígeno No. 204M, establecido por Parr Instrument Company, la cual se presenta a continuación:

Ecuación 4. Porcentaje de Azufre

$$\text{Azufre (\%)} = \frac{\text{Wt. BaSO}_4 \times 13,734}{\text{Wt. Muestra}}$$

En donde:

Wt. BaSO₄ = Peso neto del sulfato de bario (g)

Wt. Muestra = Peso inicial de la muestra (g)

3.2.2.3.5. Aumento de Temperatura (t)

Ecuación 5. Cálculo del Aumento de Temperatura

$$t = tc - ta - r1 (b - a) - r2 (c - b)$$

En donde:

t = aumento de temperatura (°C)

a = tiempo del encendido (min)

b = tiempo en el que la temperatura alcanza el 60% del aumento total (min)

c = tiempo en el que la temperatura se vuelve constante (min)

ta = temperatura al momento de encendido (°C)

tc = temperatura en el tiempo c (°C)

r1 = velocidad (°C/minutos) a la que la temperatura se elevó durante los 5 minutos antes del encendido

r2 = velocidad (°C/minutos) a la que la temperatura se elevó durante los 5 minutos después del tiempo c

Procedimiento para el cálculo del aumento de temperatura (t)

Para el cálculo del aumento de la temperatura se deben tomar en cuenta algunas correcciones que influyen para su determinación, siendo necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones para las variables que intervienen en su cálculo:

- El tiempo de encendido (a) corresponde al tiempo en minutos cuando se realiza el encendido de la fuente de ignición, es decir, el minuto 5.
- Para determinar el tiempo en el que la temperatura alcanza el 60% del aumento total de la temperatura (b) se debe restar el valor del último registro de temperatura tomado menos el primero. El valor obtenido de esta operación se multiplica por 0,6 (60%) y este nuevo resultado se suma al primer registro de temperatura. Finalmente, el tiempo correspondiente a esa temperatura es el valor de (b), en minutos.
- El tiempo en el que la temperatura se vuelve constante (c) es el tiempo en minutos correspondiente al primer registro de temperatura en donde la esta empieza a repetirse.
- La temperatura al momento de encendido (t_a) corresponde al valor de temperatura en grados centígrados registrada en el momento de encendido de la fuente de ignición, es decir, en el quinto minuto.
- La temperatura en el tiempo c (t_c) se refiere a la temperatura en grados centígrados correspondiente al tiempo del primer registro de temperatura en donde la esta empieza a repetirse.
- Para determinar la velocidad ($^{\circ}\text{C}/\text{minutos}$) a la que la temperatura se elevó durante los 5 minutos antes del encendido (r_1) se debe realizar la diferencia del quinto y el primer registro de temperatura y el valor obtenido, se divide para 5 minutos que es el intervalo de tiempo antes del encendido.

- Para determinar la velocidad ($^{\circ}\text{C}/\text{minutos}$) a la que la temperatura se elevó durante los cinco minutos después del tiempo c (r_2) se debe realizar la diferencia entre la última temperatura registrada y la primera temperatura registrada después de que la temperatura se vuelve constante. Finalmente, este valor obtenido se divide para 5 minutos.

3.2.2.3.6. Correcciones Termoquímicas

Para determinar el calor de combustión, es necesario efectuar correcciones en calorías por la formación de ácido nítrico, ácido sulfúrico y una corrección para el calor de combustión del cable de ignición. En esta investigación no se toma en cuenta la tercera corrección ya que, debido al diseño específico de la bomba, el cable de ignición no presenta señales de combustión alguna.

e_1 = corrección en calorías para el calor de formación de ácido nítrico (HNO_3)

= c_1 (mililitros de solución alcalina estándar usada en la titulación)

e_2 = corrección en calorías para el calor de formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4)

= $(13.7) (c_2) (m)$

c_2 = porcentaje de azufre en la muestra

e_3 = corrección en calorías para el calor de combustión del cable de ignición

= $(2.3) (c_3)$ cuando se utiliza cable de ignición de níquel-cromo

= $(2.7) (c_3)$ cuando se utiliza cable de ignición de hierro

c_3 = centímetros de cable de ignición consumido durante la combustión

Cabe recalcar que las constantes utilizadas en el presente cálculo son valores propios del equipo, los cuales fueron proporcionados por Parr Instrument Company por medio del Manual de instrucciones para el funcionamiento de la bomba calorimétrica de oxígeno No. 204M.

3.2.2.3.7. Calor Bruto de combustión (PCS)

El cálculo inicial del calor de combustión, referido al poder calórico superior, puede ser dividido en tres diferentes etapas. Dos etapas iniciales en las que se calcula e identifican distintas variables y un cálculo final en el que se obtiene como resultado el calor de combustión. Una vez que se han determinado todas las variables, se puede pasar al cálculo del calor de combustión o poder calórico superior, reemplazando los datos en la siguiente fórmula:

Ecuación 6. Cálculo del calor bruto de combustión

$$PCS = \frac{tW - e1 - e2 - e3}{m}$$

En donde:

PCS = Calor de combustión (cal/g)

t = aumento de temperatura (°C)

W = Constante (cal/°C)

m = masa de la muestra (g)

e1 = corrección en calorías por el calor de formación de ácido nítrico

e2 = corrección en calorías para el calor de formación de ácido sulfúrico

e3 = corrección en calorías por el calor de combustión del cable de ignición

3.2.2.3.8. Cálculo del Calor de Combustión (PCI)

El cálculo del poder calórico inferior se realizará por medio de una fórmula establecida por el Dr. Kunitoshi Sakurai, en su texto Método sencillo del análisis de residuos sólidos.

Ecuación 7. Cálculo de poder calórico inferior

$$PCI = PCS - \frac{W}{100} \times 600$$

En donde:

PCS = Poder calórico superior (cal/g)

PCI = Poder calórico inferior (cal/g)

W = % Humedad

3.2.2.3.9. Tratamiento Estadístico de Datos

Obtenida la totalidad de los resultados se procede a presentarlos como un promedio, utilizando la fórmula de la media aritmética indicada por Murray (1997):

Ecuación 8. Media Aritmética

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

En donde:

X = Promedio

X_i = Valores obtenidos.

n = Número de datos

Posteriormente, buscando determinar la variabilidad de los datos, se procedió a calcular la desviación estándar. Se utilizó la siguiente fórmula, establecida por Murray (1997):

Ecuación 9. Desviación Estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}}$$

En donde:

σ = Desviación Estándar

\bar{X} = Promedio

X_i = Valores obtenidos

N = Número de datos

Finalmente, utilizando los datos adquiridos de otros estudios conjuntamente con los resultados obtenidos en la presente investigación, se calculó el error relativo existente en base a la fórmula siguiente (Universidad de Cantabria, 2010):

Ecuación 10. Error Relativo Porcentual

$$Er = \left| \frac{x - X}{X} \right| * 100$$

En donde:

Er = Error relativo porcentual

x = Valor calculado

$X =$ Valor exacto (En este estudio, se toman los resultados del trabajo de Ribadeneira del año 2014)

El error relativo es el cociente (la división) entre el error absoluto (diferencia entre el valor calculado y el valor tomado como exacto) y el valor exacto. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento (%) de error. El error relativo porcentual puede ser positivo o negativo debido a que puede ser por exceso o por defecto, sin embargo para este estudio se tomó el valor absoluto.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. LEVANTAMIENTO DE DATOS

Debido al espacio limitado y a la cantidad de tablas, dentro de este apartado se adjunta únicamente un ejemplo de las tablas utilizadas para el levantamiento de datos. La información restante puede ser encontrada en los anexos A, B, C y D. Cabe recalcar que para los cálculos realizados de poder calórico se utilizaron las unidades en cal/g, sin embargo; los resultados finales se expresaron en kcal/kg. Ambas unidades son equivalentes, por lo que el valor de PCS y PCI no varía.

Tabla 1. Datos Temperatura

Muestra: ZP001
 Peso muestra: 0,9489 g

Datos Temperatura		
No	Tiempo (min)	T°
1	0,15	18,561
2	1	18,554
3	2	18,656
4	3	18,681
5	4	18,693
6	5	18,696
7	5,5	18,889
8	6	19,291
9	6,5	19,556
10	7	19,748
11	7,5	19,89
12	8	19,953
13	8,5	19,999
14	9	20,065
15	9,5	20,095
16	10	20,106
17	10,5	20,109
18	11	20,111
19	11,5	20,112
20	12	20,115
21	12,5	20,117
22	13	20,117
23	13,5	20,117
24	14	20,117
25	14,5	20,115
26	15	20,113

Pre-combustión

Combustión

Post-combustión

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

4.2. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos durante este procedimiento se presentan en forma de tablas con el fin de tener acceso a todos los ellos. Para la presentación de los resultados, se utilizaron los siguientes formatos:

- Secado y Porcentaje de Humedad

Tabla 2 . Formato de Porcentaje de Humedad

% Humedad (Papel)					
No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

- Porcentaje de Azufre

Tabla 3 . Formato de Porcentaje de Azufre

% Azufre (Papel)										
No.	Muestra	Peso Muestra (g)	Volumen Na ₂ CO ₃ (mL)	Volumen BaCl ₂ (mL)	Peso Crisol (g)	Peso Papel Filtro (g)	P. Crisol + P. Papel Filtro (g)	Peso Seco (g)	Peso BaSO ₄ (g)	% Azufre

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

- **Calor de Combustión**

Tabla 4 . Formato de Poder Calórico

Poder Calórico			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
X	=		
δ	=		

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

- **Resultados Totales**

Tabla 5 . Resumen de Datos para la Cuantificación de Poder Calórico

RESUMEN DE DATOS				
	Año 2014	Año 2015	% Error	% Humedad
	PCS (kcal/kg)	PCS (kcal/kg)	relativo	
PAPEL				
CARTON				
MADERA				
MATERIA ORGANICA				

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

4.2.1. Resultados para la cuantificación de poder calórico de RSU del DMQ

4.2.1.1. Resultados del Cálculo de Constante del Equipo

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_2}{t}$$

$$W = 2422 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

En donde:

W = Constante (cal / °C)

H = Calor de combustión de la muestra estándar de ácido benzoico → 6318 cal/g

m = masa de la muestra estándar → 1,1650 g

e1 = corrección por el calor de formación de ácido nítrico → 0,8 cal

e3 = corrección por el calor de combustión del cable de ignición → 0 cal

t = aumento de temperatura → 3,039 °C

4.2.1.2. Resultados del Porcentaje de Humedad

Tabla 6 . Porcentaje de Humedad del Papel

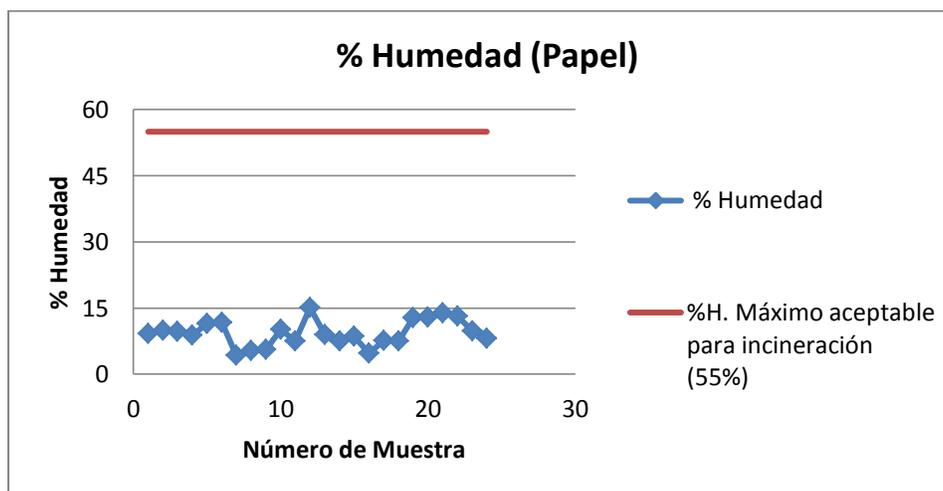
% Humedad (Papel)					
No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
1	ZP001	36,6104	42,6659	42,1121	9,15
2	SRP001	39,2771	45,2926	44,6983	9,88
3	ZP002	42,384	48,4404	47,8525	9,71
4	SRP002	35,6026	41,6505	41,1176	8,81
5	ZP003	42,1241	48,1405	47,4525	11,44
6	SRP003	36,2226	42,2228	41,5187	11,73
7	ZP004	35,6776	41,7371	41,4806	4,23
8	SRP004	36,3903	42,4619	42,1378	5,34

Tabla 6. (cont.)

No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
9	ZP005	36,7195	42,7826	42,4415	5,63
10	SRP005	36,0672	42,077	41,4698	10,10
11	ZP006	36,7166	42,7241	42,2737	7,50
12	SRP006	36,3921	42,3978	41,4893	15,13
13	ZP007	35,6791	41,6995	41,1572	9,01
14	SRPO007	33,3327	39,3672	38,9109	7,56
15	ZP008	34,4735	40,4819	39,9667	8,57
16	SRP008	34,8755	40,8777	40,5921	4,76
17	ZP009	34,4221	40,4243	39,9643	7,66
18	SRP009	37,6613	43,6614	43,2085	7,55
19	ZP010	34,0664	40,0708	39,3021	12,80
20	SRP010	35,2203	41,1194	40,3541	12,97
21	ZP011	35,3854	41,4586	40,6121	13,94
22	SRP011	36,8732	42,8987	42,1067	13,14
23	ZP012	34,4729	40,5659	39,9672	9,83
24	SRP012	34,3365	40,3527	39,8632	8,14
PROMEDIO					9,36

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 3 . Porcentaje de Humedad del Papel



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

El porcentaje promedio de humedad que representa la categoría de papel es de 9,36%, en su mayoría esta humedad es adquirida por la humedad propia y superficial del residuo. La muestra SRP003 posee una humedad de 15,13% siendo la más alta y la muestra ZP004 presentó la humedad más baja con 4,23%. Al estar todos los valores de humedad por debajo del 55%, este tipo de residuo es considerado óptimo para ingresar a un proceso de incineración.

Tabla 7 . Porcentaje de Humedad del Cartón

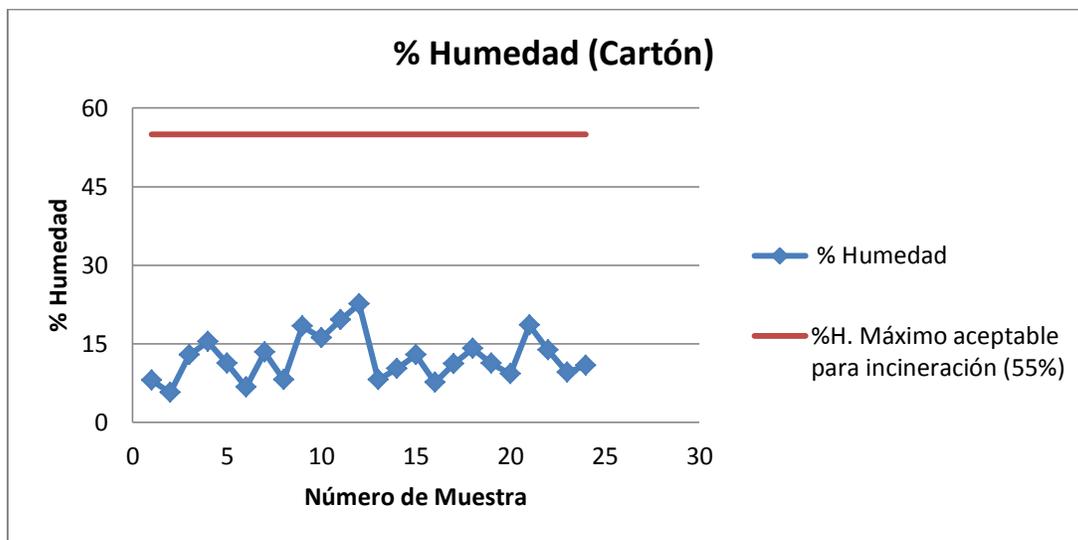
% Humedad (Cartón)					
No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
1	ZC001	36,7205	42,7689	42,2825	8,04
2	SRC001	35,1818	41,1941	40,8525	5,68
3	ZC002	39,3134	45,3505	44,5769	12,81
4	SRC002	35,7452	41,77782	40,8525	15,34
5	ZC003	36,2432	42,2508	41,5769	11,22
6	SRC003	36,2331	42,2343	41,8323	6,70
7	ZC004	36,6331	42,7207	41,9055	13,39
8	SRC004	38,8302	44,8373	44,3525	8,07
9	ZC005	36,0021	42,0053	40,9022	18,38
10	SRC005	38,8214	44,8235	43,8576	16,09
11	ZC006	35,683	41,7343	40,552	19,54
12	SRC006	38,8261	44,8336	43,4761	22,60
13	ZC007	36,7228	42,7326	42,2476	8,07
14	SRC007	35,6422	41,6477	41,035	10,20
15	ZC008	34,7213	40,7431	39,9665	12,90
16	SRC008	36,2117	42,2294	41,7722	7,60
17	ZC009	35,6423	41,6641	40,9945	11,12
18	SRC009	35,8459	41,7926	40,9554	14,08
19	ZC010	35,8325	41,9357	41,2492	11,25
20	SRC010	36,4322	42,4345	41,8824	9,20
21	ZC011	35,7229	41,727	40,6125	18,56

Tabla 7. (cont.)

No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
22	SRC011	36,9325	42,9348	42,1054	13,82
23	ZC012	34,0484	40,068	39,4945	9,53
24	SRC012	35,6464	41,6748	41,0217	10,83
PROMEDIO					12,29

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 4 . Porcentaje de Humedad del Cartón



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

El porcentaje promedio de humedad presentado de la categoría de cartón es de 12,29%, en su mayoría esta humedad es adquirida por la humedad propia y superficial del residuo. La muestra SRC006 posee una humedad de 22,60% siendo la más alta y la muestra SRC001 presentó la humedad más baja con 5,68%. Al igual que el papel, todos los valores de humedad

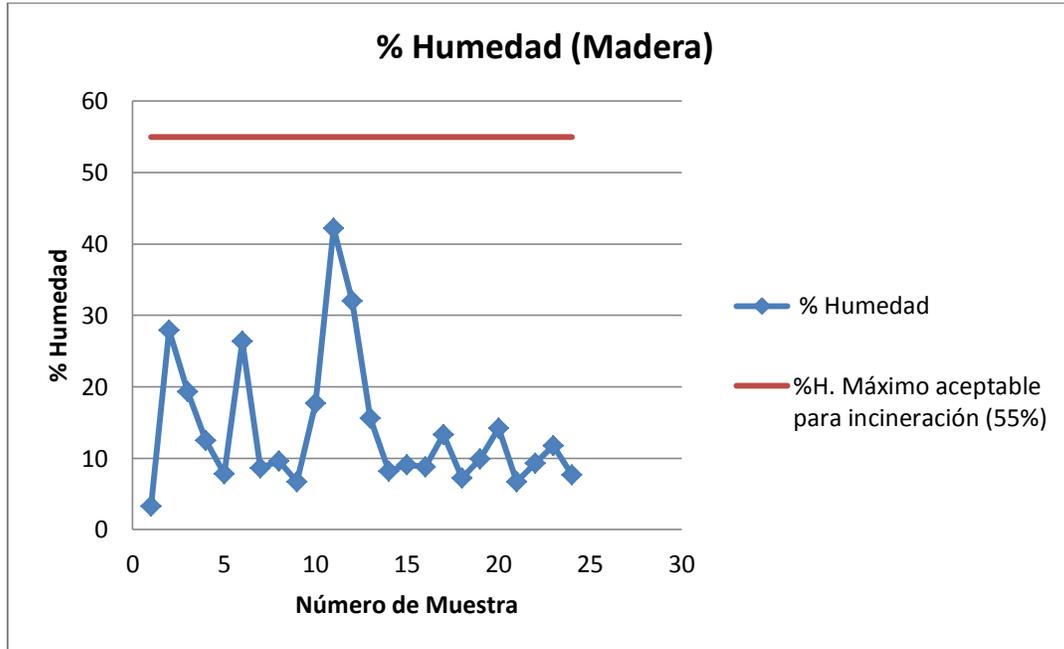
para el cartón se encuentran muy por debajo del 55% de humedad máxima aceptable para el proceso de incineración, de forma que este tipo de residuo es considerado óptimo para ingresar en este proceso térmico.

Tabla 8 . Porcentaje de Humedad de la Madera

% Humedad (Madera)					
No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
1	ZM001	36,2212	42,2218	42,0243	3,29
2	SRM001	36,1312	42,2449	40,5368	27,94
3	ZM002	42,4234	48,4382	47,2754	19,33
4	SRM002	38,6566	44,6888	43,9334	12,52
5	ZM003	42,0322	48,1088	47,6343	7,81
6	SRM003	42,2311	48,2387	46,6535	26,39
7	ZM004	36,2212	42,2218	41,7043	8,62
8	SRM004	35,1137	41,2129	40,6290	9,57
9	ZM005	36,0014	42,0140	41,6125	6,68
10	SRM005	36,0018	42,0762	41,0009	17,70
11	ZM006	36,6399	42,6895	40,1368	42,20
12	SRM006	35,1137	41,11701	39,1953	32,01
13	ZM007	35,0378	41,0656	40,1223	15,65
14	SRM007	38,4726	44,5457	44,0476	8,20
15	ZM008	36,0218	42,1206	41,5662	9,09
16	SRM008	36,8404	42,8453	42,3182	8,78
17	ZM009	36,4318	42,4519	41,6523	13,28
18	SRM009	37,5226	43,5275	43,0927	7,24
19	ZM010	42,0322	48,0500	47,4542	9,90
20	SRM010	35,0522	41,0847	40,2290	14,18
21	ZM011	38,0312	44,1315	43,7243	6,68
22	SRM011	37,4766	43,4933	42,9334	9,31
23	ZM012	36,6028	42,6979	41,9823	11,74
24	SRM012	37,4754	43,5025	43,0423	7,64
PROMEDIO					13,99

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 5 . Porcentaje de Humedad de la Madera



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

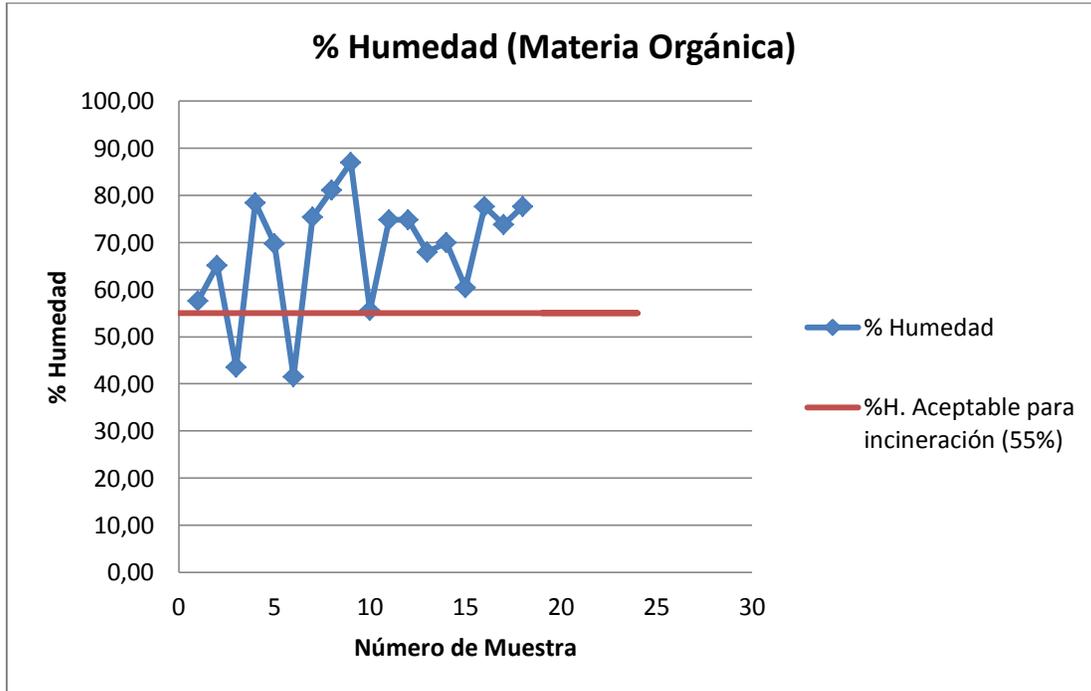
Para la categoría de madera, el porcentaje promedio de humedad es de 13,99%, cuya representativa humedad adquirida por la humedad propia y superficial del residuo. La muestra ZM006 posee una humedad de 42,20% siendo la más alta y la muestra ZM001 presentó la humedad más baja con 3,29%. Al estar los valores de humedad por debajo del 55% de humedad como rango máximo aceptable, este tipo de residuo es considerado óptimo para ingresar a un proceso de incineración.

Tabla 9 . Porcentaje de Humedad de la Materia Orgánica

% Humedad (Materia Orgánica)					
No.	Muestra	Peso Crisol (g)	Peso Crisol + Muestra Húmeda (g)	Peso Crisol + Muestra Seca (g)	% Humedad
1	ZMO001	35,1938	41,2785	37,775	57,58
2	SRMO001	37,1934	43,1941	39,286	65,13
3	ZMO002	38,5986	44,6139	41,9965	43,51
4	SRMO002	37,1934	43,1941	38,486	78,46
5	ZMO003	38,5986	44,6139	40,4165	69,78
6	SRMO003	37,1934	43,1941	40,7012	41,54
7	ZMO004	36,4579	42,5705	37,9615	75,40
8	SRMO004	36,4895	42,5951	37,6423	81,12
9	ZMO005	36,2122	42,2176	36,9903	87,04
10	SRMO005	36,0238	42,1224	38,7344	55,55
11	ZMO006	37,8325	43,9183	39,3656	74,81
12	SRMO006	36,4875	42,6824	38,0485	74,80
13	ZMO007	36,6339	42,6046	38,5491	67,92
14	SRMO007	36,2356	42,2533	38,03955	70,02
15	ZMO008	36,8339	42,906	39,2342	60,47
16	SRMO008	37,7037	43,7827	39,0608	77,68
17	ZMO009	39,5472	45,6193	41,1375	73,81
18	SRMO009	37,7037	43,7827	39,0608	77,68
19	ZMO010	35,8486	42,0108	37,8165	68,06
20	SRMO010	36,0343	42,0351	38,4276	60,12
21	ZMO011	36,0697	42,0994	38,775	55,13
22	SRMO011	35,1922	41,2169	37,6847	58,63
23	ZMO012	35,5493	41,6185	38,1375	57,36
24	SRMO012	36,2821	42,3448	39,2339	51,31
PROMEDIO					65,95

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 6 . Porcentaje de Humedad de la Materia Orgánica



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

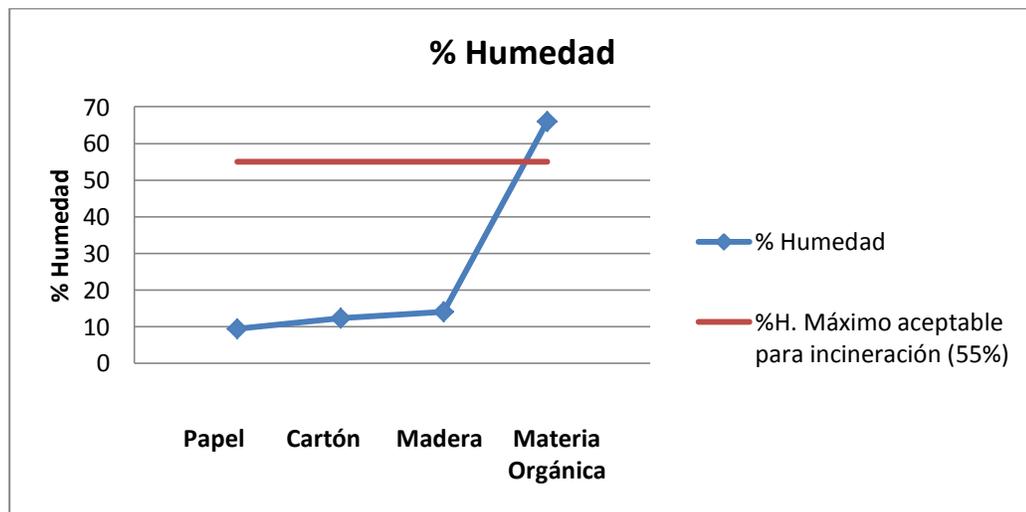
Finalmente, para la categoría de materia orgánica, el porcentaje promedio de humedad obtenido es de 65,95%, valor que está influenciado por las características propias de este tipo de residuo. La muestra ZMO005 posee una humedad de 87,04% siendo la más alta y la muestra SRMO003 presentó la humedad más baja con 41,54%. Este tipo de residuo, al sobrepasar el contenido máximo de agua establecido por Alonso, Martínez, & Olías (2003), del 55%, no se consideraría óptimo para utilizarse en el proceso de incineración. Sin embargo, por la gran cantidad de residuos orgánicos que en la ciudad de Quito se genera, se podrían utilizar como materia prima en el proceso de incineración aquellos residuos orgánicos que presenten menor cantidad de agua.

Tabla 10 . Porcentaje Promedio de Humedad de los Residuos

% HUMEDAD	
PAPEL	9,36
CARTON	12,29
MADERA	13,99
MATERIA ORGANICA	65,95

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 7 . Porcentaje Promedio de Humedad de los Residuos



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Como se puede observar en el *Gráfico 7*, el papel, cartón y madera tienen un contenido de agua muy por debajo del 55% (máximo aceptable para incineración), mientras que la materia orgánica sobrepasa el límite requerido. Un índice alto de humedad perjudica la recuperación de energía (CEMPRE, 1998), es por ello que es importante analizar este factor antes de utilizar los diferentes tipos de residuos para el proceso de incineración.

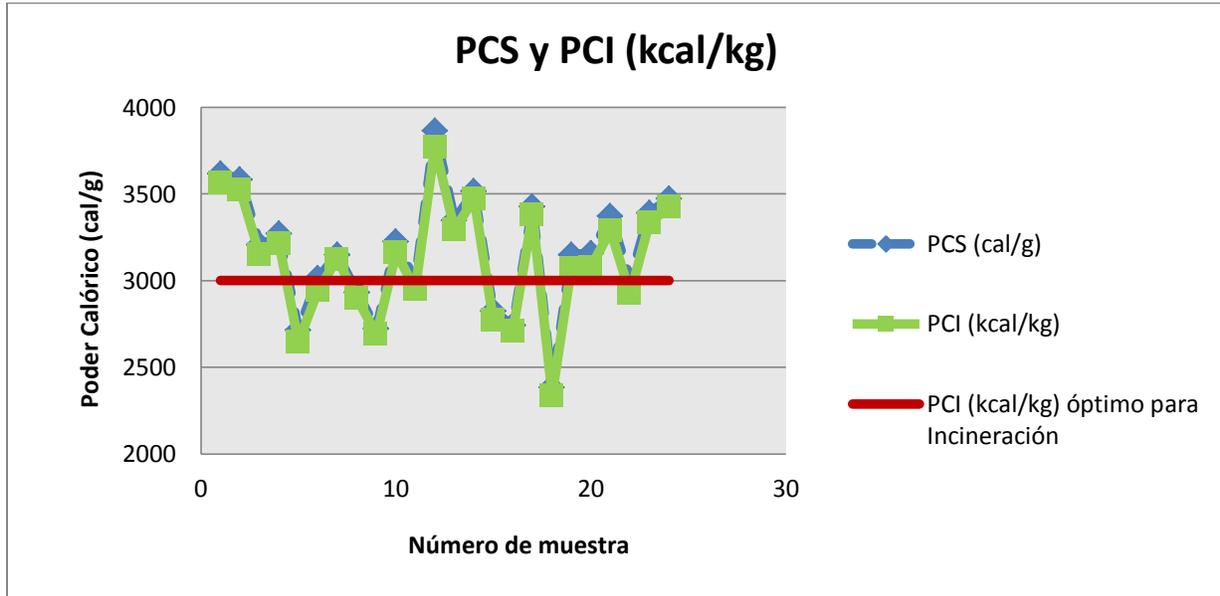
4.2.2. Resultados de Cuantificación de Poder Calórico de RSU del DMQ

Tabla 11 . Poder Calórico de Papel

Poder Calórico (Papel)			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
1	ZP001	3618	3563
2	SRP001	3585	3526
3	ZP002	3207	3149
4	SRP002	3271	3218
5	ZP003	2715	2647
6	SRP003	3016	2946
7	ZP004	3151	3125
8	SRP004	2933	2901
9	ZP005	2723	2689
10	SRP005	3225	3165
11	ZP006	2994	2950
12	SRP006	3865	3774
13	ZP007	3349	3295
14	SRP007	3517	3471
15	ZP008	2825	2774
16	SRP008	2742	2713
17	ZP009	3427	3381
18	SRP009	2386	2340
19	ZP010	3150	3074
20	SRP010	3158	3080
21	ZP011	3373	3289
22	SRP011	3005	2926
23	ZP012	3392	3333
24	SRP012	3473	3424
\bar{x}	=	3171	3115
δ	=	345	339

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 8 . Poder Calórico de Papel



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

En el caso del papel, el poder calórico superior obtenido en esta categoría presenta una desviación estándar baja, de 345 (10,87%) y los datos oscilan entre 2386 kcal/kg y 3865 kcal/kg, determinando que sean aceptables los resultados obtenidos.

El error relativo se calculó comparando la media aritmética obtenida en este estudio (3171 kcal/kg) con respecto al resultado al trabajo del año 2014 (3273 kcal/kg), arrojando un resultado de error relativo porcentual de 3,11%.

$$Er = \left| \frac{3171 - 3273}{3273} \right| = 3,12\%$$

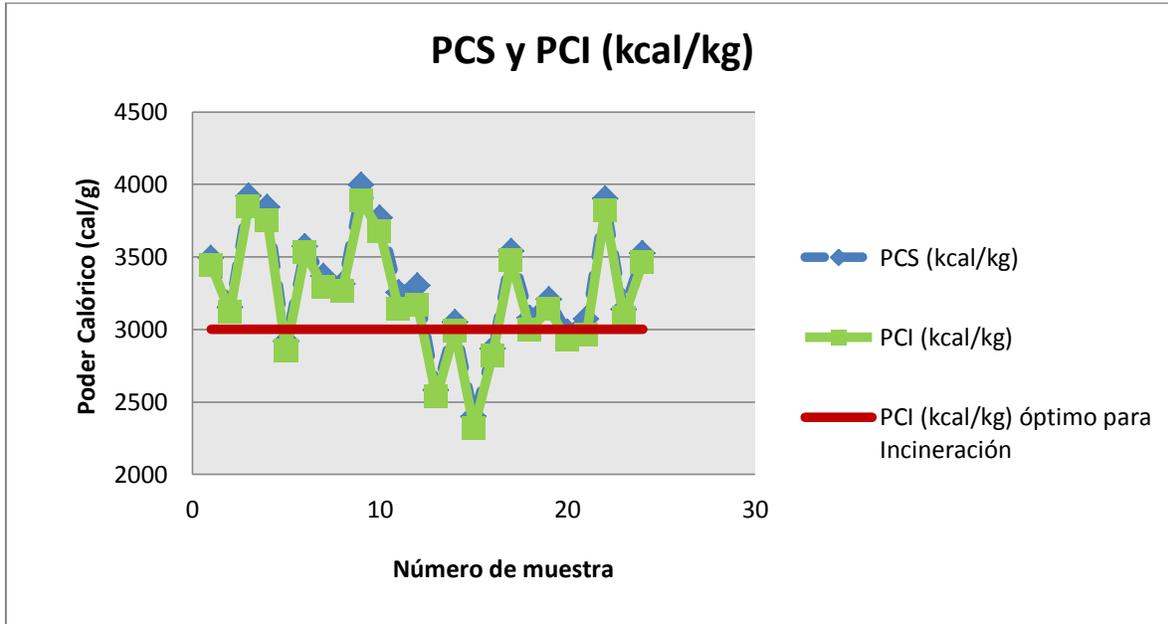
Se puede observar que el margen de error entre los dos datos es mínimo, confirmando así la validez de la metodología desarrollada. Esta distorsión varía debido a las características que presentan los residuos a consecuencia de la naturaleza intrínseca de los datos.

Tabla 12 . Poder Calórico de Cartón

Poder Calórico (Cartón)			
No.	Muestra	PCS (kcal/g)	PCI (kcal/g)
1	ZC001	3492	3443
2	SRC001	3153	3119
3	ZC002	3922	3845
4	SRC002	3844	3752
5	ZC003	2919	2851
6	SRC003	3573	3533
7	ZC004	3367	3287
8	SRC004	3312	3264
9	ZC005	3997	3887
10	SRC005	3772	3676
11	ZC006	3257	3140
12	SRC006	3302	3166
13	ZC007	2582	2534
14	SRC007	3051	2990
15	ZC008	2398	2320
16	SRC008	2866	2821
17	ZC009	3542	3476
18	SRC009	3081	2996
19	ZC010	3210	3142
20	SRC010	2985	2930
21	ZC011	3072	2961
22	SRC011	3902	3820
23	ZC012	3138	3081
24	SRC012	3526	3461
\bar{x}	=	3303	3229
δ	=	415	408

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 9 . Poder Calórico del Cartón



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

En referencia al cartón, el poder calórico superior obtenido en esta categoría presenta una desviación estándar baja, de 415 (12,57%) y los datos oscilan entre 2398 kcal/kg y 3997 kcal/kg. Este rango de variación en los resultados se debe a la variable composición de los residuos.

Al comparar la media aritmética obtenida en el presente estudio (3303 kcal/kg), con respecto al del año anterior (año 2014) en el que se indica un valor de PCS para el cartón de 3683 kcal/kg, se obtuvo un error relativo porcentual aceptable de 10,32%.

$$Er = \left| \frac{3303 - 3683}{3683} \right| = -10,32\%$$

Cabe mencionar que el valor del porcentaje de error es independiente del número de muestras que se realicen, sin embargo, depende de las características propias de los residuos. A

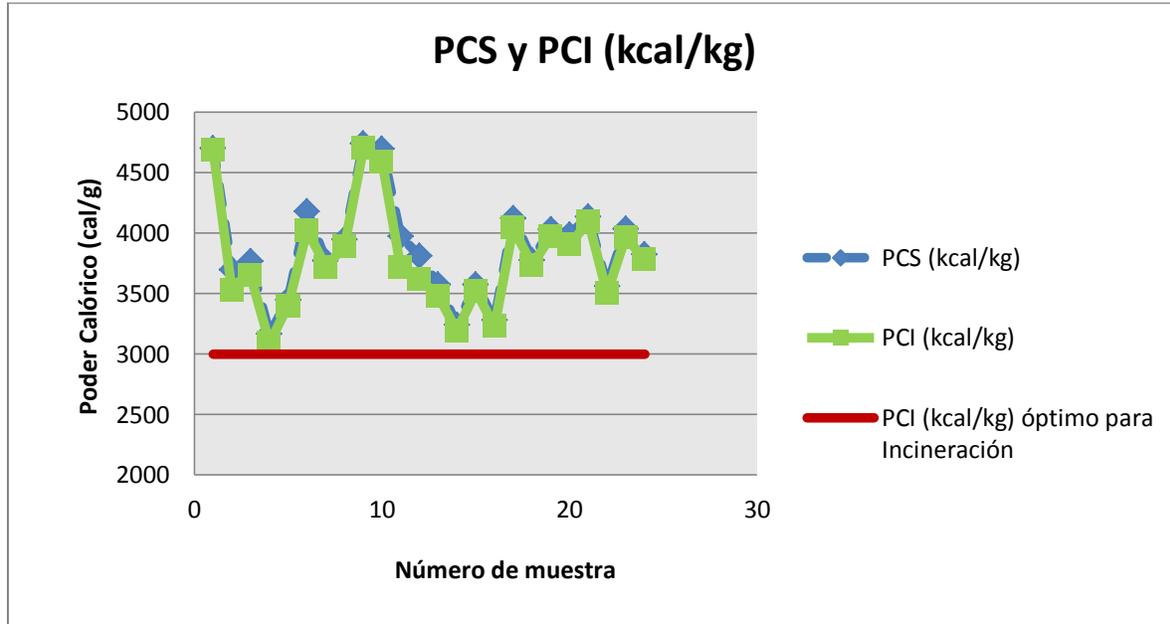
pesar de que el porcentaje de error para el cartón es un poco alto, los datos obtenidos de poder calórico concuerdan con lo establecido por la teoría, en la que se determina que el poder calórico de estos residuos varía entre 2400 y 4000 calorías por gramo.

Tabla 13 . Poder Calórico de Madera

Poder Calórico (Madera)			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
1	ZM001	4702	4683
2	SRM001	3698	3530
3	ZM002	3768	3652
4	SRM002	3167	3092
5	ZM003	3449	3402
6	SRM003	4181	4023
7	ZM004	3772	3721
8	SRM004	3946	3889
9	ZM005	4741	4701
10	SRM005	4700	4594
11	ZM006	3973	3720
12	SRM006	3811	3619
13	ZM007	3574	3480
14	SRM007	3241	3192
15	ZM008	3574	3519
16	SRM008	3282	3229
17	ZM009	4124	4044
18	SRM009	3778	3735
19	ZM010	4031	3972
20	SRM010	3989	3904
21	ZM011	4135	4095
22	SRM011	3560	3505
23	ZM012	4036	3966
24	SRM012	3827	3781
\bar{x}	=	3878	3794
δ	=	428	430

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 10 . Poder Calórico de la Madera



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

En el caso de la madera, el poder calórico superior obtenido en esta categoría presenta una desviación estándar relativamente baja, de 428 (11,03%) y los datos oscilan entre 3167 kcal/kg y 4741 kcal/kg, lo que hace aceptables los resultados obtenidos.

Al comparar la media aritmética de este estudio (3878 kcal/kg) con respecto al resultado de la investigación del año 2014 (3979 kcal/kg), dio como resultado un error relativo porcentual de 2,54%.

$$Er = \left| \frac{3878 - 3979}{3979} \right| = 2,54\%$$

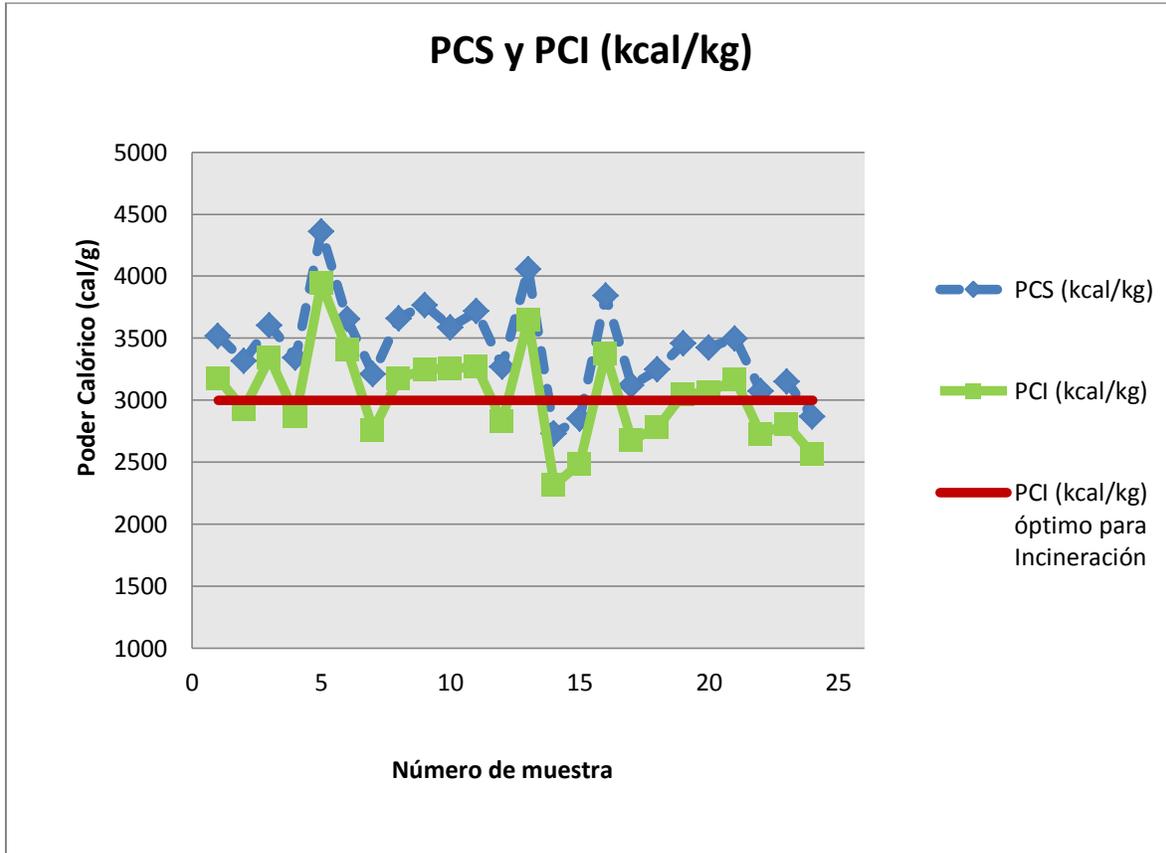
Esta desviación es mínima, por lo tanto, mientras más bajo es el error entre los estudios comparables, se pueden establecer correlaciones más precisas.

Tabla 14 . Poder Calórico de Materia Orgánica

Poder Calórico (Materia Orgánica)			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
1	ZMO001	3519	3173
2	SRMO001	3315	2925
3	ZMO002	3604	3342
4	SRMO002	3345	2874
5	ZMO003	4362	3943
6	SRMO003	3653	3404
7	ZMO004	3210	2758
8	SRMO004	3661	3174
9	ZMO005	3769	3246
10	SRMO005	3587	3254
11	ZMO006	3718	3269
12	SRMO006	3272	2823
13	ZMO007	4056	3649
14	SRMO007	2733	2313
15	ZMO008	2851	2488
16	SRMO008	3843	3377
17	ZMO009	3120	2678
18	SRMO009	3248	2782
19	ZMO010	3458	3050
20	SRMO010	3425	3065
21	ZMO011	3499	3168
22	SRMO011	3074	2723
23	ZMO012	3152	2808
24	SRMO012	2868	2560
	□ =	3431	3035
	δ =	382	379

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Gráfico 11 . Poder Calórico de la Materia Orgánica



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Finalmente, para la categoría materia orgánica, el poder calórico superior obtenido en esta investigación oscila entre 2733 kcal/kg y 4362 kcal/kg. Se puede atribuir este amplio rango de variación entre los resultados debido a la variación de la composición del residuo por la hora, fecha y estación de transferencia en donde se realizó el muestreo. En base a la diferencia en los datos obtenidos se alcanza una desviación estándar relativamente baja, de 382 kcal/kg (11,15%), la cual indica la variabilidad que existe entre la media aritmética y cada uno de los datos.

El error relativo fue obtenido al comparar la media aritmética de este estudio (3431 kcal/kg) con respecto al resultado del trabajo del año 2014 (3606 kcal/kg), dando como resultado un error relativo porcentual de 4,85%.

$$Er = \left| \frac{3431 - 3606}{3606} \right| = 4,85\%$$

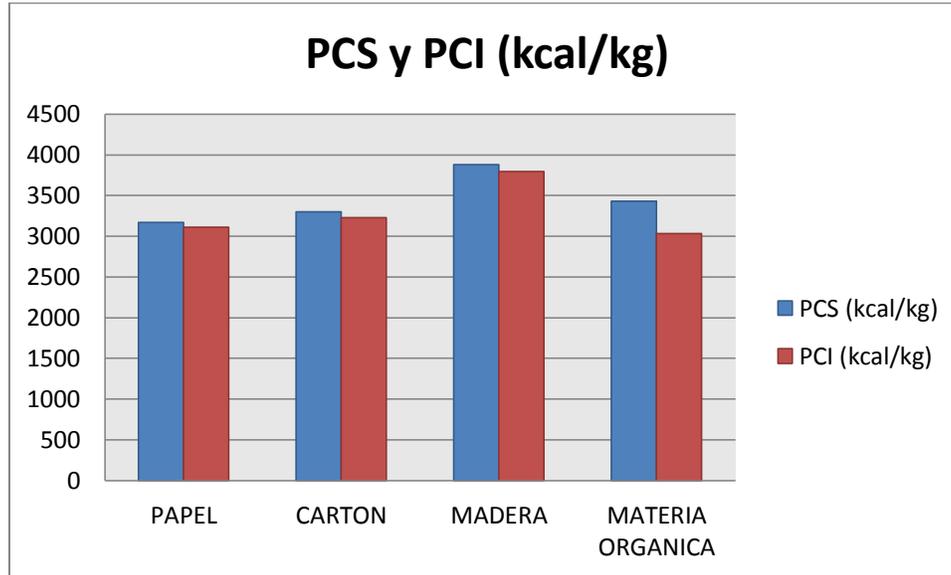
El error relativo porcentual, al igual que las categorías de papel, cartón y madera se da por defecto, sin embargo para este estudio se han tomado los valores absolutos. Su margen de error entre este trabajo y el realizado el año anterior (2014) es pequeño, lo que representa confiabilidad en los resultados y en la metodología utilizada.

Tabla 15 . Poder Calórico Promedio de los Residuos

Poder Calórico		
	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)
PAPEL	3171	3115
CARTON	3303	3229
MADERA	3878	3794
MATERIA ORGANICA	3431	3035

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

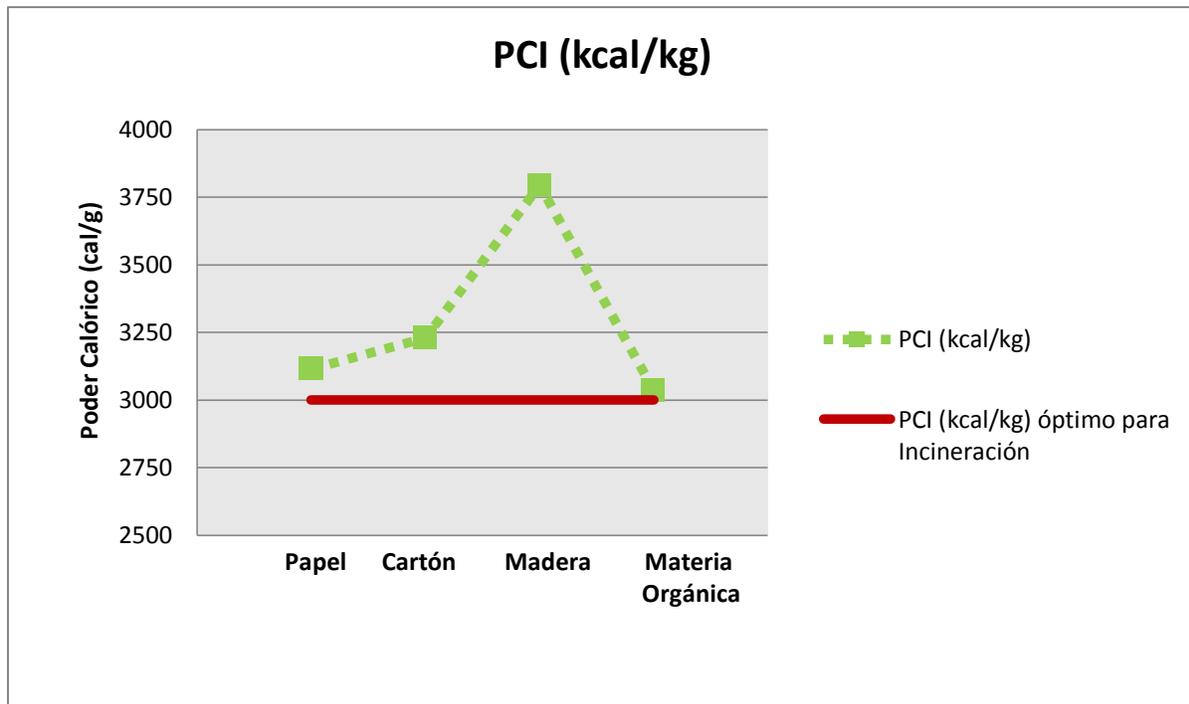
Gráfico 12 . Comparación de Poder Calórico Promedio de los Residuos



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Al comparar los resultados de poder calórico superior e inferior de los distintos tipos de residuos se puede observar que la madera presenta mayor calor de combustión (3878 kcal/kg), considerando que este residuo presenta una humedad menor al 55%, podría ser una buena opción el tratamiento térmico, no obstante, la cantidad que es depositada en las estaciones de transferencia norte y sur son mínimas, factor que conlleva a que se analice con mayor profundidad su factibilidad. Tanto el cartón como el papel presentan las condiciones de humedad y de capacidad calórica óptimas para utilizarse como materia prima en el proceso térmico de incineración, sin embargo es necesario recordar que este tipo de tratamiento debe ser optado después de la reutilización y el reciclaje de los residuos. Finalmente, la materia orgánica, debido a que contiene gran cantidad de humedad, presenta la mayor diferencia entre el poder calórico superior e inferior, sin embargo su capacidad calórica es alta.

Gráfico 13 . Comparación de Poder Calórico Inferior Promedio de los Residuos con respecto al requerido para Incineración



Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Para que en el tratamiento térmico por incineración, la combustión sea autosostenida y la recuperación energética sea óptima, es necesario que el poder calórico inferior de los residuos sea mayor a 3000 kcal/kg, lográndose de esta forma un rendimiento energético entre el 20 y el 30% (Romero, 2010). Bajo estas consideraciones, todos los residuos analizados (papel, cartón, madera, materia orgánica) cumplieron con este requisito ya que el PCI promedio de cada tipo de residuo se encuentra sobre el límite mínimo necesario.

4.2.3. Resultados Totales de Cuantificación de Poder Calórico de RSU del DMQ

Tabla 16 . Resultados de Humedad y Poder Calórico de los Residuos

Resultados de Humedad y Poder Calórico de los Residuos				
Residuo:	Papel			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
1	ZP001	3618	3563	9,15
2	SRP001	3585	3526	9,88
3	ZP002	3207	3149	9,71
4	SRP002	3271	3218	8,81
5	ZP003	2715	2647	11,44
6	SRP003	3016	2946	11,73
7	ZP004	3151	3125	4,23
8	SRP004	2933	2901	5,34
9	ZP005	2723	2689	5,63
10	SRP005	3225	3165	10,10
11	ZP006	2994	2950	7,50
12	SRP006	3865	3774	15,13
13	ZP007	3349	3295	9,01
14	SRPO007	3517	3471	7,56
15	ZP008	2825	2774	8,57
16	SRP008	2742	2713	4,76
17	ZP009	3427	3381	7,66
18	SRP009	2386	2340	7,55
19	ZP010	3150	3074	12,80
20	SRP010	3158	3080	12,97
21	ZP011	3373	3289	13,94
22	SRP011	3005	2926	13,14
23	ZP012	3392	3333	9,83
24	SRP012	3473	3424	8,14
Residuo:	Cartón			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
25	ZC001	3492	3443	8,04
26	SRC001	3153	3119	5,68
27	ZC002	3922	3845	12,81
28	SRC002	3844	3752	15,34
29	ZC003	2919	2851	11,22
30	SRC003	3573	3533	6,70

Residuo: Cartón		Tabla 16. (cont.)		
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
31	ZC004	3367	3287	13,39
32	SRC004	3312	3264	8,07
33	ZC005	3997	3887	18,38
34	SRC005	3772	3676	16,09
35	ZC006	3257	3140	19,54
36	SRC006	3302	3166	22,60
37	ZC007	2582	2534	8,07
38	SRC007	3051	2990	10,20
39	ZC008	2398	2320	12,90
40	SRC008	2866	2821	7,60
41	ZC009	3542	3476	11,12
42	SRC009	3081	2996	14,08
43	ZC010	3210	3142	11,25
44	SRC010	2985	2930	9,20
45	ZC011	3072	2961	18,56
46	SRC011	3902	3820	13,82
47	ZC012	3138	3081	9,53
48	SRC012	3526	3461	10,83
Residuo: Madera				
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
49	ZM001	4702	4683	3,29
50	SRM001	3698	3530	27,94
51	ZM002	3768	3652	19,33
52	SRM002	3167	3092	12,52
53	ZM003	3449	3402	7,81
54	SRM003	4181	4023	26,39
55	ZM004	3772	3721	8,62
56	SRM004	3946	3889	9,57
57	ZM005	4741	4701	6,68
58	SRM005	4700	4594	17,70
59	ZM006	3973	3720	42,20
60	SRM006	3811	3619	32,01
61	ZM007	3574	3480	15,65
62	SRM007	3241	3192	8,20
63	ZM008	3574	3519	9,09
64	SRM008	3282	3229	8,78
65	ZM009	4124	4044	13,28
66	SRM009	3778	3735	7,24

Residuo:	Madera	Tabla 16. (cont.)		
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
67	ZM010	4031	3972	9,90
68	SRM010	3989	3904	14,18
69	ZM011	4135	4095	6,68
70	SRM011	3560	3505	9,31
71	ZM012	4036	3966	11,74
72	SRM012	3827	3781	7,64
Residuo:	Materia Orgánica			
No.	Muestra	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	% HUMEDAD
73	ZMO001	3519	3173	57,58
74	SRMO001	3315	2925	65,13
75	ZMO002	3604	3342	43,51
76	SRMO002	3345	2874	78,46
77	ZMO003	4362	3943	69,78
78	SRMO003	3653	3404	41,54
79	ZMO004	3210	2758	75,40
80	SRMO004	3661	3174	81,12
81	ZMO005	3769	3246	87,04
82	SRMO005	3587	3254	55,55
83	ZMO006	3718	3269	74,81
84	SRMO006	3272	2823	74,80
85	ZMO007	4056	3649	67,92
86	SRMO007	2733	2313	70,02
87	ZMO008	2851	2488	60,47
88	SRMO008	3843	3377	77,68
89	ZMO009	3120	2678	73,81
90	SRMO009	3248	2782	77,68
91	ZMO010	3458	3050	68,06
92	SRMO010	3425	3065	60,12
93	ZMO011	3499	3168	55,13
94	SRMO011	3074	2723	58,63
95	ZMO012	3152	2808	57,36
96	SRMO012	2868	2560	51,31

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

Tabla 17 . Resumen de Datos Promedios para la Cuantificación de Poder Calórico

RESUMEN DE DATOS				
	Año 2014 PCS (kcal/kg)	Año 2015 PCS (kcal/kg)	% Error relativo	% Humedad
PAPEL	3273	3171	3,12	9,36
CARTON	3683	3303	10,32	12,29
MADERA	3979	3878	2,54	13,99
MATERIA ORGANICA	3606	3431	4,85	65,95

Elaborado por: Lorena Mafla, 2015.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En la investigación se cumplió con el objetivo general de cuantificar el poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos: papel, cartón, madera, materia orgánica del Distrito Metropolitano de Quito mediante la aplicación de la metodología utilizada en estudios anteriores.
- Las categorías de madera, cartón y papel presentaron el contenido de humedad necesario para ser consideradas como materia prima óptima para el proceso de incineración. Mientras que el porcentaje de humedad promedio contenido en las muestras de materia orgánica analizadas superó el límite máximo establecido en la teoría (55% de humedad), por lo que bajo esta consideración, este tipo de residuo no podría ser considerado como materia prima exclusiva para el proceso de incineración.
- Según Romero (2010), para que la combustión en la incineración sea autosostenida y la recuperación energética sea óptima, es necesario que el poder calórico inferior de los residuos sea mayor a 3000 kcal/kg, con lo que se logra un rendimiento energético entre el 20 y el 30%. Bajo estas consideraciones, todos los residuos analizados (papel, cartón, madera, materia orgánica) cumplieron con este requisito ya que el PCI promedio de cada tipo de residuo se encuentra sobre el límite mínimo necesario.

- Se comprobó la eficacia en el uso de la metodología, ya que se encontraron similitudes entre los resultados teóricos y prácticos lo que indica validez de la misma.
- El aprovechamiento energético mediante un tratamiento térmico es posible para las categorías de madera, cartón y papel porque contienen el poder calórico más alto, y la energía liberada durante el proceso de incineración de estos materiales puede ser utilizada para distintos fines.
- La categoría de madera presentó el valor promedio de poder calórico más alto de las categorías analizadas (3979 kcal/kg), por lo que este tipo de residuo puede ser utilizado en un tratamiento térmico, no obstante el porcentaje que es trasladado a las estaciones de transferencia de Zámbriza y Santa Rosa es relativamente bajo, siendo necesario analizar si la cantidad de residuo obtenida justifica la implementación de este tratamiento.
- La categoría de papel y cartón presentan un PCS medio similar al de la materia orgánica, sin embargo al momento de analizar el PCI se observa que en el caso de la materia orgánica existe una gran diferencia debido al contenido de agua en este tipo de residuos.
- Para conseguir la combustión completa de las muestras, al momento de la preparación de la bomba para las categorías de papel y cartón se utilizó la inyección de oxígeno de 25atm, mientras que para las categorías de madera y materia orgánica se incrementó la presión de oxígeno utilizando 30atm en razón de que estos residuos poseen alto contenido de carbono.
- El valor del poder calórico superior e inferior de las distintas categorías depende de la composición de los residuos, de las condiciones ambientales, del momento y del lugar

en el que se tome la muestra y también podría verse afectadas por el transporte y su conservación.

- En base a referencias bibliográficas y pruebas realizadas con la bomba calorimétrica adiabática, se determinó que para un proceso de incineración óptimo de los RSU es necesario analizar las muestras completamente secas, apropiadamente trituradas y compactadas obteniéndose mejores resultados.
- Durante la realización de este estudio, se comprobó la efectividad de la bomba calorimétrica de oxígeno para la cuantificación de poder calórico de los residuos sólidos urbanos del DMQ.
- El tiempo de registro de temperatura en el período de post-combustión debe ser de 5 minutos, lo que implica que se obtendrán 10 mediciones ya que estas se toman cada 30 segundos, ya que este es un requisito que influye en el cálculo de la variable r_2 (velocidad en $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a la que la temperatura se elevó durante los 5 minutos después del tiempo en que se estabiliza la temperatura).
- Durante el tratamiento estadístico de los resultados, se encontró que existe una desviación estándar baja, lo que significa que los datos obtenidos son próximos al promedio. Sin embargo, los resultados obedecen a la naturaleza intrínseca de los datos, los mismos que a su vez dependen de las características propias de los residuos.
- Esta investigación se realizó como continuación de dos estudios anteriores para completar el número de muestras requeridas, lo que ha permitido determinar la tendencia en la que se encuentra el poder calórico de los residuos y validar el método desde un punto de vista estadístico.

- Se encontraron cálculos errados en los estudios previos, por lo que fue necesario realizar las respectivas correcciones lo que permitió mantener una base de datos confiables. Estas correcciones contribuyeron principalmente para calcular el error relativo de este estudio.
- El porcentaje de error relativo del poder calórico que se obtuvo en las categorías de: papel, cartón, madera, materia orgánica son relativamente bajos, aseverándose de esta manera la confiabilidad de los resultados obtenidos.
- La categoría de cartón presenta un mayor error relativo (10,32), no obstante su media aritmética (3683 kcal/kg) entra en el rango establecido en la teoría. La madera con 2,54% es la categoría que menor error relativo presenta. El error relativo porcentual varía por las características que presentan los residuos, ya que es la naturaleza intrínseca de los datos.
- La gestión de los residuos sólidos en el DMQ no se efectúa de manera técnica, puesto que la falta de ejecución por parte de las entidades responsables del manejo de los RSU, retrasa la aplicación de alternativas que permitan aprovechar las características de los residuos y generar políticas de gestión acordes a la realidad.
- La recolección de los RSU bajo un mal manejo del sistema “a pie de vereda” dificulta el aprovechamiento de los mismos, ya que no se realiza previamente su separación desde los hogares por falta de cultura y concienciación y por otro lado, debido a la falta de procedimientos técnicos en las estaciones de transferencia, constatándose que sólo una parte de los desechos aprovechables es recolectada por los minadores, con lo que no hay una concordancia con las disposiciones vigentes.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con el análisis de muestras para de esta manera aumentar la base de datos, disminuir el error relativo, validar la metodología adoptada y obtener resultados más cercanos a la realidad. La continuidad de este estudio permitirá analizar de mejor manera las variaciones en los datos y los resultados obtenidos. Para obtener un estudio con resultados confiables, es necesario que este sea realizado de manera cuidadosa, especialmente en el manejo de las variables, ya que para este trabajo de fin de carrera se tuvieron que realizar varias correcciones de estudios anteriores.
- Al haber comprobado la validez de la metodología desarrollada, se recomienda mantener este procedimiento en futuros estudios con el fin de proporcionar confiabilidad de los datos obtenidos y poder realizar correlaciones y comparaciones entre la información generada.
- A lo largo del desarrollo del proyecto se recomienda realizar procedimientos periódicos con muestras estándar de ácido benzoico, con la finalidad de corroborar la eficiencia de la metodología desarrollada, así como el correcto funcionamiento del equipo utilizado.
- Se recomienda mantener un correcto protocolo en el manejo de las muestras para evitar alteraciones en los resultados.
- Se recomienda registrar la temperatura durante los siguientes 5 minutos, con intervalos de 30 segundos (10 mediciones). Es importante que se tomen las mediciones por este intervalo de tiempo ya que es un requisito para el cálculo de la variable r_2 (velocidad en $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a la que la temperatura se elevó durante los 5 minutos después del tiempo en que se estabiliza la temperatura).

- Durante la realización del trabajo de campo es necesario mantener las debidas precauciones de seguridad para lo cual se debe utilizar el equipo de protección personal previamente establecido.
- Es necesario mantener un cronograma de uso de los laboratorios para que el trabajo no sea interrumpido por otros alumnos que estén ocupando el/los mismo(s) equipo(s).
- Tener precaución al utilizar los equipos, especialmente de la bomba calorimétrica, el tanque de oxígeno y la prensa Parr debido a que su mal uso causaría retrasos en la investigación, daños en los equipos o accidentes.
- Manipular el pellet cuidadosamente, evitando de esta manera que este se desintegre, especialmente al colocarlo en la cápsula de la bomba calorimétrica.
- Se debe tener mucho cuidado el momento de colocar la bomba calorimétrica dentro de la cubeta llena de agua para evitar que el hilo pierda contacto con el pellet que se encuentra en la cápsula.
- Muchos de los residuos generados en el Distrito Metropolitano de Quito no han cumplido aún su ciclo de vida útil, por lo tanto, se los puede emplear para la producción de energía, de compost, alcohol, entre otros.
- Dado el volumen de generación de desechos de materia orgánica, se recomienda analizar la viabilidad de tratamientos alternativos para su manejo con la finalidad de obtener energía, como por ejemplo la biometanización, bioalcoholización.
- No se recomienda incorporar los residuos plásticos a la investigación debido a la generación de sustancias tóxicas, como dioxinas y furanos durante la combustión, lo que puede afectar a la salud del analista.

- Es importante que las muestras sean analizadas lo antes posible para evitar variaciones en las características iniciales de los residuos, especialmente en el contenido de agua de estos, ya que el porcentaje de humedad es un factor que influye directamente en la determinación del poder calórico y los datos a obtenerse pueden verse alterados, para ello, es necesario cumplir con los procedimientos de manejo y almacenamiento establecidos.
- Además de la cuantificación del poder calórico, se recomienda realizar estudios de otros parámetros necesarios para determinar la viabilidad de incorporar un tratamiento térmico al manejo de residuos sólidos dentro del DMQ.
- Se recomienda estudiar la mejor forma de incorporar un sistema de separación en la fuente y recolección diferenciada, de modo que se pueda dar un tratamiento más eficaz a los desechos sólidos generados en el DMQ. Esta medida no sólo facilitaría el tratamiento de los distintos tipos de residuos, sino también evitaría que estos adquieran mayor humedad, hecho que ocurre durante su estadía en las diferentes Estaciones de Transferencia y/o durante el transporte. Además de que se disminuye la cantidad de residuos que son destinados al Relleno Sanitario el Inga.
- Para tener una gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el DMQ, se recomienda a las instituciones responsables de la gestión integral de los RSU, implementar alternativas que garanticen el adecuado manejo de los mismos, las cuales deben responder a las necesidades de la población. Para su cumplimiento, estos procedimientos requieren de la creación de políticas de gestión que permitan el manejo óptimo de los residuos.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo Ministerial No. 028 Que sustituye el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria por el Libro VI de la Calidad Ambiental, Registro Oficial Edición Especial N° 270 del 13 de febrero de 2015

Alonso, C., Martínez, E., & Olías, J. (2003). *Manual para la Gestión de los Residuos Urbanos*. Madrid: Editora LA LEY.

Ambientum.com (s.f.). *Suelos y Residuos. Incineración y Tratamientos Térmicos*. Recuperado el 25 de Abril del 2015 de:
http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/incineracion_y_tratamientos_termicos.asp

Ayala, Inés (2013). *Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos del DMQ*. UISEK, Quito - Ecuador

Berent, M., Vedoya, R., Daniel, E. (2005). *Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos un Ciudades Intermedias del NEA, Orígenes, Tipos y Composición de Residuos*. Recuperado el 27 de Abril del 2015 de <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2005/7-Tecnologia/T-029.pdf>

Calvachi, V. & Navarro, N. (2013). *Evaluación Ambiental de la Incineración de los Residuos Sólidos Biodegradables de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Universidad Politécnica Nacional del Ecuador.

Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Ediciones Díaz Santos.

Castillo, M. J. (2012). *Determinación de la Composición y Densidad de los Residuos Sólidos Urbanos del Distrito Metropolitano de Quito con fines de aprovechamiento energético y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero*. Quito: Universidad Internacional SEK.

CEMPRE. (1998). *Manual de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos*. Uruguay

Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización, Registro Oficial N° 303 del 19 de Octubre del 2010

Convenio de Basilea, Ratificado: 7 de junio de 2004

Diario Ecología. (s.f.). *La basura se ha convertido en la energía de Suecia*. Recuperado el 26 de Abril del 2015 de: <http://diarioecologia.com/la-basura-se-ha-convertido-en-la-energia-de-suecia/>

EMASEO (2010). Plan de Servicios de Aseo y Administración Zonal Eloy Alfaro. Quito, Ecuador.

EMASEO EP. (2014). *Recolección domiciliaria: EMASEO, Empresa Pública Metropolitana de Aseo*. Recuperado el 6 de Diciembre de 2014, de sitio web de EMASEO EP: <http://www.emaseo.gob.ec/>

EMGIRS – EP. (2014). *La Empresa. Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos EMGIRS-EP*. Recuperado el 28 de Abril del 2015 de <http://www.emgirs.gob.ec/index.php/quienes-somos/la-empresa>

EMGIRS EP. (2014). *Transferencia y transporte de residuos sólido urbanos*. EMGIRS EP, Empresa Pública Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos. Recuperado el 10 de Diciembre de 2014, de sitio web de EMGIRS EP: <http://emgirs.gob.ec>

EMGIRS EP. (s.f.). *Estación de Transferencia Norte*. Recuperado el 21 de Abril del 2015 de: <http://emgirs.gob.ec/index.php/operaciones/estacion-de-transferencia-norte>

EMGIRS EP. (s.f.). *Estación de Transferencia Sur*. Recuperado el 21 de Abril del 2015 de: <http://emgirs.gob.ec/index.php/operaciones/estacion-de-transferencia-sur>

EMGIRS EP. (s.f.). *Relleno Sanitario del Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado el 21 de Abril del 2015 de: <http://emgirs.gob.ec/index.php/operaciones/relleno-sanitario>

García, H. y Toro, Z. (2000). *Fundamentos del manejo de los residuos urbanos*. Colección sénior 24. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España. 756 pp.

Grau, A. & Farré, F. (2011). *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*. IADE: Madrid.

Guía de Valorización Económica de Residuos, (2010). Madrid. Recuperado el 25 de Abril del 2015 de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf>

La Constitución de la República del Ecuador, Registro Oficial N° 1 del 11 de Agosto de 1998

Laboratorio de Suelos y Agua de Sáenz Peña (2005). *Procedimiento de Técnicas para Análisis Químico de Suelos*. Argentina, Chaco: Estación Experimental Agropecuaria.

Ley de Gestión Ambiental, Codificación 19, Registro Oficial Suplemento 418 de 10 de Septiembre del 2004.

Ley de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, Decreto Supremo No. 374. RO/ 97 de 31 de Mayo de 1976.

Ley Española 10/1998 de Residuos, de 21 de Abril. JUAN CARLOS REY DE ESPAÑA.

Ley Orgánica de la Salud, Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006.

MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transporte) (1992). Atlas Nacional de España. Edafología. Sección II. Grupo 7. Ed. Centro Nacional de Información Geográfica. Madrid.

Murray, R. (1997). Estadística. México: Editorial McGraw-Hill.

OCDE. (s.f.). Definición de Residuo. *Organización de Cooperación y Desarrollo Económico Unidad 11*. Capítulo 4. Recuperado el 11 de diciembre del 2014 de: http://aulacidta3.usal.es/Calidad/modulos/curso/uni_11/u11c4s1.htm

Ordenanza Metropolitana No. 332. Ordenanza de Gestión Integral de Residuos Sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito

Parr Instrument Company. (s.f). *Operating Instuction Manual. Oxygen Bomb Calorimeter No. 204M*. Illinois: Parr.

Perinat, A., Cólás, C., Alabern, X. (2003). *Instalaciones de gas domésticas y comerciales*. Editorial UOC. Barcelona.

Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Título IV, TULSMA, Ejecutivo 3516, 31 de marzo del 2003

Resolución No. 002 - SA.- 2014

Ribadeneira, Joe. (2014). *Cuantificación del poder calórico superior e inferior de los residuos sólidos urbanos del Distrito Metropolitano de Quito*. Año 2013-2014. UISEK, Quito - Ecuador

Romero, A. (2010). LA INCINERADORA DE RESIDUOS: ¿ESTÁ JUSTIFICADO EL RECHAZO SOCIAL?. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. (104) 0 1, pp 175-187. Madrid.

Sakurai K. (2010). *Guía HDT 17: Método sencillo del análisis de residuos sólidos*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Recuperado el 20 de Diciembre del 2014 de: <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt017.html>

Sanz, D. (2012). *Suecia compra basura para generar energía*. Recuperado el 20 de abril del 2015 de: <http://www.ecologiaverde.com/suecia-compra-basura-para-generar-energia/>

Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente, Decreto Ejecutivo 3516, 31 de marzo del 2003

URBASER. (2014). *Estaciones de transferencia. Definición*. España. Recuperado 12 de Diciembre del 2014 de: <http://www.urbaser.es/seccion-19/Estaciones-de-Transferencia>

Valderrama, Andrés. (2006). *Estudio del potencial energético a partir de los sólidos en algunos distritos del cono norte de Lima Metropolitana*. (Tesis). UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS. Lima, Perú.

Vida para Quito. (2008). *Manejo de Residuos Sólidos*. Recuperado el 20 de abril del 2015 de: http://viniciovasquez.com/vida/index.php?option=com_content&task=view&id=59&Itemid=50

Webster A. (1998). *Estadística aplicada a los Negocios y Economía (3ra Ed.)*. Bogotá: McGraw-Hill.

ANEXO A

REGISTRO DE TEMPERATURA, DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO DEL RESIDUO PAPEL

Zámbiza

[Anexo A-1](#)

[Anexo A-2](#)

[Anexo A-3](#)

[Anexo A-4](#)

[Anexo A-5](#)

[Anexo A-6](#)

[Anexo A-7](#)

[Anexo A-8](#)

[Anexo A-9](#)

[Anexo A-10](#)

[Anexo A-11](#)

[Anexo A-12](#)

Santa Rosa

[Anexo A-13](#)

[Anexo A-14](#)

[Anexo A-15](#)

[Anexo A-16](#)

[Anexo A-17](#)

[Anexo A-18](#)

[Anexo A-19](#)

[Anexo A-20](#)

[Anexo A-21](#)

[Anexo A-22](#)

[Anexo A-23](#)

[Anexo A-24](#)

ANEXO B

REGISTRO DE TEMPERATURA, DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO DEL RESIDUO CARTÓN

Zámbiza

[Anexo B-1](#)

[Anexo B-2](#)

[Anexo B-3](#)

[Anexo B-4](#)

[Anexo B-5](#)

[Anexo B-6](#)

[Anexo B-7](#)

[Anexo B-8](#)

[Anexo B-9](#)

[Anexo B-10](#)

[Anexo B-11](#)

[Anexo B-12](#)

Santa Rosa

[Anexo B-13](#)

[Anexo B-14](#)

[Anexo B-15](#)

[Anexo B-16](#)

[Anexo B-17](#)

[Anexo B-18](#)

[Anexo B-19](#)

[Anexo B-20](#)

[Anexo B-21](#)

[Anexo B-22](#)

[Anexo B-23](#)

[Anexo B-24](#)

ANEXO C

REGISTRO DE TEMPERATURA, DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO DEL RESIDUO MADERA

Zámbiza

[Anexo C-1](#)

[Anexo C-2](#)

[Anexo C-3](#)

[Anexo C-4](#)

[Anexo C-5](#)

[Anexo C-6](#)

[Anexo C-7](#)

[Anexo C-8](#)

[Anexo C-9](#)

[Anexo C-10](#)

[Anexo C-11](#)

[Anexo C-12](#)

Santa Rosa

[Anexo C-13](#)

[Anexo C-14](#)

[Anexo C-15](#)

[Anexo C-16](#)

[Anexo C-17](#)

[Anexo C-18](#)

[Anexo C-19](#)

[Anexo C-20](#)

[Anexo C-21](#)

[Anexo C-22](#)

[Anexo C-23](#)

[Anexo C-24](#)

ANEXO D

REGISTRO DE TEMPERATURA, DETERMINACIÓN DE HUMEDAD Y PODER CALÓRICO DEL RESIDUO MATERIA ORGÁNICA

Zámbiza

[Anexo D-1](#)

[Anexo D-2](#)

[Anexo D-3](#)

[Anexo D-4](#)

[Anexo D-5](#)

[Anexo D-6](#)

[Anexo D-7](#)

[Anexo D-8](#)

[Anexo D-9](#)

[Anexo D-10](#)

[Anexo D-11](#)

[Anexo D-12](#)

Santa Rosa

[Anexo D-13](#)

[Anexo D-14](#)

[Anexo D-15](#)

[Anexo D-16](#)

[Anexo D-17](#)

[Anexo D-18](#)

[Anexo D-19](#)

[Anexo D-20](#)

[Anexo D-21](#)

[Anexo D-22](#)

[Anexo D-23](#)

[Anexo D-24](#)

ANEXO E

REGISTRO FOTOGRÁFICO



**Equipo de Protección
Personal**



Método del cuarteo

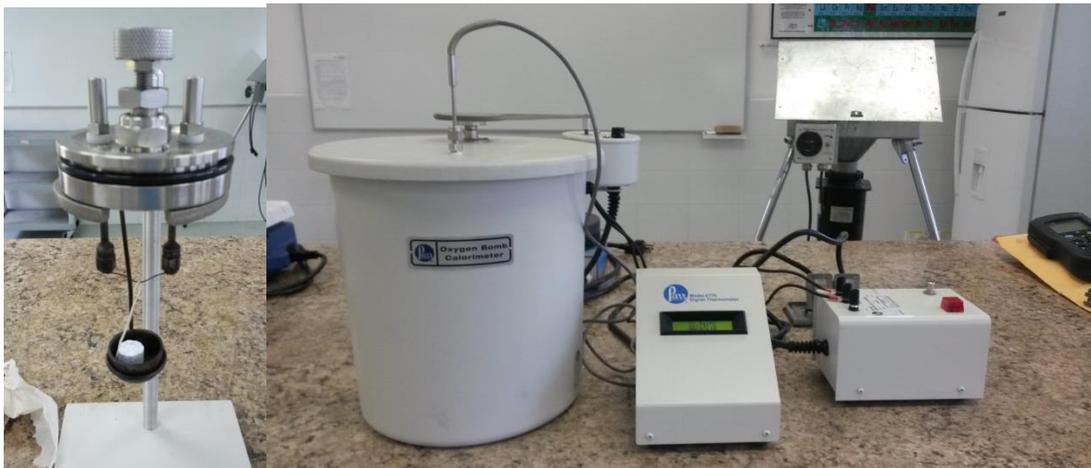
Fuente: Lorena Mafla, 2015.



Trituración y secado de RSU para determinar el % de Humedad
Fuente: Lorena Mafla, 2015.



Compresión de las muestras
Fuente: Lorena Mafla, 2015.



Preparación de muestra para su combustión
Fuente: Lorena Mafla, 2015.



Titulación
Fuente: Lorena Mafla, 2015.



Filtración de BaCl_2 y secado del filtrado
Fuente: Lorena Mafla, 2015.