

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y  
AGROINDUSTRIA**

**SEPARACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS PARTICULADOS POR  
DIFERENCIA DE DENSIDADES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA  
QUÍMICA**

**DANIELA CECILIA ARÉVALO GONZÁLEZ**

**daniela.arevalo.gonzalez@gmail.com**

**DIRECTOR: ING. FRANCISCO QUIROZ**

**francisco.quiroz@epn.edu.ec**

**Quito, junio 2012**

© Escuela Politécnica Nacional 2012  
Reservados todos los derechos de reproducción

## **DECLARACIÓN**

Yo, Daniela Cecilia Arévalo González, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Daniela Cecilia Arévalo González

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Daniela Cecilia Arévalo González, bajo mi supervisión.

---

Ing. Francisco Quiroz  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xvi</b>
<b>1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>1</b>
1.1 Consumo de materiales plásticos en el Ecuador	1
1.1.1 Consumo de materia prima	1
1.1.2 Reciclaje de plásticos en el Ecuador	4
1.2 Fuentes de reciclaje de plásticos en el distrito metropolitano de Quito (DMQ)	5
1.2.1 Introducción	5
1.2.2 Generación de residuos sólidos urbanos y materiales reciclables en el DMQ	5
1.2.2.1 Indicadores de generación y recolección de residuos en el DMQ	5
1.2.2.2 Entidades para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)	6
1.2.2.3 Reciclaje en las estaciones de transferencia y transporte de residuos sólidos	8
1.2.2.4 Reciclaje de plástico en el DMQ	10
1.3 Procesos de reciclaje de plásticos	12
1.3.1 Reciclado mecánico	13
1.3.2 Reciclado químico	18
1.3.3 Reciclado térmico o valoración energética	18
1.4 Procesos de separación de plásticos	19
1.4.1 Importancia de la separación de plásticos	19
1.4.2 Técnicas de separación de plásticos	20
1.4.3 Separación por diferencia de densidades	23
1.4.3.1 Generalidades	23
1.4.3.2 Medios densos	23
1.4.3.3 Aplicación	25
<b>2 PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>26</b>
2.1 Materiales	26
2.1.1 Plásticos vírgenes	26
2.1.2 Plásticos reciclados	32
2.1.3 Medios densos	34
2.1.3.1 Agua potable	35
2.1.3.2 Solución de cloruro de sodio	35

2.2	Evaluación del comportamiento de mezclas de material virgen	36
2.2.1	Introducción	36
2.2.2	Determinación de las densidades de los medios densos	37
2.2.2.1	Determinación de la densidad del agua potable a 20°C	37
2.2.2.2	Determinación de la densidad de la solución de cloruro de sodio	40
2.2.3	Caracterización de los plásticos vírgenes	42
2.2.3.1	Determinación de las densidades de los plásticos vírgenes	42
2.2.3.2	Espectroscopía infrarroja	46
2.2.3.3	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	48
2.2.3.4	Contenido de cenizas	49
2.2.4	Separación de los plásticos vírgenes	51
2.2.4.1	Comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable	52
2.2.4.2	Comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	53
2.2.4.3	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable	54
2.2.4.4	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	57
2.3	Muestreo y caracterización de residuos plásticos factibles de reciclar	58
2.3.1	Introducción	58
2.3.2	Muestreo de residuos plásticos factibles de reciclar	58
2.3.2.1	Recolección (acopio)	58
2.3.2.2	Limpieza	60
2.3.2.3	Secado	61
2.3.2.4	Corte	61
2.3.2.5	Reducción y selección de tamaño	61
2.3.3	Caracterización de los plásticos reciclados	64
2.4	Evaluación de mezclas de residuos plásticos	64
2.4.1	Comportamiento de cada plástico reciclado: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable	64
2.4.2	Comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	65
2.4.3	Separación de la mezcla de plásticos reciclados: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable	65
2.4.4	Separación de la mezcla de plásticos reciclados: PC, PET y PVC con solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	65
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>66</b>
3.1	Evaluación del comportamiento de mezclas de material virgen	66

3.1.1	Determinación de las densidades de los medios densos	66
3.1.1.1	Determinación de la densidad del agua potable a 20°C	66
3.1.1.2	Determinación de la densidad de la solución de cloruro de sodio	66
3.1.2	Caracterización de los plásticos vírgenes	68
3.1.2.1	Determinación de las densidades de los plásticos vírgenes	68
3.1.2.2	Espectroscopia infrarroja (IR)	69
3.1.2.3	Calorimetría diferencial de barrido	75
3.1.2.4	Contenido de cenizas	78
3.1.3	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC	79
3.1.3.1	Comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable	79
3.1.3.2	Comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	82
3.1.3.3	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable	83
3.1.3.4	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	86
3.2	Muestreo y caracterización de residuos plásticos factibles de reciclar	89
3.2.1	Determinación de las densidades de los plásticos reciclados	89
3.2.2	Espectroscopía infrarroja (IR)	91
3.2.3	Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	98
3.2.4	Contenido de cenizas	101
3.3	Evaluación de mezclas de residuos plásticos	102
3.3.1	Comportamiento de cada plástico reciclado: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable	102
3.3.2	Comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	104
3.3.3	Separación de la mezcla de plásticos reciclados: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable	106
3.3.3.1	Tamaño de partícula -4,75+3,32 mm	106
3.3.3.2	Tamaño de partícula -3,32+2,36 mm	111
3.3.4	Separación de la mezcla de plásticos reciclados: PC, PET y PVC reciclados con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	114
3.3.4.1	Tamaño de partícula -4,75+3,32 mm	114
3.3.4.2	Tamaño de partícula -3,32 + 2,36 mm	115
3.3.5	Separación de los plásticos: PC y PVC con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	117
<b>4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>119</b>

4.1	Conclusiones	119
4.2	Recomendaciones	120
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>126</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
<b>Tabla 1.1</b>	Importaciones de las principales materias primas de enero a junio 2010 vs 2011	1
<b>Tabla 1.2</b>	Exportaciones de productos plásticos enero a diciembre 2009 vs 2010	3
<b>Tabla 1.3</b>	Indicadores de generación y recolección de residuos en el DMQ	6
<b>Tabla 1.4</b>	Actores relacionados con la gestión de residuos sólidos	9
<b>Tabla 1.5</b>	Empresas recicladoras de plástico	12
<b>Tabla 2.1</b>	Ficha técnica del PP virgen	27
<b>Tabla 2.2</b>	Ficha técnica del PEAD virgen	28
<b>Tabla 2.3</b>	Ficha técnica del PC virgen	29
<b>Tabla 2.4</b>	Ficha técnica del PET virgen	30
<b>Tabla 2.5</b>	Ficha técnica del PVC virgen	31
<b>Tabla 2.6</b>	Especificaciones del equipo para la determinación de la densidad del agua potable a 20 °C	38
<b>Tabla 2.7</b>	Especificaciones del equipo para determinar la densidad de la solución de cloruro de sodio	41
<b>Tabla 2.8</b>	Especificaciones del equipo para la determinación del contenido de cenizas	49
<b>Tabla 2.9</b>	Especificaciones del equipo para el comportamiento y separación de mezclas plásticas por diferencia de densidades	51
<b>Tabla 3.1</b>	Densidad del agua potable a 20°C	66
<b>Tabla 3.2</b>	Densidad de la solución de cloruro de sodio	67
<b>Tabla 3.3</b>	Densidades de los plásticos vírgenes	68
<b>Tabla 3.4</b>	Interpretación de grupos funcionales del PP virgen	70
<b>Tabla 3.5</b>	Interpretación de grupos funcionales del PEAD virgen	71
<b>Tabla 3.6</b>	Interpretación de grupos funcionales del PC virgen	73
<b>Tabla 3.7</b>	Interpretación de grupos funcionales del PET virgen	74

<b>Tabla 3.8</b>	Interpretación de grupos funcionales del PVC virgen	75
<b>Tabla 3.9</b>	Contenido de cenizas de los plásticos vírgenes	79
<b>Tabla 3.10</b>	Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable en reposo	79
<b>Tabla 3.11</b>	Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable con velocidad de agitación magnética de 417 rpm	80
<b>Tabla 3.12</b>	Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en agua potable con velocidad de agitación magnética de 750 rpm	81
<b>Tabla 3.13</b>	Resultados del comportamiento de los plásticos vírgenes: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 417 rpm	82
<b>Tabla 3.14</b>	Resultados del comportamiento de los plásticos vírgenes: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 750 rpm	82
<b>Tabla 3.15</b>	Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable en reposo y tiempo de reposo 3 minutos	84
<b>Tabla 3.16</b>	Separación del PP y PEAD del PC, PET y PVC vírgenes con agua potable, velocidad de agitación magnética 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos	85
<b>Tabla 3.17</b>	Separación del PC del PET y PVC vírgenes con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> , velocidad de agitación magnética 417 rpm y tiempo de agitación 3 minutos.	86
<b>Tabla 3.18</b>	Separación del PC del PET y PVC vírgenes con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> , velocidad de agitación magnética 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos.	87
<b>Tabla 3.19</b>	Densidades experimentales de los plásticos reciclados	90
<b>Tabla 3.20</b>	Interpretación de grupos funcionales del PP reciclado	93
<b>Tabla 3.21</b>	Interpretación de grupos funcionales del PEAD reciclado	94
<b>Tabla 3.22</b>	Interpretación de grupos funcionales del PC reciclado	95
<b>Tabla 3.23</b>	Interpretación de grupos funcionales del PET reciclado	96
<b>Tabla 3.24</b>	Interpretación de grupos funcionales del PVC reciclado	97
<b>Tabla 3.25</b>	Contenido de cenizas de plásticos reciclados	101
<b>Tabla 3.26</b>	Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable en reposo	102

<b>Tabla 3.27</b>	Resultados del comportamiento de cada plástico reciclado: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable a 417 rpm	103
<b>Tabla 3.28</b>	Resultados del comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en agua potable a 750 rpm	103
<b>Tabla 3.29</b>	Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PC, PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 417 rpm	105
<b>Tabla 3.30</b>	Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 750 rpm	105
<b>Tabla 3.31</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 4,75 + 3,32 mm) en agua potable en reposo durante 5 minutos	107
<b>Tabla 3.32</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 4,75 + 3,32 mm) en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos	108
<b>Tabla 3.33</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: -4,75+3,32 mm) en agua potable a 750 rpm durante 5 minutos	108
<b>Tabla 3.34</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: -4,75+3,32mm) en agua potable a 750 rpm durante 3 minutos	110
<b>Tabla 3.35</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable en reposo durante 5 minutos	112
<b>Tabla 3.36</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos	112
<b>Tabla 3.37</b>	Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable a 750 rpm durante 5 minutos	113
<b>Tabla 3.38</b>	Separación de los plásticos reciclados: PC del PET y PVC (tamaños de partícula - 4,75 + 3,32 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 5min	114
<b>Tabla 3.39</b>	Separación de los plásticos reciclados: PC del PET y PVC (tamaño de partícula: -3,32 + 2,36 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 5min	115
<b>Tabla 3.40</b>	Separación de los plásticos reciclados: PC y PVC con solución de cloruro de sodio en agitación magnética a 750 rpm y tiempo de agitación de 3 minutos	118

## ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
<b>Figura 1.1</b>	Consumo de materias primas plásticas de enero a junio 2011 en el Ecuador	2
<b>Figura 1.2</b>	Productos plásticos exportados del Ecuador	3
<b>Figura 1.3</b>	Reciclaje de residuos a nivel nacional	4
<b>Figura 1.4</b>	Composición de los residuos sólidos urbanos en el DMQ	7
<b>Figura 1.5</b>	Marcha de separación por diferencia de densidad de los diferentes componentes de la fracción de residuo mixto	25
<b>Figura 2.1</b>	Polipropileno (PP) virgen	27
<b>Figura 2.2</b>	Polietileno de alta densidad (PEAD) virgen	28
<b>Figura 2.3</b>	Policarbonato (PC) virgen	29
<b>Figura 2.4</b>	Politereftalato de etileno (PET) virgen	30
<b>Figura 2.5</b>	Policloruro de vinilo (PVC) virgen	31
<b>Figura 2.6</b>	Recolección de residuos de PEAD	32
<b>Figura 2.7</b>	Recolección de residuos de PET	33
<b>Figura 2.8</b>	Recolección de residuos de PVC	34
<b>Figura 2.9</b>	Esquema de separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC	37
<b>Figura 2.10</b>	Accesorios de la balanza AA-200 para determinar la densidad del agua potable	38
<b>Figura 2.11</b>	Equipo para determinar la densidad del agua potable	40
<b>Figura 2.12</b>	Esquema para determinar la densidad de la solución de cloruro de sodio	41
<b>Figura 2.13</b>	Medición de la densidad de la solución de cloruro de sodio	42
<b>Figura 2.14</b>	Equipo para la determinación de las densidades de los plásticos flotantes	43
<b>Figura 2.15</b>	Equipo para la determinación de las densidades de los plásticos sedimentados	43

<b>Figura 2.16</b>	Espectrofotómetro infrarrojo FT-IR	46
<b>Figura 2.17</b>	Prensa hidráulica	47
<b>Figura 2.18</b>	Calorímetro diferencial de barrido (DSC)	48
<b>Figura 2.19</b>	Montaje para la incineración de los materiales plásticos	50
<b>Figura 2.20</b>	(a) agitación a 750 rpm (b) separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable	55
<b>Figura 2.21</b>	Recolección de los productos flotado y sedimentado	56
<b>Figura 2.22</b>	Clasificación manual de los plásticos vírgenes	56
<b>Figura 2.23</b>	(a) agitación a 750 rpm (b) separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm <sup>3</sup>	57
<b>Figura 2.24</b>	Operaciones previas a la separación por diferencia de densidades	59
<b>Figura 2.25</b>	Molino de cuchillas	62
<b>Figura 2.26</b>	(a) PEAD post-consumo (b) PEAD reciclado	62
<b>Figura 2.27</b>	PP post- industrial y PP reciclado	63
<b>Figura 2.28</b>	(a) PET post-consumo (b) PET reciclado	63
<b>Figura 2.29</b>	(a) PC post-consumo (b) PC reciclado	63
<b>Figura 2.30</b>	(a) PVC post-consumo (b) PVC reciclado	64
<b>Figura 3.1</b>	Densidad de la solución cloruro de sodio vs peso acumulado de sal	67
<b>Figura 3.2</b>	Comparación entre las densidades en fichas técnicas y obtenidas experimentalmente	69
<b>Figura 3.3</b>	Espectro del PP virgen	70
<b>Figura 3.4</b>	Espectro de PEAD virgen	71
<b>Figura 3.5</b>	Espectro del PC virgen	72
<b>Figura 3.6</b>	Espectro del PET virgen	73
<b>Figura 3.7</b>	Espectro de PVC virgen	74
<b>Figura 3.8</b>	Termograma del PP virgen	76
<b>Figura 3.9</b>	Termograma del PEAD virgen	77
<b>Figura 3.10</b>	Termograma del PC virgen	77

<b>Figura 3.11</b>	Termograma del PET virgen	78
<b>Figura 3.12</b>	Comportamiento de cada plástico virgen en agua potable, para ensayos con y sin agitación magnética	81
<b>Figura 3.13</b>	Comportamiento de cada plástico virgen en la solución de cloruro de sodio de densidad $1,197 \text{ g/cm}^3$ con agitación magnética	83
<b>Figura 3.14</b>	Separación de los plásticos vírgenes PEAD, PP del PC, PET y PVC en agua potable con y sin agitación magnética durante 3 minutos	85
<b>Figura 3.15</b>	Separación de los plásticos vírgenes PC del PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad $1,197 \text{ g/cm}^3$ con agitación magnética durante 3 minutos	88
<b>Figura 3.16</b>	Separación de los plásticos vírgenes PEAD, PP, PC, PET y PVC con medios densos diferentes, velocidad de agitación 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos	89
<b>Figura 3.17</b>	Fotografías del PET reciclado triturado	91
<b>Figura 3.18</b>	Fotografías del PET reciclado perforado	91
<b>Figura 3.19</b>	Comparación entre las densidades del PEAD, PP, PC, PET y PVC vírgenes y reciclados	92
<b>Figura 3.20</b>	Espectro PP reciclado	93
<b>Figura 3.21</b>	Espectro PEAD reciclado	94
<b>Figura 3.22</b>	Espectro de PC reciclado	95
<b>Figura 3.23</b>	Espectro de PET reciclado	96
<b>Figura 3.24</b>	Espectro de PVC reciclado	97
<b>Figura 3.25</b>	Termograma del PP reciclado	98
<b>Figura 3.26</b>	Termograma del PEAD reciclado	99
<b>Figura 3.27</b>	Termograma del PC reciclado	100
<b>Figura 3.28</b>	Termograma del PET reciclado	101
<b>Figura 3.29</b>	Porcentaje de recuperación para ensayos del comportamiento de cada plástico reciclado PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable con y sin velocidad de agitación magnética	104
<b>Figura 3.30</b>	Porcentaje de recuperación para ensayos del comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad $1,197 \text{ g/cm}^3$ con y sin velocidad de agitación magnética	106

<b>Figura 3.31</b>	Separación de los plásticos reciclados PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: $-4,75+3,32$ mm), en agua potable con y sin agitación magnética durante 5 minutos	109
<b>Figura 3.32</b>	Efecto del tiempo de agitación en la separación de plásticos reciclados (tamaño de partícula: $-4,75+3,32$ mm) en agua potable a 750 rpm	110
<b>Figura 3.33</b>	Separación de los plásticos reciclados PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: $-3,32+2,36$ mm), en agua potable con y sin agitación magnética durante 5 minutos	113
<b>Figura 3.34</b>	Separación de los plásticos reciclados (tamaño de partícula: $-4,75 + 3,32$ mm) con diferentes medios densos a la velocidad de agitación de 750 rpm y tiempo de agitación 5 minutos	116
<b>Figura 3.35</b>	Separación de los plásticos reciclados (tamaño de partícula: $-3,32 + 2,36$ mm) con diferentes medios densos a la velocidad de agitación de 750 rpm y tiempo de agitación 5 minutos	117

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b>	
Valores bibliográficos de la densidad de la solución de cloruro de sodio	127
<b>ANEXO II</b>	
Cálculo de la densidad del agua potable a 20°C	128
<b>ANEXO III</b>	
Tablas de las densidades experimentales de los plásticos vírgenes y reciclados	129
<b>ANEXO IV</b>	
Valores del criterio crítico tabulado ( <i>QTAB</i> )	141
<b>ANEXO V</b>	
Valores críticos de $t$ ( $t_c$ )	142
<b>ANEXO VI</b>	
Ejemplo de cálculo de las densidades de los plásticos	143
<b>ANEXO VII</b>	
Propiedades de los plásticos	146
<b>ANEXO VIII</b>	
Cálculo del contenido de cenizas	147
<b>ANEXO IX</b>	
Comportamiento de los plásticos	148
<b>ANEXO X</b>	
Separación del PC del PET y PVC reciclados	162

## RESUMEN

El presente trabajo es un estudio de la separación de la mezcla de plásticos reciclados y mezcla de plásticos vírgenes mediante el método de diferencia de densidades. Los plásticos seleccionados para ambos grupos de plásticos fueron el polietileno de alta densidad (PEAD), polipropileno (PP), policarbonato (PC), politereftalato de etileno (PET) y policloruro de vinilo (PVC).

Antes de realizar la separación de la mezcla de plásticos reciclados es necesario hacer el acondicionamiento de los mismos, el cual consta de una limpieza, secado y reducción de tamaño.

La reducción de tamaño se realizó en un molino de cuchillas del cual emergían tamaños diferentes por lo que fue necesaria la selección del tamaño de partícula para cada plástico seleccionado. Los tamaños seleccionados comprenden los dos rangos siguientes  $-4,75 + 3,32$  mm y  $-3,32 + 2,36$  mm debido a que en las operaciones de reducción de tamaño en las industrias arrojan tamaños de partículas comprendidos entre 2,36 y 4,75 mm. Adicionalmente, estos tamaños facilitarán la clasificación manual de cada plástico al final de cada prueba de separación por diferencia de densidad.

La separación de los plásticos mediante la diferencia de densidades se produce por la diferencia entre la densidad del medio denso y la densidad del plástico. Si la densidad del plástico es menor que la densidad del medio denso, el plástico se recuperará en la superficie del medio denso, pero si la densidad del plástico es mayor que la densidad del medio denso, el plástico se recuperará en el fondo del recipiente.

Para la separación de los plásticos vírgenes de acuerdo a los resultados obtenidos a escala laboratorio las condiciones óptimas para obtener una separación eficaz de las poliolefinas (PEAD y PP) de los plásticos PC, PET y PVC

son con el uso del medio denso agua potable cuya densidad determinada es de  $0,9999 \text{ g/cm}^3$  y velocidad de agitación magnética de 750 rpm.

Para la separación eficaz del PC del PET y PVC las condiciones óptimas son con el uso del medio denso la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  y con velocidad de agitación de 750 rpm.

Para los plásticos reciclados de acuerdo a los resultados a escala laboratorio: para obtener una separación eficaz de las poliolefinas (PEAD y PP) de los plásticos PC, PET y PVC son con el uso del medio denso agua potable cuya densidad determinada es de  $0,9999 \text{ g/cm}^3$ , tamaño de partícula de los plásticos comprendido entre  $-4,75+3,32 \text{ mm}$  y velocidad de agitación de 750 rpm. Para la separación eficaz del PC del PET y PVC las condiciones óptimas son con el uso del medio denso solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , tamaño de partícula entre  $-4,75+3,32 \text{ mm}$  y velocidad de agitación de 750 rpm.

Para la separación de la mezcla de plásticos vírgenes (PEAD, PP, PC, PET y PVC) en agua potable las recuperaciones de cada plástico en el producto flotado fueron: 100 % de PP, 100 % de PEAD, 0% de PC, 0% de PET y 0% de PVC. Para la separación de la mezcla de plásticos vírgenes (PC, PET y PVC) en la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  las recuperaciones de cada plástico en el producto flotado son: 100 % de PC, 0 % de PET y 0 % de PVC.

Para la separación de la mezcla de plásticos reciclados (PEAD, PP, PC, PET y PVC) en agua potable las recuperaciones de cada plástico en el producto flotado fueron: 99,59 % de PP, 98,82 % de PEAD, 0,00% de PC, 0,00 % de PET y 0,00 % de PVC. Para la separación de la mezcla de plásticos reciclados (PC, PET y PVC) en la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  las recuperaciones de cada plástico en el producto flotado son: 98,62 % de PC, 5,17 % de PET y 0,13 % de PVC.

La diferencia entre las recuperaciones de la separación de plásticos vírgenes y plásticos reciclados se debe a la diferencia entre la densidad de cada tipo de

plástico virgen y reciclado, muy evidente para el PET ya que la densidad del PET reciclado es muy diferente a la densidad del PET virgen, que es afectada por la forma y tamaño de partícula que sale del molino de cuchillas.

Las diferencias entre las densidades de plásticos vírgenes y reciclados se deben a la diferencia del grado de empaquetamiento que posee el plástico virgen y plástico reciclado que puede ser valorado por la diferencia entre las temperaturas de fusión y/o temperaturas de transición vítrea. Otra causa es el contenido de cargas inorgánicas que disminuyen la densidad del plástico. La caracterización por espectroscopía infrarroja del PEAD reciclado y virgen reveló que ambos PEAD no tenían aditivos y no sufrían degradación de igual modo ocurre con el PP, PC y PET. Para el PVC tanto virgen como reciclado contenían plastificantes. Por lo tanto la información estructural no influye en la diferencia de densidades.

## INTRODUCCIÓN

El consumo mundial por año de materiales plásticos incrementó de 1,5 millones de toneladas en 1950 a casi 250 millones de toneladas en el 2010. Con respecto al consumo de los distintos tipos de plásticos, las poliolefinas dominan más de la mitad del consumo total. Los diferentes tipos de polietilenos en el mundo representan el 32 %, el polipropileno el 20%, seguido por el PET con el 8%, el policloruro de vinilo con el 13 %, el poliestireno con el 7%, los copolímeros de estireno (ABS, SAN, ASA) son termofijos con 10%, y los plásticos de ingeniería y de especialidad con el 6 % (Castro, 2011).

El plástico tiene su desarrollo más dinámico en el sector del envase, los principales usuarios de envases plásticos lo constituyen las industrias de alimentos y bebidas. Otro mercado nuevo y creciente es el del envase para productos farmacéuticos y médicos, no obstante la categoría que más crece es el de los envases flexibles, donde domina el polietileno y el polipropileno. Pocos materiales pueden alcanzar la flexibilidad y economía que ofrecen estos dos plásticos por lo que son los más utilizados en este sector desde su desarrollo ya sea como películas o botellas a partir de los años 60 (Castro, 2011).

Las preocupaciones por la vertiginosa demanda de los materiales plásticos son: el incremento en los costos de las materias primas. Los efectos en la capacidad de producción por las recientes legislaciones ambientales relativas a la contaminación del ambiente o a la aparición de impuestos especiales y el inadecuado manejo de los residuos plásticos que en cierta parte ocasionan el aumento de los residuos sólidos urbanos que sobresaturan los espacios limitados de los rellenos sanitarios. Los residuos plásticos no sufren una degradación rápida debido a la acción del tiempo o a los microorganismos por lo cual componen una contaminación visual (téngase en cuenta su reducida densidad y vivos colores).

El reciclaje es una de las alternativas para la solución a estos problemas. El método más ampliamente utilizado para el reciclaje a partir de material post-consumo y el post-industrial es el reciclaje mecánico que permite obtener nuevos productos con la granza reciclada. En el reciclaje mecánico es importante realizar una selección y/o clasificación de los distintos tipos de plásticos que conforman la mezcla de residuos plásticos, ya que algunos tipos de plásticos no presentan la misma estabilidad térmica para que se puedan obtener productos reciclados homogéneos, con propiedades mecánicas adecuadas y sin degradación.

A escala comercial se utilizan los sistemas de separación que incluyen la separación por triboelectrificación y flotación. En el Ecuador no existe una industria que utilice una de las técnicas de separación antes mencionadas, en lugar de ello se realiza la clasificación manual de los residuos plásticos en los botaderos de basura mediante la identificación del código de reciclaje. Por lo que resulta de interés desarrollar un método de separación de plásticos post-consumo, por esta razón el presente trabajo estudia la técnica de separación por diferencia de densidades en el cual se analizan las condiciones de operación y densidades de los medios densos.

La separación por densidad, es un proceso de separación común para variedad de materiales, es práctico, sencillo y económico porque no necesita la reposición de los medios densos, que en este proyecto son el agua potable y la solución de cloruro de sodio que no reaccionan con los plásticos y pueden ser reutilizados nuevamente. Antes de realizar la separación por diferencia de densidad se tiene como requisito acondicionar la mezcla plástica post-consumo.

La separación del plástico deseado de la mezcla de plásticos se consigue con la ayuda de la densidad apropiada del medio denso que proporciona la flotabilidad de los plásticos con menor densidad a la superficie del recipiente y la sedimentación de los plásticos con mayor densidad que la del medio denso al fondo del recipiente. La separación por densidad no sólo se controla por las diferentes densidades de los plásticos, sino también por su forma y tamaño.

# 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 CONSUMO DE MATERIALES PLÁSTICOS EN EL ECUADOR

### 1.1.1 CONSUMO DE MATERIA PRIMA

En el Ecuador, existe un consumo per cápita de plásticos de 18,34 kg/habitante\*año (ASEPLAS, 2011). Si se considera la población total del Ecuador en el 2010 de 14 306 876 habitantes (INEC, 2010). El consumo total de plástico sería de 262 388,11 toneladas.

En el Ecuador las fábricas de plástico utilizan dos fuentes de materiales para sus procesos de producción: materia virgen o nueva y materia reciclada.

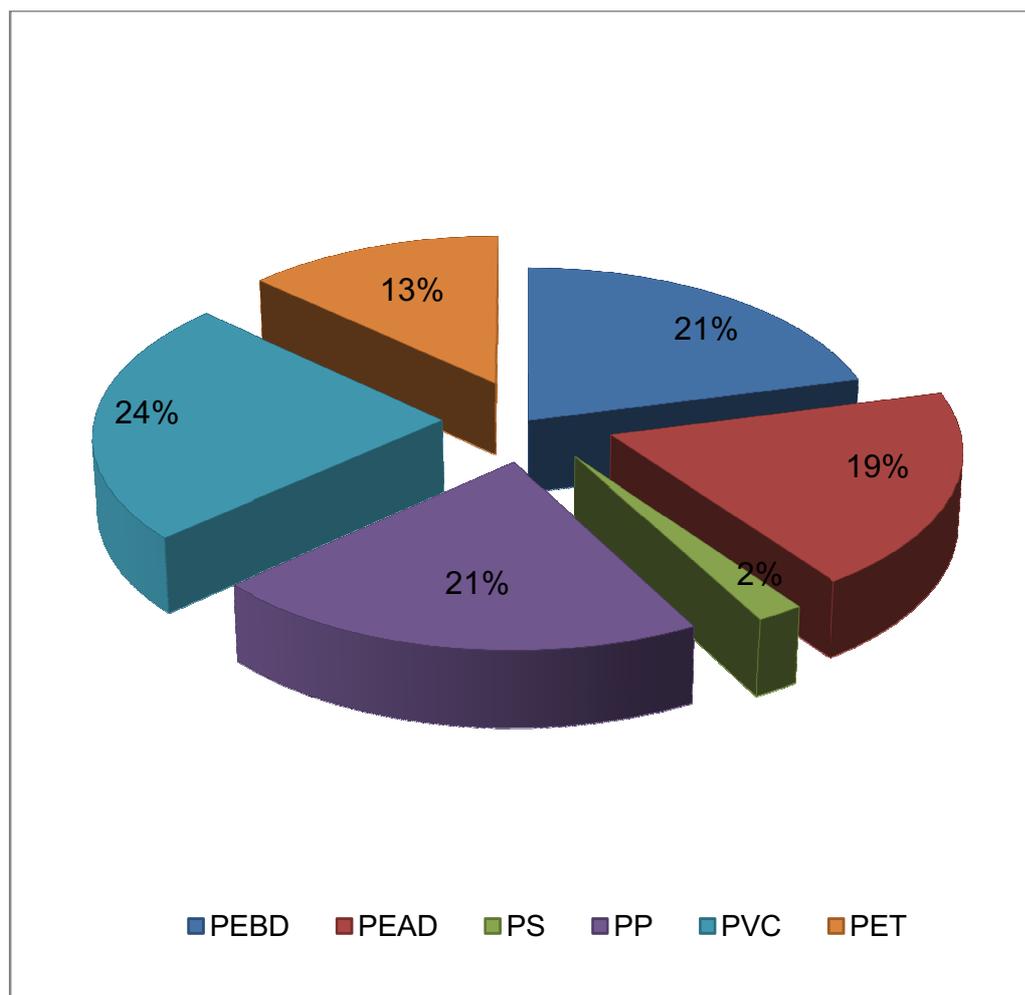
En el país se adquiere la materia prima importándola debido a no tener una industria petroquímica para su producción. En el 2010 fueron de 151 853 toneladas, mientras que en el 2011 se registró un total de 173 586 toneladas, como lo muestran los datos presentados en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Importaciones de las principales materias primas de enero a junio 2010 vs 2011

Materia prima	Peso neto (toneladas)	
	2010	2011
<b>Polietileno de baja densidad (PEBD)</b>	34 886	36 317
<b>Polietileno de alta densidad (PEAD)</b>	28 818	33 439
<b>Poliestireno (PS)</b>	4 493	3 452
<b>Polipropileno (PP)</b>	33 277	36 595
<b>Policloruro de vinilo (PVC)</b>	28 630	41 121
<b>Politereftalato de etileno (PET)</b>	21 749	22 662
<b>TOTAL</b>	151 853	173 586

(ASEPLAS, 2011)

Según las estadísticas de la ASEPLAS, en el Ecuador para el año 2011 hasta el mes de junio, el consumo de las materias primas plásticas para la elaboración de empaques y envases fueron de: 24 % de PVC, 21 % de PEBD, 21 % de PP, 19 % de PEAD, 13 % de PET y 2 % de PS tal como se indica en la Figura 1.1.



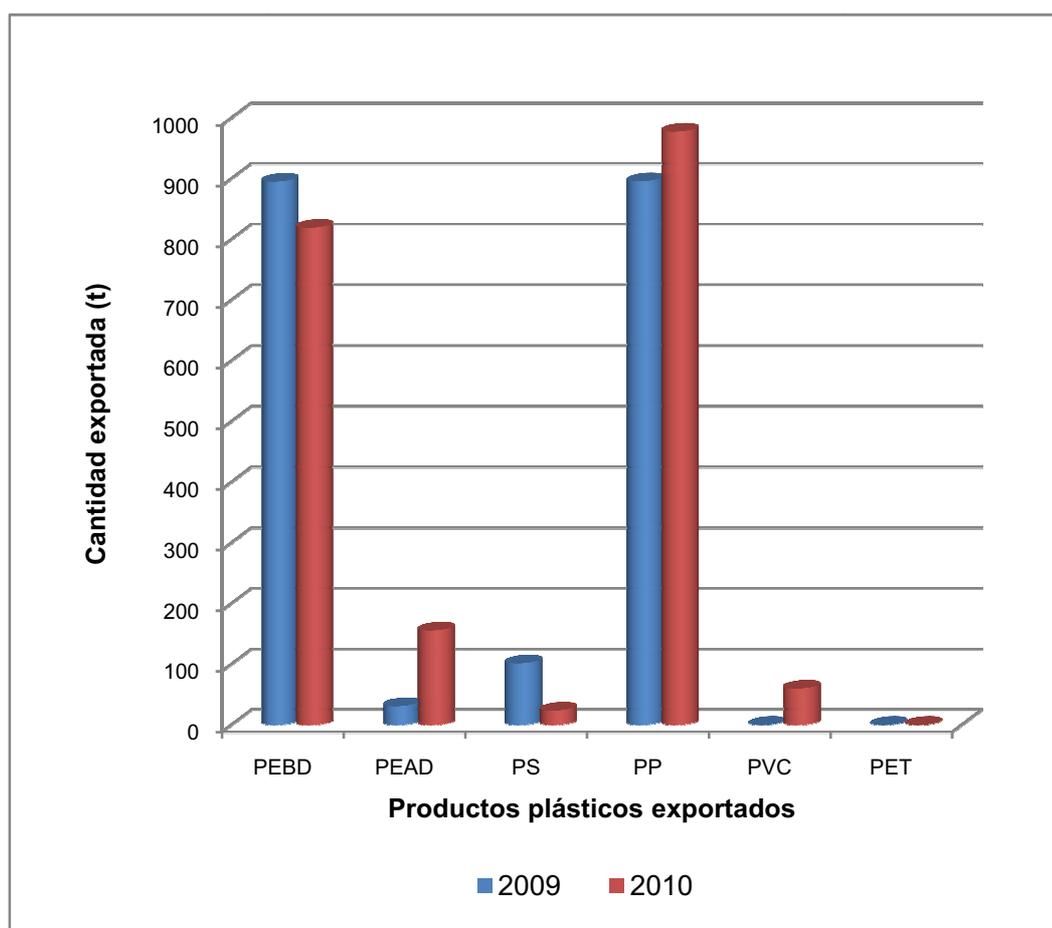
**Figura 1.1** Consumo de materias primas plásticas de enero a junio 2011 en el Ecuador (ASEPLAS, 2011)

En la Tabla 1.2 y Figura 1.2 se observan los principales productos plásticos exportados. Para los plásticos PEBD y PP se tienen mayores cantidades de exportación. En el año 2010 la cantidad de PEBD bajo el 8,50 % de la cantidad exportada en el 2009, y para el PP subió 9,13 % de la cantidad exportada en el 2009.

**Tabla 1.2** Exportaciones de productos plásticos enero a diciembre 2009 vs 2010

Productos plásticos	Peso neto (toneladas)	
	2009	2010
<b>PEBD</b>	895,28	819,16
<b>PEAD</b>	31,01	155,68
<b>PS</b>	101,51	23,53
<b>PP</b>	895,75	977,53
<b>PVC</b>	0,05	60,00
<b>PET</b>	0,00	0,00
<b>TOTAL</b>	1 923,60	2 035,90

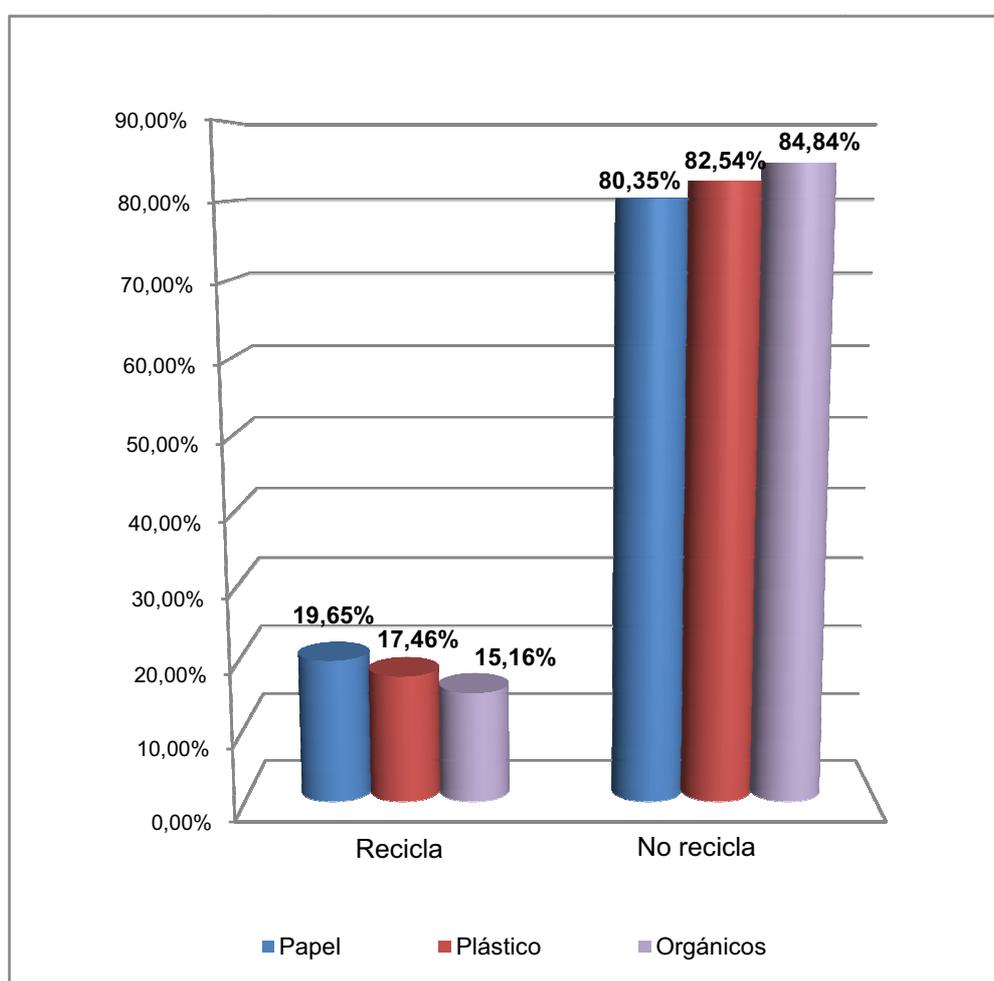
(Banco Central del Ecuador, 2010)

**Figura 1.2** Productos plásticos exportados del Ecuador  
(Banco Central del Ecuador, 2010)

### 1.1.2 RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN EL ECUADOR

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), se estima que a nivel nacional se recicla el 17,46 % del plástico que se encuentra en los residuos sólidos urbanos (RSU).

A continuación, de acuerdo con la misma fuente, se muestra el reciclaje de los principales componentes de la basura.



**Figura 1.3** Reciclaje de residuos a nivel nacional (INEC, 2010)

## **1.2 FUENTES DE RECICLAJE DE PLÁSTICOS EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO (DMQ)**

### **1.2.1 INTRODUCCIÓN**

En la ciudad de Quito, el reciclaje comenzó hace unos 40 años atrás como una actividad de sobrevivencia de personas de bajos recursos económicos; cuando notaron que en la recuperación de residuos existía una oportunidad de obtener cosas de medio uso o recuperar materiales para su venta y de esta manera generar ingresos económicos. De esta forma fueron apareciendo los llamados “minadores” o “chamberos” tanto en los botaderos cómo en las calles. Posteriormente, el adelanto tecnológico industrial y el costo elevado de la materia prima virgen, hizo que parte de esta fuera reemplazada por los materiales que podían ser recuperados, y que mediante un determinado proceso (reciclaje) pasaban a formar parte de la cadena productiva para la elaboración de nuevos productos.

### **1.2.2 GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y MATERIALES RECICLABLES EN EL DMQ**

#### **1.2.2.1 Indicadores de generación y recolección de residuos en el DMQ**

En el DMQ, existen 33 parroquias urbanas y 32 parroquias suburbanas, con una población total de 1 842 201 habitantes (De la Torre, 2008).

La generación de RSU es uno de los elementos que afectan al medio ambiente si no se manejan de forma adecuada, y está determinada fundamentalmente por la población urbana.

En términos generales, la producción per cápita promedio de basura en el DMQ es de 0,75 kg / (habitante \*día). Se calcula que se generan 1 511 toneladas diarias de basura y que se recogen aproximadamente 1 300 toneladas diarias, lo

cual da una cobertura del servicio del 86%. El servicio de recolección de residuos en el DMQ está a cargo de una empresa privada y de EMASEO como gestión directa. También se prestan servicios de recolección y tratamiento de residuos hospitalarios y a industrias de forma independiente (De la Torre, 2008), estos datos se muestran en la Tabla 1.3 para el año 2001 y el año 2007.

**Tabla 1.3** Indicadores de generación y recolección de residuos en el DMQ

<b>Indicadores de Producción</b>	<b>Unidades</b>	<b>2001</b>	<b>2007</b>
Población atendida	habitantes	1 523 205	2 003 022
Producción per cápita	kg/(habitante*día)	0,793	0,833
Generación	toneladas/día	1 552	1 802
Recolección	toneladas/día	1 208	1 677
Cobertura de recolección	%	84	89

[De la Torre, 2008; EMASEO, 2009]

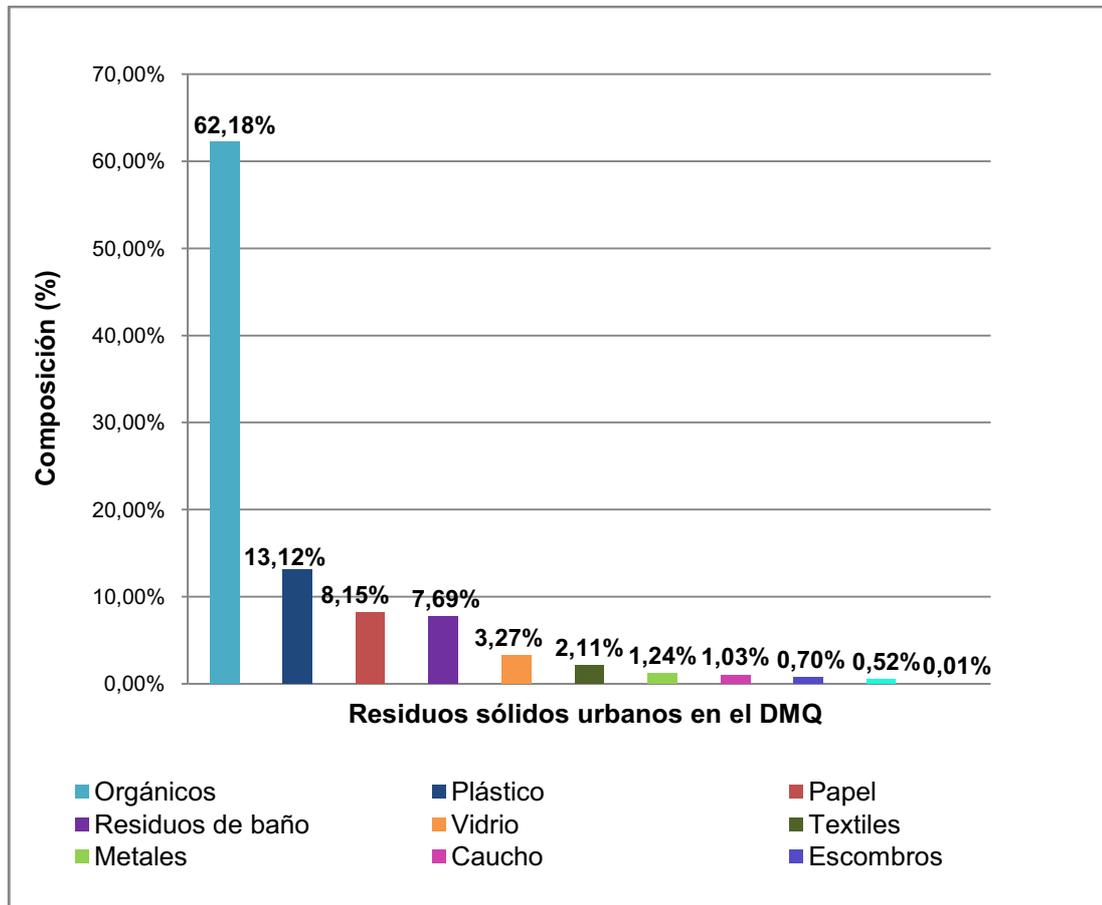
En la Figura 1.4 se muestra la composición en porcentaje de los residuos sólidos que se generan en el DMQ, en la cual se observa que la gran mayoría son residuos provenientes de material orgánico que corresponden el 62,18 %, los cuales son reciclados mediante un proceso de compostaje dentro de un nuevo modelo de gestión de residuos.

Los residuos reciclables comprenden el 25,78 %, el orden decreciente de generación es la siguiente: 13,12 % plástico, 8,15 % papel, 3,27 % vidrio y 1,24 % metales. Mientras que el 12,04 % son residuos no reciclables los cuales constituyen: el 7,69 % residuos de baño, 2,11 % textiles, 1,03 % caucho, 0,70 % escombros, 0,52 % madera y 0,01 % residuos de oficina.

### **1.2.2.2 Entidades para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU)**

“En lo que respecta al tema de RSU, la Dirección Metropolitana Ambiental (DMA) participa como entidad directora en el manejo de los residuos sólidos generados

en el DMQ, realizando el control ambiental de todas las etapas presentes en la gestión de un residuo, con el fin de que éste sea tratado de forma coherente con el ambiente” (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2009).



**Figura 1.4** Composición de los residuos sólidos urbanos en el DMQ (EMASEO, 2009)

Las leyes que regulan a las entidades encargadas del manejo de los RSU hasta su disposición final son:

- Ley de Gestión Ambiental
- Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria
- Ordenanza N° 213 del DMQ

La GIRSU contiene 4 programas macro para una eficaz y eficiente gestión de RSU, con el propósito de cumplir con los aspectos ambientales para que no se ocasionen alteraciones negativas al ambiente, los cuales son:

- Gestión ambiental pública y participación social
- Sistema de información de la gestión de RSU
- Reducción de la generación de RSU
- Gestión adecuada de los RSU

Estos programas se ejecutan por medio de 13 proyectos, cuyos responsables son entidades públicas y privadas que realizan actividades relacionadas con la gestión de RSU en el DMQ. En la Tabla 1.4 se mencionan las entidades responsables del manejo de RSU y la etapa en la que operan (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2009).

### **1.2.2.3 Reciclaje en las estaciones de transferencia y transporte de residuos sólidos**

En la actualidad existen dos estaciones de transferencia y transporte: la Estación de Transferencia ET 1 en el sur y la Estación de Transferencia de Porotohuaico ET 2; donde se depositan los residuos sólidos provenientes del DMQ, para luego ser transferidos al Relleno Sanitario del Inga Bajo, ubicado en la Parroquia de Pifo a 40 kilómetros al nororiente de Quito; para el caso del transporte de basura desde la ET 2, la Compañía CORPCYS (Corporación de Construcciones y Servicios S.A.) es la encargada del mismo; y desde la ET 1, EMASEO.

#### **Estación de Transferencia ET 1**

Está ubicada en la Av. Simón Bolívar, en el sector sureño de Quitumbe, fue inaugurada en junio del 2008. El Consorcio Quito Limpio transporta los residuos recogidos del sector sur y centro de Quito hasta la ET 1.

Esta estación cuenta con una moderna tecnología de transferencia directa desde el vehículo recolector al vehículo de transporte de gran capacidad para llevar los residuos hacia el relleno sanitario; por lo tanto, no existen problemas de

contaminación por presencia de vectores, malos olores y lixiviados en la estación de transferencia sur.

**Tabla 1.4** Actores relacionados con la gestión de residuos sólidos

<b>Entidades responsables del manejo de residuos</b>	<b>Etapas en la que operan</b>
Dirección Metropolitana del Medio Ambiente (DMMA)	Entidad reguladora y normativa de la gestión ambiental en el DMQ
Generadores de residuos (establecimientos y ciudadanía en general)	Cumplimiento de la normativa ambiental vigente en relación al adecuado manejo de los residuos que generen sus actividades
Empresa Metropolitana de Aseo (EMASEO) (Operador)	Recolección y barrido del sector norte de la ciudad, incluyendo parroquias suburbanas
	Fiscalización de empresas operadoras (Quito Limpio, ERBACOLINOR y contratistas del servicio de recolección)
Quito Limpio (Operador)	Recolección y barrido del sector centro y sur de la ciudad
Corporación Vida para Quito	Financia las etapas de transferencia, transporte y disposición final de RSU
	Fiscaliza las operaciones de transferencia transporte y disposición final de RSU
NATURA INC. (Operador)	Manejo de la Estación de Transferencia ET 2 Zámbriza
	Transporte de residuos desde la estación de transferencia hasta el sitio de disposición final, actividad realizada por contratistas
	Manejo del Relleno Sanitario El Inga por medio de la empresa INTERASEO
Fundación SEMBRES (Operador)	Manejo de la estación de transferencia sur
Fundación Natura (Operador)	Manejo de desechos hospitalarios infecciosos en el DMQ
Gestores ambientales de residuos (20 Tecnificados, 233 Artesanales)	Personas naturales o jurídicas calificadas por la DMMA para gestionar o manejar residuos sólidos
EMMOP (Operador)	Manejo de escombros en el DMQ.

(De la Torre, 2008)

### **Estación de Transferencia Porotohuaico ET 2**

Localizada en el sector de Zámbriza, fue inaugurada en mayo del 2006. Los vehículos recolectores de EMASEO trasladan los residuos provenientes del sector norte, incluyendo parroquias suburbanas hasta la ET 2 (De la Torre, 2009).

La estación posee un galpón con capacidad promedio de 800 toneladas diarias, con áreas de servicio, administración, pesaje y fiscalización. Hasta mediados de julio del 2008 la estación recibía y transfería 1 525 toneladas diarias que generaba el DMQ, debido al cierre de operaciones de la estación de transferencia ubicada en el sur.

Se realiza la clasificación manual de los residuos reciclables (papel, cartón, plástico, chatarra, vidrio, etc.) con la participación de los minadores de la Asociación Artesanal Vida Nueva que constan de 225 personas. Las pacas de basura se venden en \$4,50 cada una a la empresa recicladora Recynter, en Guayaquil. Al día se reciclan 40 toneladas de residuos reciclables, lo que equivale al 3% del total de RSU en Quito (Fundación Natura, 2009).

#### **1.2.2.4 Reciclaje de plástico en el DMQ**

Las fuentes de reciclaje de plástico en el DMQ se agrupan en tres tipos de gestores ambientales: artesanales, medianos y gestores tecnificados. En el año 2008 se registraron 20 gestores tecnificados y 233 gestores artesanales, encargados de la recolección, transporte, transferencia, tratamiento, manejo de residuos peligrosos y disposición final (Secretaría del Ambiente, 2010).

#### **Gestores artesanales (minadores)**

Existen 5 000 personas que tienen como actividad económica la recolección de residuos reciclables, el 10% de ellas pertenecen a alguna organización pero ninguna de estas organizaciones lleva un control de la cantidad de material reciclable recolectado, a excepción de la Asociación Artesanal de Reciclaje Vida Nueva (Fundación AVINA *et al.*, 2010). Se mencionan por lo menos siete de estas organizaciones:

- Por un Futuro Mejor
- Asociación de Minadores Sector Carretas
- Asociación Artesanal de Reciclaje Vida Nueva
- Ambiente, Vida y Futuro
- Buena Esperanza de Pichincha
- Recicladores San Miguel del Común
- Salud y Vida para Quito

### **Gestores medianos (intermediarios)**

Dentro de la cadena productiva del reciclaje, se dedican a la compra y venta de los materiales reciclables. Realizan sus actividades de compra, acopio, clasificación, embalado y en algunos casos de lavado y triturado en instalaciones propias o alquiladas, su trabajo lo hacen con personal contratado. Sus principales proveedores son los gestores artesanales, comercios y algunas instituciones principalmente imprentas y colegios.

Venden los materiales a grandes empresas como: Cartopel, Incasa, Torplas, Recinter, etc., en algunos casos reciben apoyo de las empresas demandantes de materiales con equipos y/o transporte para el trabajo en sus bodegas, así como anticipos de dinero para capital de trabajo.

Los gestores artesanales señalan que muchas veces son afectados por los gestores intermediarios ya que algunas empresas y comercios generalmente donan los materiales, pero los intermediarios se anticipan y lo compran, lo que les obliga a buscar alternativas en las calles y en los botaderos en donde el trabajo es más duro y menos rentable.

### **Gestores tecnificados (industrias)**

Las industrias vinculadas con el reciclaje de residuos sólidos son aquellas que procesan productos a partir de materiales como cartón, papel, plástico, vidrio, metales, chatarra, etc. Estas empresas, compran el material recuperado, para procesarlo y venderlo como productos nuevos o como materia prima a otras empresas. En la Tabla 1.5 se dan a conocer algunos de los gestores tecnificados

para el reciclaje del plástico, calificados por la Dirección Metropolitana del Medio Ambiente. No existe alguna organización que proporcione información sobre la cantidad de plástico reciclado en el DMQ.

**Tabla 1.5** Empresas recicladoras de plástico

Nombre del gestor	Tipo de residuo plástico	Método de tratamiento
HAZWAT	PEAD y PEBD contaminado	Incineración
INCINEROX	No endurecido	Incineración
RECIPLAST	Todo tipo y espuma flex	Reciclaje
REYPROPAPEL RECICLAR CIA. LTDA.	Todo tipo, pero no de invernadero	Recolección, almacenamiento, empaque y transporte
PLÁSTICOS GUIDOS RAMOS (GR)	Todo tipo	Recolección, transporte y reciclaje
RECICLAJES M Y S	PEAD, PEBD, PP y PS	Recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y entrega
TORPLAS	PE, PP, PC, PS y plástico	Transporte y tratamiento
RECYTECH ECUADOR S.A.	Plástico de invernadero y mangueras de riego	Recolección, transporte, almacenamiento y reciclaje
INTERCIA	PET	Recolección, almacenamiento temporal, transporte y entrega
RECYNTER	Todo tipo	Recolección, transporte y entrega
PARAISO DEL ECUADOR	PE	Reciclaje
PLASTRECYCLING	no de invernadero	Recolección, almacenamiento, empaque y transporte

(Secretaría del Ambiente, 2010)

### 1.3 PROCESOS DE RECICLAJE DE PLÁSTICOS

El reciclaje de los residuos plásticos es un método para reducir la cantidad neta de flujo de residuos ya que la mayor parte acaba su vida en rellenos sanitarios, por lo que provocaría una gran presión sobre los rellenos sanitarios limitados (Burat *et al.*, 2009).

El reciclado del plástico también ofrece un potencial para generar ahorro demostrable en el consumo de combustibles fósiles que es una materia prima no renovable (Takoungsakdakun y Pongstabodee, 2006).

“Los termoplásticos son plásticos fácilmente reciclables ya que funden cuando se calientan y por lo tanto se pueden moldear repetidas veces sin que sus propiedades originales se alteren demasiado. Sin embargo, durante los distintos ciclos de reprocesado van sufriendo modificaciones por lo que no pueden ser reciclados más de 5 ó 7 veces. Los termoplásticos más conocidos son: PEBD, PEAD, PP, PET, PVC, PS, y policarbonato (PC)” (Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental “FIDA”, 2005).

Existen diferentes tipos de reciclaje en función de los distintos plásticos que se tengan. Los principales sistemas de reciclaje son los siguientes:

### **1.3.1 RECICLADO MECÁNICO**

Es un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo y el industrial (scrap) son recuperados y reprocesados, permitiendo su posterior utilización.

El reciclado de los plásticos involucra las operaciones siguientes:

- Operaciones de preprocesado
- Reducción de tamaño
- Clasificación de plásticos
- Lavado
- Secado
- Pelletizado

La inclusión y orden de las operaciones dependen de la fuente de residuos plásticos y de su composición:

- a. Residuos plásticos provenientes de los procesos de fabricación, tanto en la industria petroquímica y transformadora. A esta clase de residuos se la denomina scrap.
- b. A partir de los RSU entre los que se incluyen: electrodomésticos de línea blanca (frigoríficos, lavadoras, etc.); aparatos de automatización de oficinas (impresoras, ordenadores, copiadoras, etc.); aparatos de electrónica de consumo (televisiones, equipos estéreo, reproductores de vídeo, etc.); residuos triturados de automoción; residuos de envases y embalajes; residuos domésticos; residuos de construcción, etc. (Patentados. com, 2007).

### **Operaciones de preprocesado**

El preprocesado incluye un conjunto de operaciones que se organizan para crear un material enriquecido en plástico para su procesado posterior y aumentar la densidad aparente del material plástico (Patentados.com, 2007).

“El preprocesado es diferente a la reducción de tamaño porque el preprocesado a menudo se realiza en otro lugar o por el suministrador de material plástico de residuos, mientras que la reducción de tamaño se incluye, más típicamente, en la planta de reciclado de plásticos.”(Patentados. com, 2007).

Cuando la recuperación del plástico es a partir de bienes no perecederos (automóviles, electrodomésticos y aparatos electrónicos) estas piezas contienen generalmente metales, y su contenido es mayor que el contenido de plástico (típicamente, el contenido de plástico es menor del 30%), por lo que es necesario triturar los aparatos con el fin de liberar los metales de las partes enteras de manera rentable (Patentados.com, 2007). Las operaciones que conforman el preprocesado son:

- a. Acopio de material: es la recolección o recuperación de residuos plásticos a partir de otros materiales como vidrio, papel, metales, orgánicos, etc., en lugares fijos (botaderos de basura) o en recorridos. Es importante un buen sistema de acopio para un buen suministro de materia prima para el resto de los procesos, es necesario un lugar cerrado, libre de humedad y suciedad. La

conformación de microempresas de recolección es fundamental porque se proporciona una fuente de trabajo a muchas personas.

- b. Limpieza: es el acondicionamiento de los residuos plásticos recogidos. Se realiza para eliminar materiales en especial trozos grandes de metal y materiales peligrosos, con lo cual se evita el daño y desgaste excesivo de los equipos de reducción de tamaño. Al mismo tiempo se evita la contaminación de los procesos corriente abajo.

La eliminación de materiales, puede aumentar el rendimiento de los plásticos objetivo. Para la eliminación de metales, piedras, papeles, tapones, etiquetas, espumas, pelusas, cauchos, impurezas, etc., se pueden emplear procedimientos como: aspiración por aire, concentración por gravedad, uso de imanes, dispositivos de separación electrostática, separadores de corriente de Foucault, clasificadores ópticos, clasificadores por espesor y fricción o incluso clasificación y recogida manual. La elección de estos procedimientos dependerá de factores tales como la cantidad de metal en la corriente de alimentación, el tamaño de las piezas metálicas y los tipos de metal (Patentados.com, 2007).

### **Reducción de tamaño**

Es el picado (molido) del material cuyo principal objetivo es crear una distribución de tamaño de partículas más estrecha y superficies plásticas más limpias. Además facilita las operaciones de separación de los diferentes tipos de plásticos y el lavado del material picado.

La maquinaria utilizada para reducir a pequeños fragmentos depende de la dureza y dimensiones del material plástico. La reducción de tamaño se puede realizar con maquinarias tales como cierras eléctricas (para plásticos rígidos) y molinos, el tipo más empleado es el molino de cuchillas (plásticos flexibles).

Hoy en día existe tecnología para procesar y reducir material hasta polvo fino usando cámaras criogénicas a partir de nitrógeno líquido, donde el nitrógeno líquido fragiliza considerablemente el material lográndose obtener material fino. Este tipo de tecnología es bastante costosa, su mayor empleo es para el control

de calidad en productos específicos como por ejemplo el control de niveles de acetaldehído en preformas para el soplado de botellas.

### **Clasificación**

La separación tiene por finalidad liberar el plástico de interés de diferentes tipos de plásticos. La importancia de la separación radica en que si existiesen otros materiales presentes, éstos podrían perjudicar el proceso de reciclaje o directamente empeorar la calidad del producto final. Es decir, si existiesen distintos tipos de plásticos inmiscibles juntos, las unas crearán fases dentro de las otras o finalmente durante el procesado puede existir una degradación o quemado de alguna de las especies mientras se intenta fluidizar a la otra.

### **Lavado**

Las hojuelas están generalmente contaminadas con comida, papel, piedras, polvo, aceite, solventes y en algunos casos pegamento. De ahí que tienen que ser primero limpiados en un baño que garantice la eliminación de contaminantes.

El uso de hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado es una alternativa, el plástico contaminado es removido al ser ligero ya que flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan. Después del proceso de limpieza, los plásticos se llaman hojuelas limpias o granulado limpio.

El uso de detergentes está limitado por la cuestión ambiental debido a que los efluentes del proceso o procesos de lavado deben ser tratados para que puedan ser reutilizados nuevamente en el ciclo de lavado. En segundo lugar, es necesario encontrar un adecuado sistema de purificación de las aguas residuales para no contaminar ni dañar el entorno en el cual se desarrolla el proceso de reciclado.

En esta operación el insumo más importante es el agua, que por aspectos ambientales debe ser reciclada para un uso continuo. Dependiendo del origen del material, también será necesario usar sosa cáustica para asegurar un lavado eficiente y eficaz. El uso de sosa cáustica para el proceso de lavado es adecuado

por las bajas concentraciones necesarias y porque la sosa cáustica remanente en disolución se puede reutilizar para otros lavados, simplemente reponiendo la que se pierde en el proceso de lavado.

### **Secado**

Posterior al ciclo de lavado sigue un proceso de secado el cual debe eliminar el remanente de humedad del material, para que pueda ser comercializado y posteriormente procesado. Pueden usarse secadores centrifugados, es decir tambores especialmente diseñados para extraer la humedad por las paredes externas del equipo. O también pueden utilizarse secadores de aire, ya sea caliente o frío, que circulando por entre el material picado, eliminan la humedad hasta límites permisibles.

En los casos que se requiera extrema sequedad pueden usarse secaderos térmicos de doble lecho fluido con aire atemperado a 120 hasta 180 °C, durante periodos de entre 2, 4 a 6 horas dependiendo de la capacidad y diseño de los equipos.

### **Pelletizado**

La hojuela limpia y seca puede ser ya vendida o puede convertirse en "pellet". Donde el plástico granulado es fundido y se pasa a través de un tubo delgado donde toma forma de tubito al enfriarse en un baño de agua. Una vez frío, es cortado en pedacitos uniformes llamados pellets. En los procesos convencionales ya no es necesario llegar al pelletizado, sino directamente a las hojuelas limpias y sin degradar para la fabricación de nuevos productos mediante procesos de transformación como la inyección, extrusión y termoformado.

### 1.3.2 RECICLADO QUÍMICO

Implica procesos de despolimerización que están patentados, por lo que los detalles concretos no se conocen. Entre las distintas técnicas posibles, las más particulares son:

**Pirólisis:** es útil para materiales plásticos como el PP, PS y mezclas de plásticos difíciles de separar. Los residuos plásticos se calientan en atmósfera inerte (al vacío). Este proceso genera hidrocarburos en tres fracciones: gas, líquido y sólido. Para su uso como combustible y de productos químicos.

**Hidrogenación:** los residuos plásticos son tratados con hidrógeno y calor para dar lugar a combustibles líquidos que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.

**Gasificación:** los residuos plásticos son calentados con aire, y se obtienen los siguientes gases de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno, que es un gas combustible útil para la producción de acero en hornos de venteo.

Una de las ventajas, frente a otros procedimientos de reciclado químico, es la de poder admitir como alimentación toda la corriente de residuos municipales, sin necesidad de separar previamente los plásticos.

**Quimiólisis:** este proceso se aplica a poliésteres, poliuretanos, poliacetales y poliamidas. Consiste en la aplicación de procesos solvolíticos como hidrólisis, glicólisis o alcoholólisis para reciclarlos y transformarlos nuevamente en sus monómeros básicos para la repolimerización en nuevos plásticos.

### 1.3.3 RECICLADO TÉRMICO O VALORACIÓN ENERGÉTICA

Este tipo de reciclaje es la última opción para el reciclaje de los plásticos. Los residuos plásticos son hidrocarburos derivados del petróleo o gas natural. El

plástico es un excelente combustible con poder calorífico similar al fuel-oil o gas natural. Al final del ciclo de vida de los residuos plásticos pueden ser utilizados para generar electricidad o calor a partir de su incineración. Es aconsejable cuando los residuos plásticos están muy deteriorados, sucios o mezclados con otros tipos de plásticos difíciles de separar.

Es importante destacar que durante la incineración pueden aparecer sustancias tóxicas, como es el caso de dioxinas y furanos, por lo tanto es imprescindible tener sistemas de limpieza y gestión, tanto de gases como de cenizas, adecuados para que no se emitan dichas sustancias al exterior.

El aprovechamiento de los plásticos como combustibles es conocido en industrias como las cementeras, que necesitan gran cantidad de energía para alimentar sus hornos, sustituyendo así al carbón, que es el combustible más utilizado, y reduciendo con ello los impactos ambientales que éste provoca.

## **1.4 PROCESOS DE SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS**

### **1.4.1 IMPORTANCIA DE LA SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS**

La separación de mezclas de plásticos en plásticos individuales es importante para:

- a. Obtener un producto plástico reciclado útil (no degradado) puesto que algunos plásticos son incompatibles en la re-fusión. Como ejemplo, el PET mezclado con PVC, el PVC se degradará a la temperatura de procesamiento alta del PET y producirá carbón. Para agravar el asunto, el PET no se funde a la temperatura de procesamiento del PVC, consecuentemente las hojuelas de PET ocasionarán averías en los equipos [Takoungsakdakun y Pongstabodee, 2006; Buratet *al.*, 2009]
- b. Separar el PVC de otros tipos de plásticos porque durante la combustión en los procesos de reciclado térmico y en la aplicación de residuos plásticos como un reductor para la fabricación de hierro, se generan sustancias

peligrosas (gas de ácido clorhídrico, dioxinas que contienen cloro, etc.) que conducen a la contaminación del medio ambiente, graves efectos en la salud y reducen la vida útil de los equipos [Shen *et al.*, 2001; Burat *et al.*, 2009].

- c. Obtener productos de calidad, ya que en los procesos de soplado en la formación de la película aparecen irregularidades debido a la mezcla de plásticos.
- d. Para crear productos de calidad con colores de tonalidades uniformes.

#### 1.4.2 TÉCNICAS DE SEPARACIÓN DE PLÁSTICOS

Con el fin de conseguir productos de alto valor, los procesos de reciclado de plástico deben ser capaces de separar las corrientes de alimentación altamente mezcladas en diferentes tipos de escamas de producto para conseguir tasas de producción altas con pureza aceptable. Estas técnicas pueden clasificarse como:

**Clasificación manual:** resulta de gran utilidad el código internacional SPI (Sociedad de Industria del Plástico), que permite identificar cada tipo de plástico con un número y/o sus siglas respectivas, como se puede ver en la Tabla 1.6.

**Utilización de disolventes:** el procedimiento de separación basado en la aplicación de disolventes fue desarrollado por Seymour y Stahl con una mezcla de PE, PS, PVAC (poliacetato de vinilo). Consiste en disolver la mezcla de plásticos en tolueno a temperatura ambiente. En este disolvente no se disuelven el PE ni el PVC, por lo que se separan por filtración.

**Flotación en espuma:** se basa en el control de las características humectantes de los materiales plásticos, ya que la mayoría de los plásticos son de naturaleza hidrofóbica.

Para el éxito en la separación de las mezclas plásticas, es necesario hacer la superficie más hidrofílica, mientras que la otra permanezca aún en estado hidrofóbico. El hidrofílico permanece en la solución de flotación, mientras que las

burbujas de aire se adhieren y levantan al hidrofóbico a la superficie de la celda de flotación esto ocurre debido a la diferencia de densidades entre las burbujas de aire y la solución de flotación.

**Tabla 1.6** Código de identificación de los plásticos

Símbolo	Aplicaciones primarias típicas
 PET	<b>PET.</b> Envases para: bebidas, aceites, mayonesa, salsas, productos cosméticos, productos de limpieza, para microondas.
 HDPE	<b>PEAD o HDPE.</b> Envases para: detergente, lejía, blanqueador, aceite automotor, shampoo, lácteos. Cajas para embalar y transportar productos alimenticios. Baldes para pintura, helados, aceites. Macetas.
 PVC	<b>PVC.</b> Envases de aceites comestibles y no comestibles, desinfectantes. Tuberías, cortinas de baño, cubre asientos de coches, cañerías para desagües domiciliarios y de redes para agua potable, mangueras, techos translúcidos, pisos, recubrimientos, carcasas de electrodomésticos u ordenadores, perfiles para marcos de ventanas, puertas, tarjetas de crédito.
 LDPE	<b>LDPE.</b> Películas de empaque (sachets), bolsas, juguetes, contenedores.
 PP	<b>PP.</b> Contenedores de yogurt y margarina, baterías y piezas para autos, envases para microondas, tarrinas y vasos desechables, botellas para productos de limpieza.
 PS	<b>PS.</b> Envases descartables como bandejas para alimentos, vajilla desechable, cubetas para huevos, cajas de CD's y cassetes.
 OTHER	<b>OTROS.</b> Son plásticos de diferentes tipos como ABS, PC, productos extruidos, copolímeros. Estos plásticos no se reciclan porque no se sabe qué tipo de plásticos contienen. <b>PC.</b> Techos transparentes y translúcidos. Faros, ventanillas y parabrisas para carros. CD's y DVD's. Carcasas de teléfonos móviles y teclados de ordenador. Bidones de agua y biberones de bebés. Cascos protectores, material deportivo.

(Andrango y Córdova, 2007)

La flotación en espuma no es sólo controlada por los factores de la química de superficie basados en la diferente humectación de los plásticos y la tensión superficial del medio de flotación, sino que también por los factores gravimétricos como son la forma y tamaño de los residuos plásticos. También depende de las

condiciones del proceso y el efecto depresor del agente humectante [Takoungsakdakun y Pongstabodee, 2006; Burat *et al.*, 2009].

Los reactivos de flotación utilizados son:

- Agentes humectantes (depresores): metil celulosa (MC), lignosulfatos (lignosulfato de calcio CaLS y poli alcohol vinílico PVA)
- agente de la formación de espuma: metil isobutil carbonil (MIBC)
- sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3$ , HCl, y NaOH, para ajustar el pH de la solución.

Es aplicable para la separación de mezclas plásticas recicladas con una ligera diferencia en la densidad como por ejemplo para una mezcla de PVC y PET.

**Técnicas espectroscópicas:** se basan en la diferente respuesta que tienen los plásticos a la radiación electromagnética en función de su estructura química. Son técnicas de respuesta muy rápida por lo que se han podido aplicar en separaciones en tiempo real y de manera automatizada. Como las más importantes se mencionan: la fluorescencia de rayos x y la radiación infrarroja.

**Técnicas electrostáticas:** a este grupo pertenece la separación triboeléctrica basada en la carga electrostática que se genera en pequeñas partículas de plástico por la fricción con la pared de un cilindro rotatorio.

Uno de los tipos más usados son los separadores electrostáticos de alta tensión que constan básicamente de un cilindro rotatorio conectado a tierra el cual transporta la alimentación.

Una vez cargadas las partículas se proyectan a un campo eléctrico generado por un electrodo ionizador de corriente directa induce cargas del mismo signo en la superficie de las partículas mediante un bombardeo iónico. Las partículas conductoras pierden su carga sobre el tambor y son arrojadas de él por la fuerza centrífuga, seguidamente son sometidas a la atracción del campo electrostático de corriente directa. Las partículas no conductoras permanecen adheridas al tambor y van perdiendo su carga lentamente.

### 1.4.3 SEPARACIÓN POR DIFERENCIA DE DENSIDADES

#### 1.4.3.1 Generalidades

La diferencia por densidades es uno de los métodos de separación por concentración gravitacional. Es conocida también por separación en medios densos. Es el método de separación de materiales más sencillo y económico.

“La separación en medio denso consiste en separar sólidos en función de sus densidades usándose como medio un fluido de densidad intermedia, donde el sólido de densidad más baja flota y el de densidad más alta se va al fondo (se hunde)” (Pavez, 2005).

Esta técnica es aplicada especialmente para la separación de las poliolefinas (polietilenos y polipropileno) de otros tipos de plásticos. Es difícil separar mezclas de plásticos con diferencias de densidad ligeras como son el PVC y PET ya que sus densidades se superponen; la densidad del PET es de 1,33 a 1,37 g/cm<sup>3</sup> y del PVC entre 1,32 a 1,37 g/cm<sup>3</sup> (Burat *et al.*, 2009).

#### 1.4.3.2 Medios densos

Como no existe un líquido ideal para utilizar como medio denso se han desarrollado y usado comercialmente varios medios densos. Prácticamente, un medio denso tiene las siguientes características: barato, miscible en agua, estable físicamente que no se descompone ni se degrada en el proceso, no tóxico, no corrosivo, de baja viscosidad, que tenga densidad ajustable en un gran intervalo, fácilmente recuperable para ser reutilizado, químicamente inerte para no atacar ciertos plásticos, y fácilmente removible de los productos de separación.

Tres tipos de medios densos son usados comercialmente: líquidos orgánicos, sales disueltas en agua y suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua.

**Líquidos orgánicos:** estos líquidos tienen baja viscosidad, son estables y prácticamente inmiscibles en agua. Su aplicación industrial es limitada debido a que se descomponen químicamente, son tóxicos, corrosivos y de costo elevado. Los líquidos más usados son: yoduro de metileno (densidad igual a  $3,32 \text{ g/cm}^3$ ); tetrabromoetano (densidad igual a  $2,96 \text{ g/cm}^3$ ); bromoformo (densidad igual a  $2,89 \text{ g/cm}^3$ ); pentacloroetano (densidad igual a  $1,67 \text{ g/cm}^3$ ); tetracloruro de carbono (densidad igual a  $1,50 \text{ g/cm}^3$ ). Algunos líquidos se pueden mezclar con tetracloruro de carbono y dar una variedad de densidades menores (Pavez, 2005).

**Suspensiones de sólidos:** son los líquidos densos más utilizados en la industria. Se definen como líquidos en los cuales sólidos insolubles se dispersan manteniendo sus características de fluidez. El agua se utiliza como el líquido de las suspensiones. Los factores principales que se consideran en la elección del sólido para las suspensiones son: dureza, peso específico alto, estable químicamente (resistente a la corrosión), sedimentación lenta, viscosidad adecuada y distribución granulométrica, tamaño y forma de las partículas.

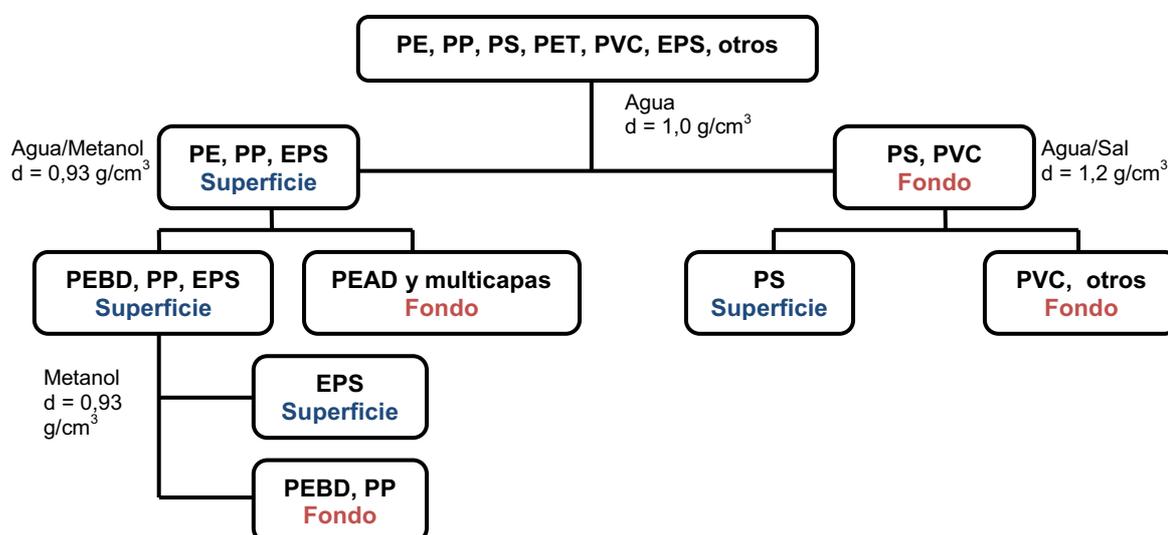
Los materiales normalmente usados para las suspensiones son: arcillas, cuarzo, barita, magnetita, galena, hierro-silicio molido o atomizado y plomo atomizado (Pavez, 2005).

El hierro-silicio es el material más utilizado en las suspensiones, pudiéndose alcanzar densidades de hasta  $3,5 \text{ g/cm}^3$ . Las mezclas hierro-silicio tienen entre 15 a 22 % de silicio pueden ser usadas molidas y atomizadas y se recuperan por separación magnética de baja densidad. Las mezclas con menos de 15 % de silicio se cubren rápidamente de Fe, mientras que a partir de 22 % de silicio se tornan muy débil magnéticamente (Pavez, 2005).

### 1.4.3.3 Aplicación

La técnica de separación por diferencia de densidades permite separar a escala de laboratorio los componentes mayoritarios presentes en el residuo mixto basados en la densidad de cada fracción.

A continuación se indica la separación de la fracción mixta compuesta de diez plásticos diferentes. Utilizando como medios densos: agua, metanol y sal, tal como se esquematiza en la marcha de separación representada en la Figura 1.5.



**Figura 1.5** Marcha de separación por diferencia de densidad de los diferentes componentes de la fracción de residuo mixto (Cáceres *et al.*, 2009)

## **2 PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1 MATERIALES**

En la presente investigación se estudiaron las alternativas de separación para materiales vírgenes y para materiales reciclados. Los materiales reciclados han sido antes ya transformados y han sufrido alguna degradación por lo que sus propiedades físicas-químicas y térmicas pueden que se hayan modificado. Para cada grupo se seleccionaron cinco diferentes tipos de plásticos:

- Polietileno de alta densidad (PEAD)
- Polipropileno (PP)
- Policarbonato (PC)
- Politereftalato de etileno (PET)
- Policloruro de vinilo (PVC)

Esta selección fue considerada por las razones siguientes:

- Son plásticos reciclables
- Tienen amplia aplicación en los diferentes sectores de la producción
- Existen diferencias de densidades que son aceptables para la separación de las poliolefinas (PP y PEAD) del PC, PET y PVC y la separación del PC del PET y PVC.

#### **2.1.1 PLÁSTICOS VÍRGENES**

Para la recolección de los plásticos vírgenes se buscaron pellets de formas y colores diferentes que permitan identificar a cada plástico en la etapa de la clasificación manual realizada al final de las pruebas por separación de diferencia de densidades.

A continuación se muestran las fichas técnicas y descripciones físicas de los plásticos utilizados.

**PP**

El PP utilizado es de la casa fabricante Braskem, su ficha técnica se presenta en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1** Ficha técnica del PP virgen

Producto	Braskem PP H 301		
<b>Propiedades físicas</b>	<b>Método</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	ASTM D792	0,905	g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (230°C/2,16 kg)	ASTM D 1238	10	g/10 min
<b>Propiedades térmicas</b>	<b>Método</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura de deflexión bajo carga:			
0,45 MPa, no recocido	ASTM D 648	91,00	°C
1,8 MPa, no recocido		53,00	°C
Temperatura de ablandamiento Vicat	ASTM D 1525	153	°C

(IDES, 2010)

El PP es de forma ovalada, color blanco, la transparencia es translúcida. En su centro tiene un punto de color blanco y de transparencia opaca, como se observa en la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Polipropileno (PP) virgen

## PEAD

El PEAD utilizado proviene de la casa fabricante LG Chem Ltd., en la Tabla 2.2 se muestra su ficha técnica.

**Tabla 2.2** Ficha técnica del PEAD virgen

Producto	LUTENE-H ME 6000		
<b>Propiedades físicas</b>	<b>Método</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Densidad	ASTM D 792	0,961	g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (190°C/2,16 kg)	ASTM D 1238	5,5	g/10 min
<b>Propiedades térmicas</b>	<b>Método</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura de ablandamiento Vicat	ASTM D 1525	125	°C
Temperatura de fusión	DSC ASTM D 3418	134	°C

(IDES, 2010)

El PEAD es de forma esférica, color blanco y brillante, la transparencia es opaca, y es suave al tacto, como se indica en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Polietileno de alta densidad (PEAD) virgen

**PC**

El PC es de la casa fabricante CHI MEI CORPORATION, el material fue adquirido de la casa proveedora Zaraplast la misma facilitó la ficha técnica del PC mostrada en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3** Ficha técnica del PC virgen

Producto	WONDERLITE PC-108		
Propiedades físicas	Método	Valor	Unidad
Densidad (23°C)	ASTM D792	1,2	g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (300°C/1,2 kg)	ASTM D 1238	6,5	g/10 min
Absorción de agua (23°C, 24 horas)	ASTM D 570	0,2	%
Dureza Rockwell (Escala M)	ASTM D 785	77	

El PC es de forma cilíndrica, no tiene color y es transparente, como se indica en la Figura 2.3.



**Figura 2.3** Policarbonato (PC) virgen

**PET**

El PET fue adquirido por la casa proveedora Wellman PermaClear que facilitó su ficha técnica, que se muestra en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Ficha técnica del PET virgen

Producto	PET amorfo, Lot 61803		
Propiedades Típicas	Método	Valor	Unidad
Viscosidad intrínseca	PD-61201-1	0,81 ± 0,02	-
Temperatura de fusión		240° mínimo	°C
Acetaldehído, medido en el chip	PD-61301	2,0 máximo	ppm
Densidad aparente		56 nominal	(lb/ft <sup>3</sup> )
humedad		0,20 máxima	%
Densidad		1,38-1,40	g/cm <sup>3</sup>

EL PET es de forma cilíndrica, color blanco y transparencia opaca, como se observa en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Politereftalato de etileno (PET) virgen

**PVC**

El PVC fue suministrado por la casa proveedora Geon Andina con su respectiva ficha técnica, la cual se muestra en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5** Ficha técnica del PVC virgen

Producto	D-8966 A			
Rígido granulado				
Método de procesamiento	Extrusión soplado			
Color	Cristal de tonalidad azul			
<b>Propiedades Típicas</b>	<b>Método</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Unidad</b>
Gravedad Específica	ASTM D792	1,31	1,35	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de fusión		168	175	°C

El PVC es de forma circular, tonalidad azul y transparente, como se observa en la Figura 2.5.



**Figura 2.5** Policloruro de vinilo (PVC) virgen

### 2.1.2 PLÁSTICOS RECICLADOS

Los materiales reciclados que son usualmente recuperados de una fuente post-consumo tienen un cierto grado de contaminación y deterioro, por lo que se buscaron fuentes lo suficientemente limpias que permitieran disponer de una materia prima lo menos contaminada posible. A continuación se describen las condiciones en las que se recolectaron cada uno de los materiales:

#### PEAD

Las muestras de PEAD fueron recolectadas a partir de residuos domésticos de los barrios del sector Collaloma (ubicado al norte del DMQ), antes de que fueran recolectados por los camiones de EMASEO.

Las muestras incluyeron botellas de distintos productos: alimentos, limpieza y aceite automotor de colores diferentes, como se aprecia en la Figura 2.6. Por lo que se tomó en cuenta sólo las botellas de color blanco de transparencia transparente a opaca.



**Figura 2.6** Recolección de residuos de PEAD

**PP**

Las muestras de PP fueron recolectadas a partir de los residuos provenientes del scrap de la empresa GemmarPlas, que elabora accesorios para sistemas de riego. Este material está razonablemente libre de impurezas y suciedad por lo que el acondicionamiento es innecesario. La cantidad de PP recolectado fue de 3 kg.

**PET**

Las muestras de PET recolectadas conformaban botellas de bebidas con marcas, colores y tamaños diferentes como se observa en la Figura 2.7, localizadas en uno de los andenes de Zámbriza.



**Figura 2.7** Recolección de residuos de PET

**PC**

Para la selección de las muestras de PC se consultaron sus principales aplicaciones y según la disponibilidad se propendió a la recolección de techos

translúcidos provenientes de los residuos de materiales de construcción encontrados en una ferretería.

### **PVC**

Las muestras de PVC rígido fueron recolectadas a partir de residuos de techos translúcidos resultantes de la renovación del techo de una vulcanizadora, los cuales contenían sobre su superficie restos de aceite automotor y grasas, como se indica en la Figura 2.8.



**Figura 2.8** Recolección de residuos de PVC

### **2.1.3 MEDIOS DENSOS**

Se hizo una revisión bibliográfica en la cual se consultó la separación de las poliolefinas (PEAD y PP), PC, PET y PVC por el método de diferencia de densidades, que permitió conocer los posibles medios densos útiles para la separación de los plásticos mencionados. Los medios densos más usados son el agua y sales entre estos los seleccionados fueron el agua potable y soluciones de cloruro de sodio ambos escogidos por su fácil disponibilidad.

Otra de las razones para la selección de soluciones de cloruro de sodio es la relación costo/kg de soluto, cuyo soluto es la sal común cuya relación es de \$ 0,65/kg. Al inicio se tenía pensado utilizar soluciones de nitrato de calcio ya que tuvo éxito en un proyecto de investigación para la separación de PC de PVC realizado en el CIAP (Centro de Investigación Aplicada a Polímeros). Pero no fue utilizado porque para la compra del nitrato de calcio se requiere permiso del CONSEP y su costo es \$ 1,75/kg.

### **2.1.3.1 Agua potable**

El agua potable es una sustancia líquida que no requiere tratamiento y preparación para ser utilizado como medio denso en la separación de las poliolefinas (PEAD y PP) de otros plásticos.

La densidad del agua, como se sabe es de alrededor de  $1 \text{ g/cm}^3$  que puede separar los plásticos PEAD y PP en la superficie del agua porque tienen densidades menores a  $1 \text{ g/cm}^3$  mientras que los otros plásticos de densidades mayores a  $1 \text{ g/cm}^3$  se hundirán en el fondo del recipiente. La separación de las poliolefinas (PEAD y PP) de otros plásticos es muy importante por ser materiales de gran consumo para la producción de empaques y envases en el mundo y en el Ecuador como se ha descrito en el capítulo anterior.

### **2.1.3.2 Solución de cloruro de sodio**

Se utilizó el cloruro de sodio por su disponibilidad y precio. Adicionalmente la densidad de la solución de cloruro de sodio es regulable hasta  $1,2 \text{ g/cm}^3$  que permite separar el PC de densidad de alrededor de  $1,2 \text{ g/cm}^3$  de otros plásticos. Para esta separación la densidad de la solución de cloruro de sodio deberá tener un valor intermedio, mayor o igual a la densidad del PC y menor a las densidades de los plásticos PET y PVC, para promover la flotabilidad del PC a la superficie de la solución y la sedimentación del PET y PVC en el fondo del recipiente, lo cual

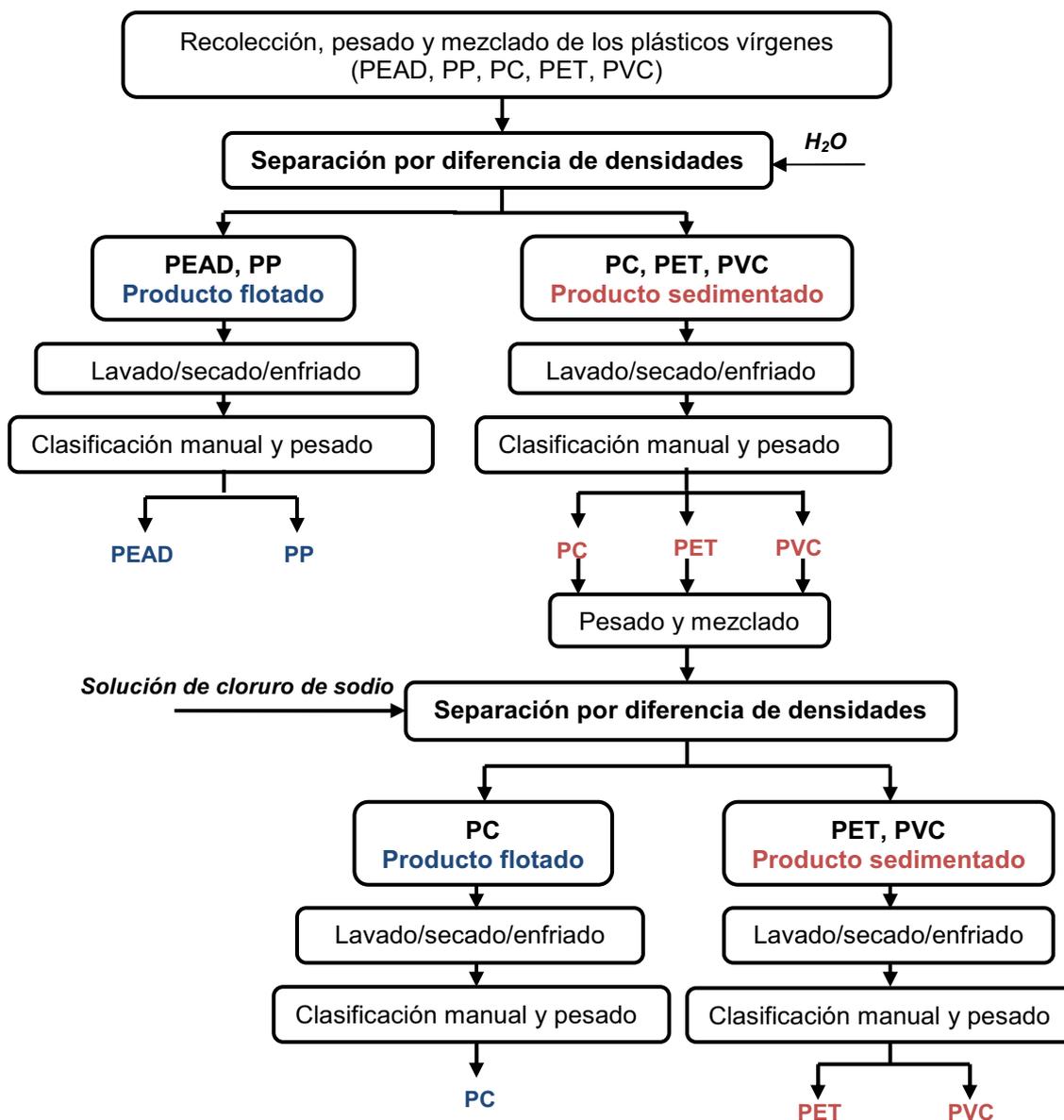
permite la separación del PC de PET y PVC, primordialmente del PVC que es incompatible en la temperatura de procesamiento que provoca la degradación térmica del PVC y conlleva a obtener productos de mala calidad. La separación del PET y PVC no es posible mediante la técnica de diferencia de densidades ya que poseen rangos de densidades similares.

## **2.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE MATERIAL VIRGEN**

### **2.2.1 INTRODUCCIÓN**

La evaluación del comportamiento de mezclas de material virgen tiene los siguientes objetivos:

- a. Caracterizar los plásticos vírgenes por medio de las siguientes técnicas:
  - Determinación de la densidad por el Principio de Arquímedes o método de desplazamiento.
  - Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) para la determinación de las temperaturas de fusión y/o temperaturas de transición vítrea
  - Identificación de los grupos funcionales característicos de cada tipo de plástico por espectroscopia infrarroja
  - Contenido de cenizas
- b. Determinar las densidades efectivas de los medios densos mediante el análisis de la recuperación total de cada plástico ya sea en la superficie del medio denso o en el fondo del recipiente, como se indica en la Figura 2.9.
- c. Determinar las mejores condiciones de separación de los plásticos vírgenes como son: tamaño de partícula, forma y velocidad de agitación.



**Figura 2.9** Esquema de separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC

## 2.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES DE LOS MEDIOS DENSOS

### 2.2.2.1 Determinación de la densidad del agua potable a 20°C

#### **Equipo**

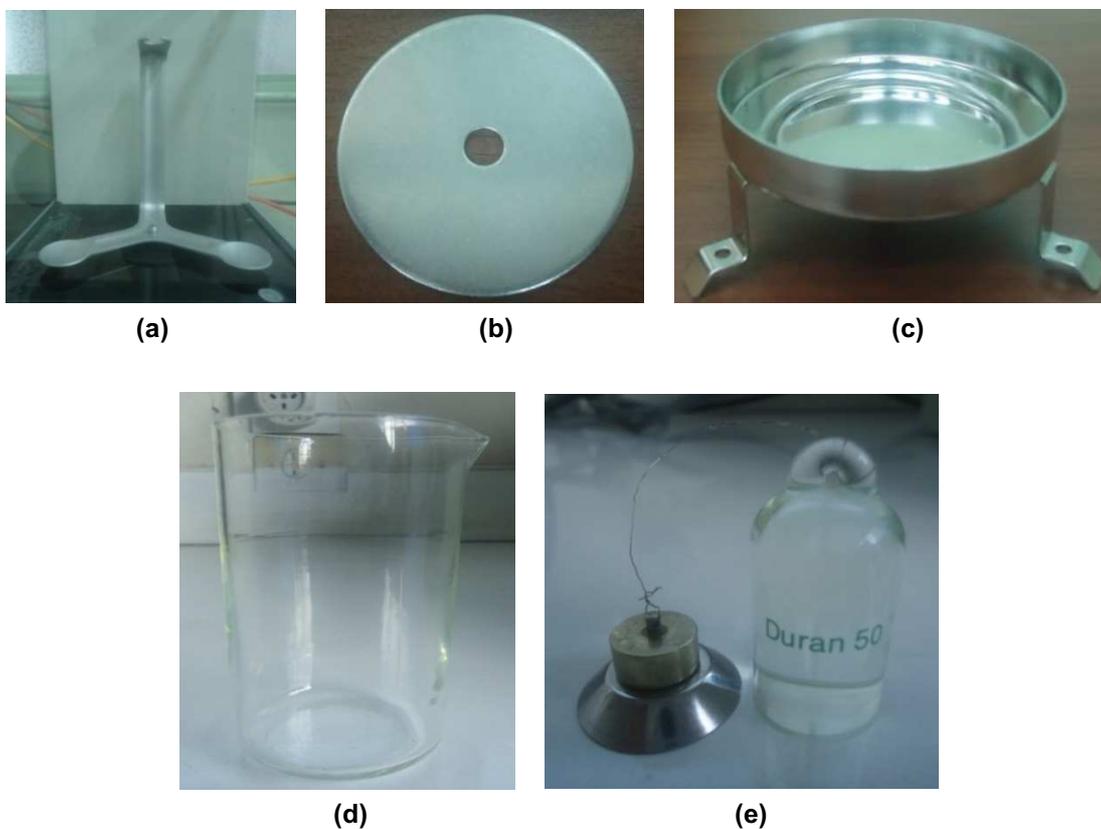
Para la medición de la densidad del agua potable a 20 °C se empleó la balanza analítica AA-200 con sus accesorios respectivos, y el baño térmico para mantener la temperatura a 20°C. Ambos equipos pertenecen al CIAP de la Escuela

Politécnica Nacional (EPN). En la Tabla 2.6 se muestran las especificaciones de ambos equipos.

**Tabla 2.6** Especificaciones del equipo para la determinación de la densidad del agua potable a 20 °C

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad	Precisión
Balanza analítica y accesorios	Denver	AA-200	200 g	0,0001 g
Baño térmico	HAAKE	001-3950	100 °C	1°C

La balanza analítica AA-200 consta de los accesorios siguientes: (a) pescante, (b) arandela de compensación, (c) trípode (d) vaso alto, (e) cuerpo de desplazamiento. El vaso alto es de vidrio, de 10 cm de alto y 6 cm de diámetro. El cuerpo de desplazamiento tiene volumen igual a 10 cm<sup>3</sup>, como se indica en la Figura 2.10



**Figura 2.10** Accesorios de la balanza AA-200 para determinar la densidad del agua potable

### **Procedimiento**

El método empleado para determinar la densidad del agua potable se basa en el Principio de Arquímedes, cuyo enunciado expresa “que todo cuerpo sumergido en un fluido, experimenta un empuje (fuerza) vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado”.

Para el procedimiento perseguido se tomó como referencia el instructivo de operación de la balanza analítica AA-200, que consta de los siguientes pasos:

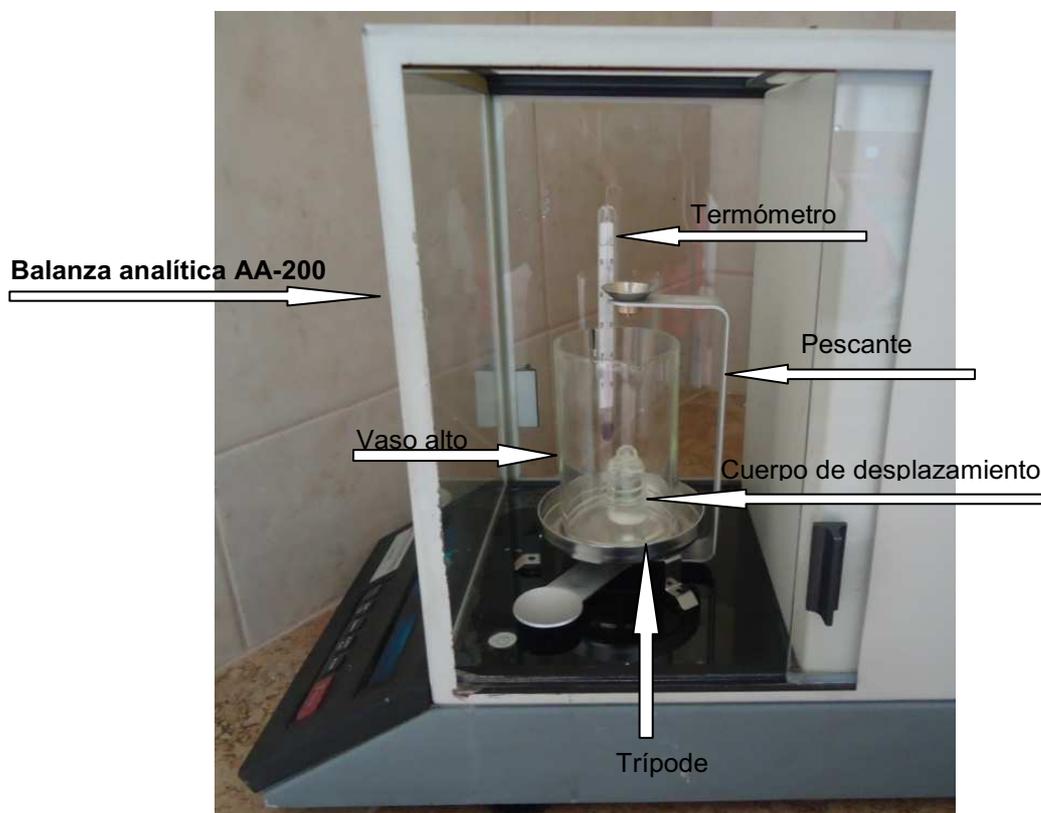
- a. Se termostató el agua potable en el baño térmico a 20°C.
- b. Se armó la balanza analítica AA-200 con sus accesorios respectivos de la siguiente forma: se colocó el pescante por la ranura de la balanza, luego se hizo coincidir la ranura de la arandela de compensación sobre el pivote del pescante y por último se colocó el trípode sobre el pescante de manera que no se toquen entre ambos accesorios.
- c. Se colocó el vaso alto vacío sobre el trípode, justo en el centro, y se suspendió el termómetro del borde del vaso y se taró.
- d. Se sujetó el cuerpo de desplazamiento del pescante. Se esperó que el cuerpo de desplazamiento se quede quieto pero sin tocar las paredes del vaso alto. Luego se anotó el peso del cuerpo de desplazamiento en el aire ( $m_a$ ), como se indica en la Figura 2.11.
- e. Se añadió el agua potable a 20°C hasta 1 cm por encima del ojete de suspensión del cuerpo de desplazamiento y se anotó el peso del cuerpo de desplazamiento en el agua potable ( $m_l$ ).
- f. A partir de ambas pesadas se pudo calcular la densidad del agua potable con la ecuación [1]:

$$\rho = \frac{(m_a - m_l)}{10} + 0,0012 \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad [1]$$

Donde:

- $m_a$ : peso del cuerpo de desplazamiento en el aire  
 $m_l$ : peso del cuerpo de desplazamiento en el agua potable a 20°C  
 10: volumen del cuerpo de desplazamiento (cm<sup>3</sup>)

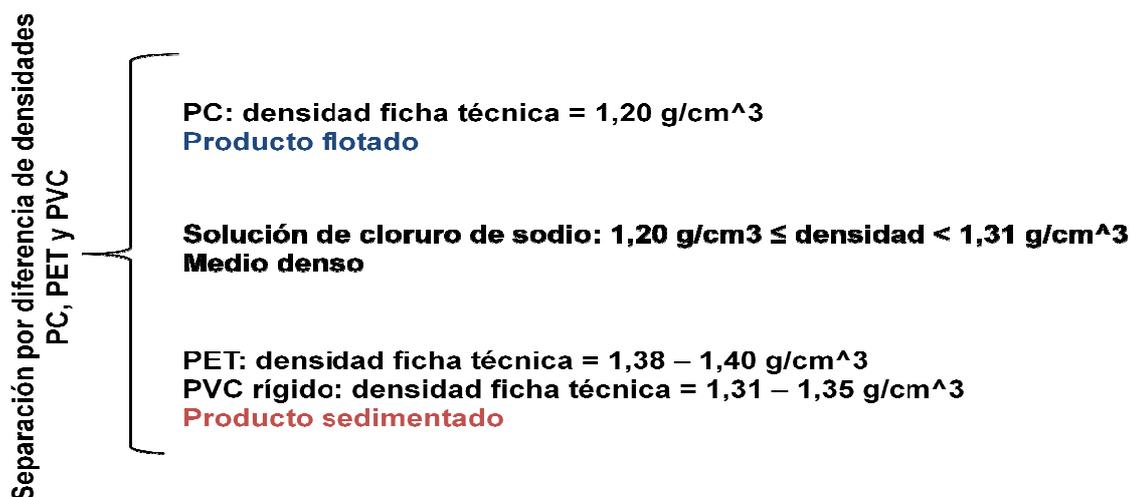
0,0012: corrección del empuje del aire



**Figura 2.11** Equipo para determinar la densidad del agua potable

#### 2.2.2.2 Determinación de la densidad de la solución de cloruro de sodio

Para determinar la densidad de la solución de cloruro de sodio se tomó en consideración la separación del PC del PET y PVC, para ello se debió preparar la solución de cloruro de sodio con un valor de densidad intermedio mayor o igual a la densidad del PC para que su recuperación sea en la superficie de la solución y densidad menor a las densidades del PET y PVC para la recuperación de ambas en el fondo del recipiente, como se indica en la Figura 2.12.



**Figura 2.12** Esquema para determinar la densidad de la solución de cloruro de sodio

### Equipo

En la Tabla 2.7 se presentan las especificaciones de los equipos utilizados para la preparación de la solución de cloruro de sodio de densidad igual a 1,197 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 2.7** Especificaciones del equipo para determinar la densidad de la solución de cloruro de sodio

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad	Precisión
Probeta	KIMAX	No. 20024	1000 ml	10ml
Balanza analítica	ae ADAM	PW 124	120 g	0,0001 g
Agitador magnético	BOECO	MSH 300	250-1250 rpm	167 rpm
Densímetro universal	BOECO		0,70-2,00g/cm <sup>3</sup>	0,01 g/cm <sup>3</sup>

### Procedimiento

- a. Se midieron 850 ml de agua destilada en la probeta KIMAX, para evitar que la solución se derrame del vaso de precipitación de 1 000 ml cuando se añada sal y aumente su volumen.
- b. En un crisol previamente tarado se pesó gradualmente 50 g de sal común hasta completar 300 g, los motivos del peso medido fueron la capacidad

máxima de la balanza analítica igual a 120 g y para facilitar la disolución de la sal.

- c. Se agregó la sal común en el agua destilada y se disolvió con el agitador magnético hasta que la solución tenga un color homogéneo y transparente.
- d. Se trasvasijó la solución a la probeta y se introdujo el densímetro universal para medir su densidad, como se muestra en la Figura 2.13. La densidad medida fue igual a  $1,197 \text{ g/cm}^3$ . El tercer número decimal se estimó mediante la densidad bibliográfica que la solución de cloruro de sodio puede alcanzar igual a  $1,1972 \text{ g/cm}^3$ , como se indica en el Anexo I.



**Figura 2.13** Medición de la densidad de la solución de cloruro de sodio

## 2.2.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS VÍRGENES

### 2.2.3.1 Determinación de las densidades de los plásticos vírgenes

#### **Equipo**

El equipo utilizado es la balanza analítica AA-200 con sus accesorios respectivos para determinar la densidad de los plásticos flotantes y plásticos sedimentados, como se indican en las Figuras 2.14 y 2.15 respectivamente.



**Figura 2.14** Equipo para la determinación de las densidades de los plásticos flotantes



**Figura 2.15** Equipo para la determinación de las densidades de los plásticos sedimentados

La cesta para los plásticos flotantes es de forma convexa para mantener los plásticos bajo la superficie del agua destilada mientras que para los plásticos sedimentados la forma de la cesta es cóncava para almacenar los pellets plásticos.

### **Procedimiento**

Para determinar la densidad del plástico se aplicó el Principio de Arquímedes o llamado también método de desplazamiento. Se usó agua destilada como líquido de referencia cuya densidad es conocida.

El plástico se pesó en el aire ( $m_a$ ), después se sumergió en el agua destilada y se volvió a pesar ( $m_l$ ), en estas condiciones pesaba menos, ya que cualquier cuerpo sumergido en agua es empujado por una fuerza equivalente al peso del agua desplazada.

El volumen del líquido desalojado corresponde al volumen del sólido sumergido. La diferencia de  $m_a - m_l$  es igual a la pérdida de peso producida por la inmersión en el agua destilada, o el peso de un volumen igual de agua destilada.

La fórmula  $\frac{m_a}{m_a - m_l}$  es el peso específico del plástico. Dado que el peso específico es simplemente una relación. Para el cálculo de la densidad del plástico la ecuación utilizada es [2]:

$$\rho_s = \frac{m_a}{(m_a - m_l)} * \rho_l + 0,0012 \quad [2]$$

Donde:

$m_a$ : peso del plástico en aire

$m_l$ : peso del plástico sumergido en el agua destilada

$\rho_l$ : densidad del agua destilada

0,0012: corrección del empuje del aire cuando se pesa el plástico en el aire

Para la ecuación [2] se debe tomar en cuenta la temperatura a la que se hicieron las medidas para conocer la densidad del agua destilada.

### **Plásticos flotantes (PEAD y PP)**

- a. Se armó la balanza analítica con: pescante, arandela de compensación y trípode.
- b. Se colocó el vaso bajo sobre el trípode y se suspendió la cestita para sólidos flotantes del pescante.
- c. En el platillo superior del pescante se colocó una moneda de 5 centavos, debido a que si el empuje del plástico es mayor que el peso de la cesta no permita que se levante la cesta y desestabilice el sistema.
- d. Se llenó el vaso bajo con agua destilada para que el plástico quede cubierto, después de sumergirlo, por 1cm de agua destilada como mínimo y se colocó sobre el trípode. Se suspendió el termómetro del borde del vaso bajo.
- e. Se aseguró de que no haya burbujas de aire adheridas en la parte sumergida de la cesta moviendo la cesta. Se cerró las ventanillas de la balanza y se taró.
- f. Para pesar el plástico se utilizó de 10-15 pellets de plástico. Se colocó en el platillo superior del pescante, se esperó a que la indicación de la balanza se estabilice y se anotó el peso mostrado  $m_a$  (peso del plástico en aire).
- g. Se retiró el plástico del platillo. Se volvió a tarar y se puso los mismos pellets de plástico en la cesta. Se aseguró de que no haya burbujas de aire adheridas al plástico. Se esperó que la balanza esté en equilibrio y se anotó el valor indicado  $m_l$  (empuje del plástico sobre el agua).
- h. Se calculó la densidad buscada  $\rho_s$  con la ecuación [2].

### **Plásticos sedimentados (PC, PET y PVC)**

El procedimiento seguido fue igual al descrito para los plásticos flotantes, pero para los plásticos sumergidos se usó la cestita para sólidos sumergidos y no fue necesario colocar una moneda de 5 centavos en el platillo superior del pescante.

### 2.2.3.2 Espectroscopía infrarroja

Cuando la radiación infrarroja incide sobre una muestra, es capaz de provocar cambios en los estados vibracionales de las moléculas constituyentes de la misma. Pueden distinguirse dos clases básicas de vibraciones: de valencia ( $\nu$ ) y doblaje ( $\delta$ ). La absorción de radiación por parte de una muestra es indicativa del tipo de enlaces y grupos funcionales presentes en la misma.

#### **Equipo**

El equipo utilizado es el espectrofotómetro infrarrojo con transformadas de Fourier (FT-IR), marca Perkin Elmer y modelo Spectrum One, el mismo pertenece al Centro de Investigación Aplicada a Polímeros (CIAP), el cual se indica en la Figura 2.16.

En la Figura 2.17 se indica la prensa hidráulica para la preparación de las muestras. La prensa hidráulica marca CARVER modelo 2 112 con sistema de calentamiento, cuyas condiciones de operación máximas son 400°C y 24 000 lbf.



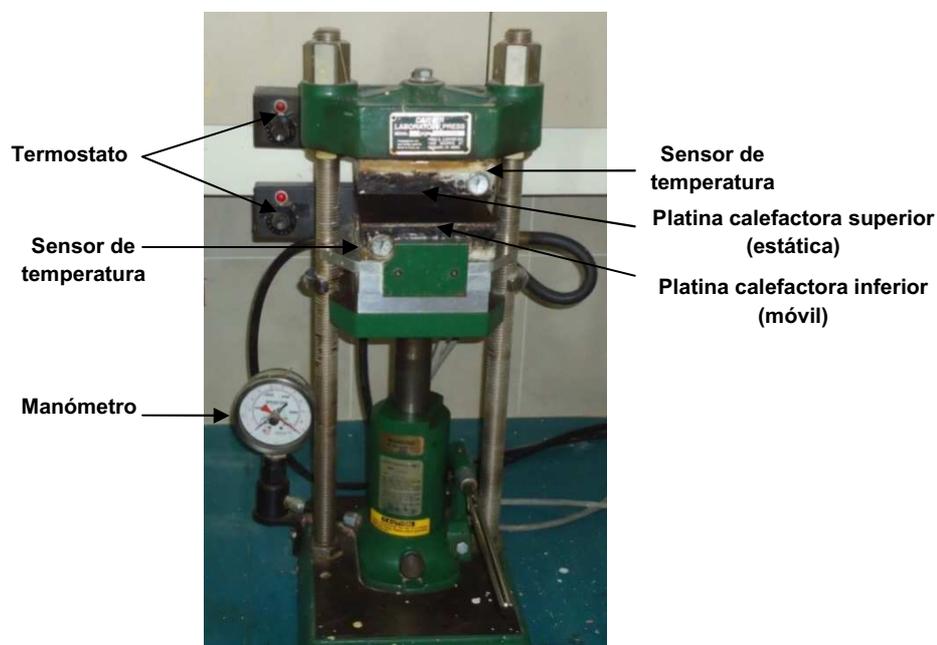
**Figura 2.16** Espectrofotómetro infrarrojo FT-IR

#### **Procedimiento**

- a. Preparación de la muestra: se obtuvieron láminas con la prensa hidráulica. Para cada plástico se tomó un pellet envuelto con lámina de aluminio, a

excepción del PET, se colocaron dos pellets entre 2 láminas de teflón envueltas en una lámina de aluminio. Se colocó sobre la platina calefactora inferior y se aplicó la máxima presión posible igual a 1 7000 lbf durante unos segundos y se retiró la muestra laminada. La temperatura de laminación del PP, PEAD, PC y PVC fue de 200°C y para el PET de 250°C.

- b. Mediciones espectrales: los análisis de espectroscopía infrarroja se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM D 5 576-00. Se colocó la lámina de plástico virgen en el espectrofotómetro infrarrojo y se ajustaron los controles para obtener una buena relación señal ruido y repetividad satisfactoria. Para un FT-IR, la resolución espectral es de  $4\text{ cm}^{-1}$  y las bandas de absorción se registran en la longitud de onda comprendida entre  $4\ 000$  a  $400\text{ cm}^{-1}$ . Se compararon los espectros de la muestra con un estándar y se determinaron qué características estructurales están presentes en los espectros obtenidos para cada plástico (PEAD, PP, PC, PET y PVC) mediante la presencia de bandas intensas correspondientes a grupos funcionales característicos para cada plástico.



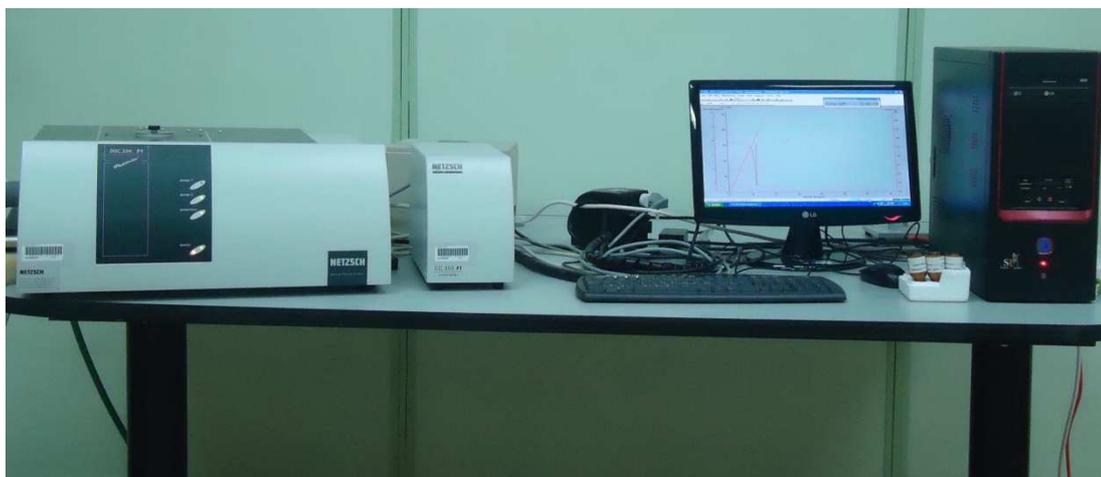
**Figura 2.17** Prensa hidráulica

### 2.2.3.3 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Esta técnica permite medir los efectos térmicos, asociados a los cambios físicos o químicos de una sustancia cuya temperatura se aumenta o disminuye a una velocidad constante, registrando en función del tiempo la diferencia de energía que hay que suministrar a la muestra problema y a una referencia, para mantenerlas a la misma temperatura. Esta diferencia de energía es equivalente a la energía térmica absorbida o disipada en el curso de una transición, por el material considerado.

#### Equipo

El equipo utilizado es el calorímetro diferencial de barrido NETZSCH modelo 204 F1 Phoenix perteneciente al CIAP, indicado en la Figura 2.18.



**Figura 2.18** Calorímetro diferencial de barrido (DSC)

#### Procedimiento

Se realizó según la sugerencia de la norma ASTM D 3418-03.

- a. Todos los ensayos se realizaron en atmósfera inerte ( $N_2$  gas) a un flujo de 20 ml/min. Para el sistema de enfriamiento se utilizó nitrógeno líquido como refrigerante a un flujo de 70 ml/min.

- b. El calorímetro está conectado a un software en el cual se estableció y grabó el ciclo térmico preliminar para calentar y enfriar la muestra a una velocidad constante de 10 °C/min.
- c. Se esperó y registró el ciclo térmico completo en los termogramas que determinan la temperatura de fusión para PEAD, PP y PET y temperatura de transición vítrea para el PC.
- d. El primer barrido, revela información sobre la actual condición de la muestra, por ejemplo su historia térmica (influencias en su procesamiento, cristalinidad y temperaturas de servicio). La segunda corrida, es para determinar las características propias del material.

#### 2.2.3.4 Contenido de cenizas

A continuación, se presenta un resumen de los equipos utilizados para la determinación del contenido de cenizas.

#### **Equipo**

En la Tabla 2.8 se presentan las especificaciones del equipo para determinar el contenido de cenizas.

**Tabla 2.8** Especificaciones del equipo para la determinación del contenido de cenizas

<b>Equipo</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Precisión</b>
Balanza analítica	ae ADAM	PW 124	120 g	0,0001 g
Mufla	LINDBERG	58114	1200°C	1°C

#### **Procedimiento**

Este método fue desarrollado para determinar el contenido inorgánico de los plásticos mediante la incineración destructiva. Esta prueba está limitada para sustancias que contienen halógenos en su estructura, como el PVC.

Se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 5 630-01, que consta de las siguientes instrucciones:

- a. Se determinaron la temperatura de incineración, tiempo de incineración, y tamaño de muestra iguales a: 800°C, 30 minutos y 10 g de muestra para el PEAD, PP y PC, para el PET se utilizó 5 g de muestra para que no se desborde del crisol cuando alcance el punto de inflamación.
- b. Se pesó un crisol de porcelana de 50 ml que estaba limpio y seco. Se registró el valor resultante como  $W_1$ .
- c. Se pesó la cantidad de muestra según el tipo de plástico, dentro del crisol previamente pesado. Se registró el valor resultante como  $W_2$ .
- d. Se colocó el crisol sobre la parte oxidante de la llama del mechero para que rápidamente inicie la incineración de la muestra, la incineración continuó hasta que no hubo llamas visibles en el crisol, como se muestra en la Figura 2.19.
- e. Con unas pinzas se retiró el crisol del mechero, y se colocó en la mufla a 800°C durante 30 min.
- f. Después de la duración prescrita en la mufla, con unas pinzas se retiró el crisol de la mufla y se colocó en un desecador hasta que se enfríe.



**Figura 2.19** Montaje para la incineración de los materiales plásticos

- g. Se pesó el crisol frío y registró el valor resultante como  $W_3$ .
- h. Después de registrar los datos, se colocó nuevamente el crisol dentro de la mufla a  $800^\circ\text{C}$ . La muestra se retiró después de 30 minutos y se enfrió en un desecador. Se pesó el crisol frío y se anotó el peso. Si el peso varía más de 2 mg, se coloca la muestra en la mufla a  $800^\circ\text{C}$  hasta que se alcance un peso constante.
- i. Se calculó el contenido de ceniza en la muestra con la ecuación [3].

$$\text{cenizas, masa \%} = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1)} * 100 \quad [3]$$

Donde:

$W_1$ : peso del crisol, g,

$W_2$ : peso del crisol, g, más peso de la muestra, g

$W_3$ : peso del crisol, g, más peso de las cenizas, g.

#### 2.2.4 SEPARACIÓN DE LOS PLÁSTICOS VÍRGENES

Para la separación de los plásticos se utilizaron los equipos listados en la Tabla 2.9.

**Tabla 2.9** Especificaciones del equipo para el comportamiento y separación de mezclas plásticas por diferencia de densidades

Equipo	Marca	Modelo	Capacidad	Precisión
Balanza analítica	ae ADAM	PW 124	120 g	0,0001 g
Estufa	W.C. HERAEUS HANAU	RT 360	220°C	
Agitador magnético	BOECO	MSH 300	250-1250 rpm	167 rpm

#### **2.2.4.1 Comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable**

Tiene como objetivo evaluar el comportamiento individual del PEAD, PP, PC, PET y PVC en el agua potable y solución de cloruro de sodio. Por tanto permitirá evaluar la eficiencia y factibilidad del método de separación por diferencia de densidades de cada plástico y las posibles condiciones de operación para una eficaz separación de la mezcla de plásticos vírgenes.

El comportamiento de cada plástico se analizó en reposo y agitación magnética (417 y 750 rpm). El agitador magnético tiene la escala de velocidad de agitación con los números 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, como la capacidad comprende de 250 rpm a 1 250 rpm, el nivel 1 corresponde a 250 rpm y el nivel 7 corresponde a 1 250 rpm cada incremento de nivel consecutivo corresponde 167 rpm.

Las velocidades de agitación iguales a 417 rpm y 750 rpm se seleccionaron porque ofrecen agitaciones comparables a 417 rpm la agitación es relativamente débil y a 750 rpm la agitación es relativamente fuerte. Se probó en el nivel 5 que equivale a una velocidad de agitación igual a 917 rpm pero la barra de agitación se disparaba continuamente hacia las paredes del vaso de precipitación y no permitía la agitación.

##### **Agua potable en reposo**

- a. Se realizó para cada tipo de plástico: PEAD, PP, PC, PET y PVC. El procedimiento perseguido fue el siguiente:
- b. Se llenó de agua potable un vaso de precipitación de 1 000 ml.
- c. Se pesó aproximadamente 10 g de plástico con una precisión de 0,0001 g.
- d. Se colocó el plástico en el agua potable en reposo. Se agitó manualmente por unos segundos, se observó una separación inmediata del plástico tanto en la superficie del agua como en el fondo del vaso de precipitación.
- e. El plástico se retiró del vaso de precipitación y se colocó en la estufa a 80°C durante 2 horas. Luego se colocó en el desecador durante 20 minutos.
- f. Se pesó la cantidad de plástico flotado y plástico sedimentado.

- g. Se calcularon los porcentajes de recuperación de plástico flotado y plástico sedimentado, con base de cálculo en la cantidad de plástico total pesado.

#### **Agua potable en agitación magnética a 417 rpm y 750 rpm**

- a. Se realizó para cada plástico: PEAD, PP, PC, PET y PVC. El procedimiento perseguido fue el siguiente:
- b. Se llenó con agua potable dos vasos de precipitación de 1 000 ml. Cada uno se colocó sobre el agitador magnético a 417 rpm y 750 rpm.
- c. Se pesó aproximadamente 10 g de plástico con una precisión de 0,0001 g.
- d. Se colocó el plástico en el agua potable en agitación magnética a 417 rpm y 750 rpm durante 1 minuto. Se observó una separación inmediata del plástico tanto en la superficie del agua como en el fondo del vaso de precipitación.
- e. El plástico se retiró del vaso de precipitación y se colocó en la estufa a 80°C durante 2 horas. Luego se colocó en el desecador durante 20 minutos.
- f. Se pesó la cantidad de plástico flotado y plástico sedimentado.
- g. Se calcularon los porcentajes de recuperación de plástico flotado y plástico sedimentado, con base de cálculo en la cantidad de plástico total pesado.

#### **2.2.4.2 Comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>**

Las velocidades de agitación magnética consideradas son iguales a 417 rpm y 750 rpm. Se realizó para cada tipo de plástico por separado: PC, PET y PVC, el procedimiento seguido fue el siguiente:

- a. Se midió la densidad de la solución de cloruro de sodio con el densímetro universal para verificar su densidad igual a 1,197 g/cm<sup>3</sup>. La solución fue previamente preparada según el procedimiento descrito en el subcapítulo 2.2.2.2.
- b. Se llenó con la solución dos vasos de precipitación de 1 000 ml y se colocaron sobre el agitador magnético a 417 rpm y 750 rpm.
- c. Se pesó alrededor de 10 g de plástico y se colocó en la solución de cloruro de sodio en agitación.

- d. Después de 1 minuto de agitación, se observó una separación rápida del plástico en la superficie de la solución y en el fondo del vaso de precipitación.
- e. Se retiraron el plástico flotado y sedimentado por separado y se colocaron en crisoles de vidrio para llevarlos a la estufa a 80°C durante 2 horas, luego a un desecador por 20 minutos.
- f. Se pesaron la cantidad de plástico flotado y sedimentado y se calcularon cada uno de sus porcentajes de recuperación con base de cálculo en la cantidad total de plástico pesado.

#### **2.2.4.3 Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable**

Con base en los resultados obtenidos del comportamiento de cada plástico virgen en agua potable, se obtuvieron los mejores resultados de recuperación de cada plástico sin agitación y con agitación magnética a 750 rpm, por tanto se analizó la separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable en reposo y agua potable en agitación magnética a 750 rpm.

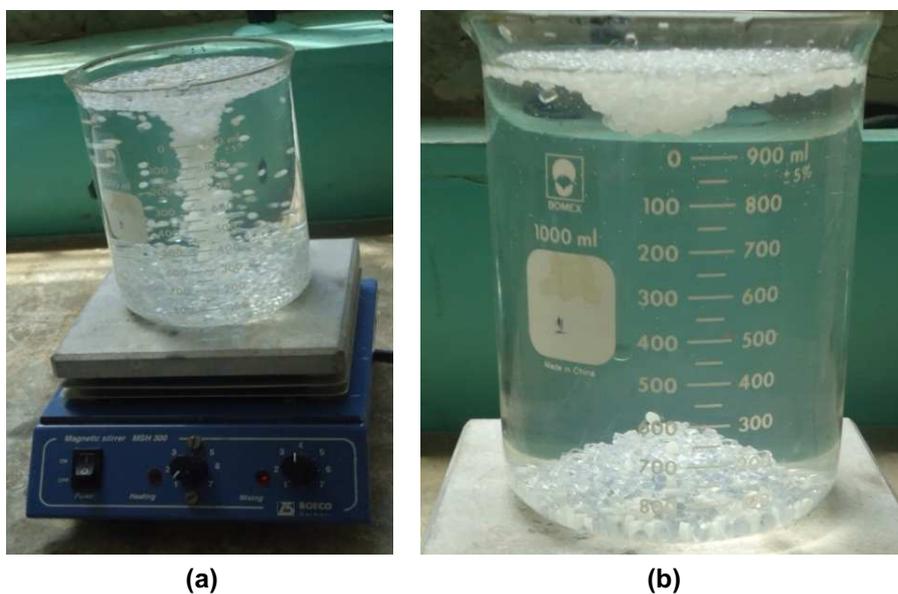
##### **Agua potable en reposo**

- a. Se pesaron aproximadamente 10 g de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC y se mezclaron en una cápsula de porcelana.
- b. Se añadió la mezcla de plásticos en el agua potable en reposo. Se agitó manualmente la mezcla de plásticos vírgenes por pocos segundos, para que los plásticos estén en contacto con el agua y pueda efectuarse la separación de los mismos.
- c. Se observó una separación rápida, los plásticos se recuperaron en la superficie del agua potable (producto flotado) y en el fondo del vaso de precipitación (producto sedimentado), pero se impuso un tiempo de separación de 3 minutos.
- d. Se retiraron ambos productos y se colocaron en la estufa a 80°C durante 2 horas, luego en el desecador por 20 minutos.

- e. Se realizó la clasificación manual de cada plástico virgen (PEAD, PP, PC, PET y PVC) en el producto flotado y producto sedimentado mediante la diferencia de colores y formas que caracterizan a cada plástico.
- f. Se pesó la cantidad de cada plástico en el producto flotado y sedimentado para calcular sus porcentajes de recuperación. La base de cálculo fue la cantidad total de cada plástico.

### **Agua potable en agitación magnética a 750 rpm**

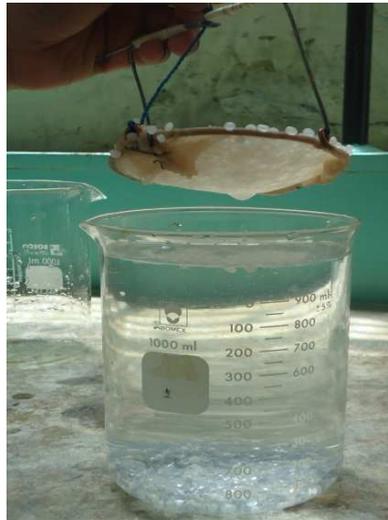
- a. Se colocó la mezcla de plásticos vírgenes (PEAD, PP, PC, PET y PVC) en el agua potable a 750 rpm durante de 3 minutos de agitación, como se indica en la Figura 2.20 (a).
- b. Después de la agitación se observó una separación rápida, con plásticos en la superficie del agua potable (producto flotado) y plásticos en el fondo del vaso de precipitación (producto sedimentado), como lo muestra la Figura 2.20 (b).



**Figura 2.20** (a) agitación a 750 rpm (b) separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable

- c. Se retiraron ambos productos, el producto flotado con un colador elaborado, como lo muestra la Figura 2.21. El producto sedimentado se retiró filtrando

toda el agua contenida en el vaso de precipitación. Ambos productos se colocaron en la estufa a 80°C durante 2 horas y luego en el desecador durante 20 minutos.



**Figura 2.21** Recolección de los productos flotado y sedimentado

- d. Se realizó la clasificación manual de cada plástico virgen (PEAD, PP, PC, PET y PVC) en el producto flotado y producto sedimentado mediante la diferencia de colores y formas que caracterizan a cada plástico, este proceso se indica en la Figura 2.22.



**Figura 2.22** Clasificación manual de los plásticos vírgenes

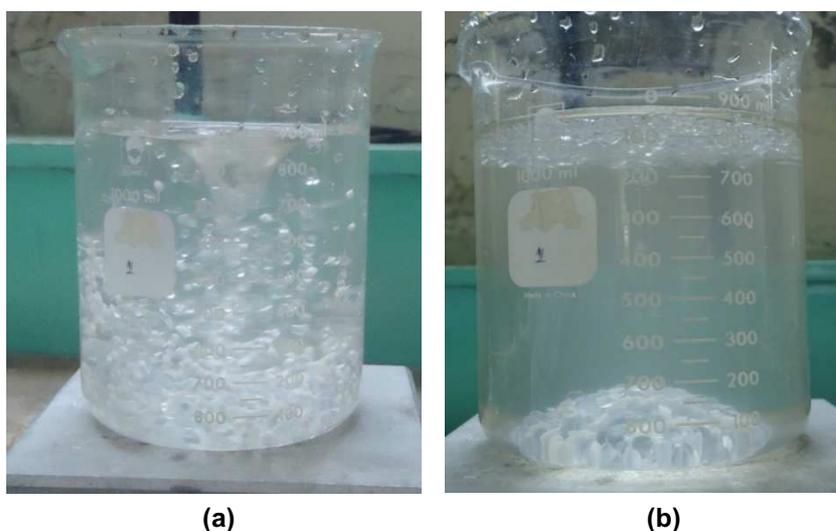
- e. Se pesó la cantidad de cada plástico en el producto flotado y sedimentado para calcular sus porcentajes de recuperación. La base de cálculo fue la cantidad total de cada plástico.

#### 2.2.4.4 Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con solución de cloruro de sodio de densidad $1,197 \text{ g/cm}^3$

Las condiciones de operación para la separación de la mezcla de PC, PET y PVC vírgenes fueron a velocidades de agitación magnética de 417 rpm y 750 rpm.

Para ambas condiciones el procedimiento fue el siguiente:

- Se llenó el vaso de precipitación con solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  se colocó sobre el agitador magnético a 417 rpm y 750 rpm.
- Se pesaron 10 g de cada plástico virgen PC, PET y PVC y se mezclaron en una cápsula de porcelana.
- Se agregó la mezcla de plásticos vírgenes en la solución de cloruro de sodio en agitación, como lo muestra la Figura 2.23 (a). Después de 3 minutos de agitación, la separación fue inmediata con plásticos en la superficie de la solución (producto flotado) y plásticos en el fondo del vaso de precipitación (producto sedimentado), como lo muestra la Figura 2.23 (b).



**Figura 2.23** (a) agitación a 750 rpm (b) separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$

- d. Se retiraron ambos productos y se colocaron en la estufa a 80°C durante 2 horas. Luego en el desecador durante 20 minutos.
- e. Se realizó la clasificación manual de cada tipo de plástico PC, PET y PVC en el producto flotado y producto sedimentado.

## **2.3 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS FACTIBLES DE RECICLAR**

### **2.3.1 INTRODUCCIÓN**

El muestreo y la caracterización tienen como objetivos principales:

- a. Acondicionar y seleccionar los tamaños de partículas del PEAD, PP, PC, PET y PVC.
- b. Caracterizar los plásticos reciclados para analizar la separación de cada plástico con base en los resultados obtenidos.

En la Figura 2.24 se indican las operaciones previas a la separación por diferencia de densidades.

### **2.3.2 MUESTREO DE RESIDUOS PLÁSTICOS FACTIBLES DE RECICLAR**

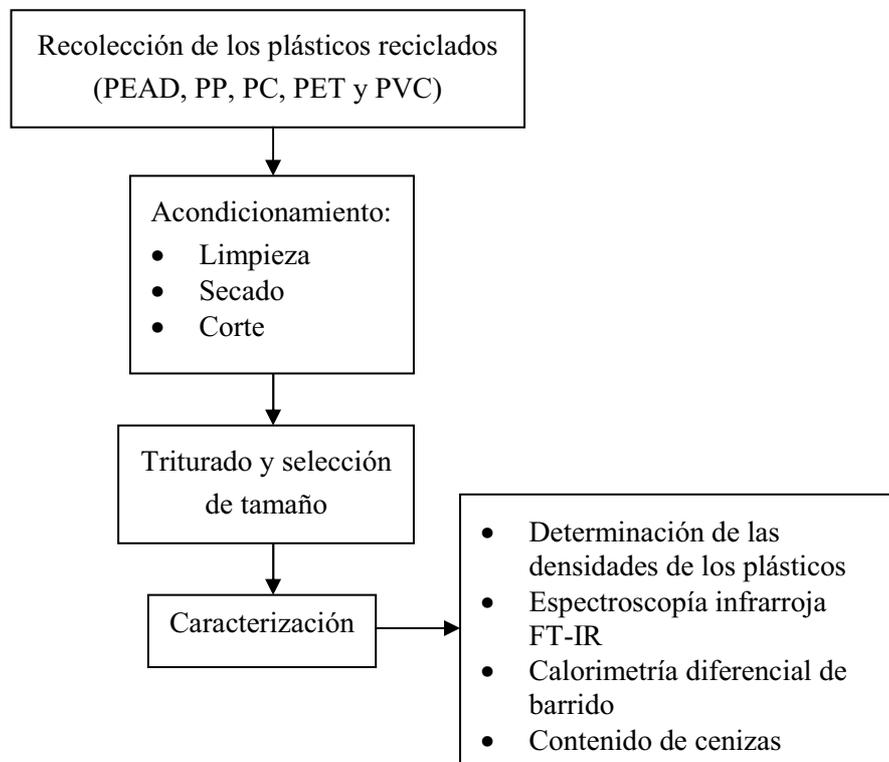
#### **2.3.2.1 Recolección (acopio)**

Para la recolección de las muestras de los residuos plásticos de PEAD, PP, PC, PET y PVC, a continuación se detallan las fuentes de las cuales fueron recogidas:

#### **PEAD**

Las muestras de residuos de PEAD fueron obtenidas a partir de botellas de productos alimenticios y botellas de productos de limpieza para el hogar, su selección del resto de botellas fue posible mediante el código de reciclaje del

PEAD, esta forma de identificación puede ser poco confiable para asegurar que las botellas fueron hechas de PEAD.



**Figura 2.24** Operaciones previas a la separación por diferencia de densidades

### **PP**

Las muestras de PP fueron obtenidas a partir de material post-industrial de una pequeña industria conocida como “GemmarPlas” la cual fabrica accesorios para sistemas de riego.

### **PET**

Las muestras de PET fueron recogidas a partir de botellas de bebidas de varias marcas de tamaños y formas diferentes. Su selección fue posible por la identificación mediante el código de reciclaje del PET. El código no asegura que las botellas sean hechas de PET por lo tanto será una posible fuente de error que influirá en la separación de las mezclas de residuos plásticos por diferencia de densidades.

## **PC**

Las muestras de residuos de PC fueron obtenidas de techos traslúcidos disponibles en una ferretería.

## **PVC**

Las muestras de residuos de PVC se obtuvieron de techos traslúcidos encontrados en una vulcanizadora.

### **2.3.2.2 Limpieza**

#### **Botellas de PEAD y PET**

Las botellas de PEAD y PET se les retiraron las tapas y anillos de seguridad que comúnmente son hechos de polipropileno, también se retiraron las etiquetas que generalmente son hechas de polietileno de baja densidad (PEBD), esto se realizó para poder obtener únicamente botellas de PEAD y PET.

Se realizó un primer lavado con agua en el interior y exterior de las botellas para eliminar la mayor parte de impurezas. Para facilitar la limpieza y eliminar cualquier tipo de sustancia difícil de localizar, las botellas se cortaron con una cuchilla en cuadrados de aproximadamente 5 cm por 5 cm para retirar los restos de adhesivos. Los trozos de PEAD y PET fueron lavados con agua y detergente para eliminar cualquier tipo de contaminante.

#### **Techos traslúcidos de PC y PVC**

Los techos traslúcidos de PC tenían las siguientes dimensiones 150 cm de alto y 80 cm de ancho. Para facilitar su manipulación y limpieza se cortaron por la mitad. Para la limpieza se utilizó agua y detergente y para el enjuague se utilizó una manguera de jardín.

Las dimensiones de los techos traslúcidos de PVC fueron 140 cm de alto y 80 cm de ancho. Para realizar la limpieza, los techos se cortaron por la mitad. Se utilizó agua caliente, detergente y un cepillo para retirar impurezas de aceite y grasas.

### **2.3.2.3 Secado**

Los trozos de PEAD y PET limpios se secaron con una franela limpia y seca, para que el secado sea rápido, confiable y seguro porque con la estufa el plástico se degradaba.

Para los techos translúcidos de PC y PVC se utilizó una franela seca y limpia porque las dimensiones de los techos impedían utilizar la estufa y a temperatura ambiente el tiempo de secado era mayor que si se secaba con la franela.

### **2.3.2.4 Corte**

Se realizó el corte de los techos translúcidos de PC y PVC para obtener cuadrados de aproximadamente de 5 cm por 5 cm, que fue hecho con una sierra eléctrica. Esto permitía el uso del molino de cuchillas para la reducción de tamaño.

### **2.3.2.5 Reducción y selección de tamaño**

En esta etapa se utilizó el molino de cuchillas marca Aguinera perteneciente al CIAP de la EPN, el cual se observa en la Figura 2.25. Primero se limpió el molino de cuchillas con un compresor de aire para retirar cualquier tipo de impureza sobrante de cualquier otro material antes triturado.

Los trozos de PC y PVC reciclados se introdujeron uno por uno para que el plástico no se obstruya en las cuchillas y sufra desgaste por fricción. Los tamaños de partícula que emergían del molino de cuchillas estaban grandes, por lo tanto se buscaron los tamices de números de mallas más grandes, los cuales se disponían en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la EPN.

Se utilizaron los tamices normalizados ASTM E-11 de números de mallas: # 4 (4,75 mm), # 6 (3,32 mm), # 8 (2,36 mm), # 12 (1,7 mm) y # 16 (1,18 mm). Para la

selección de los tamaños de partícula se tomaron en cuenta los tamaños que permitan realizar la clasificación manual de cada plástico al final de cada prueba separación por diferencia de densidades. Los rangos de tamaños convenientes comprendían entre  $-4,75+3,32$  mm y  $-3,32+2,36$  mm.



**Figura 2.25** Molino de cuchillas

En las figuras siguientes se observan el estado de los plásticos antes y después de ser reciclados.



(a)



(b)

**Figura 2.26** (a) PEAD post-consumo (b) PEAD reciclado



**Figura 2.27** PP post- industrial y PP reciclado



(a)



(b)

**Figura 2.28** (a) PET post-consumo (b) PET reciclado

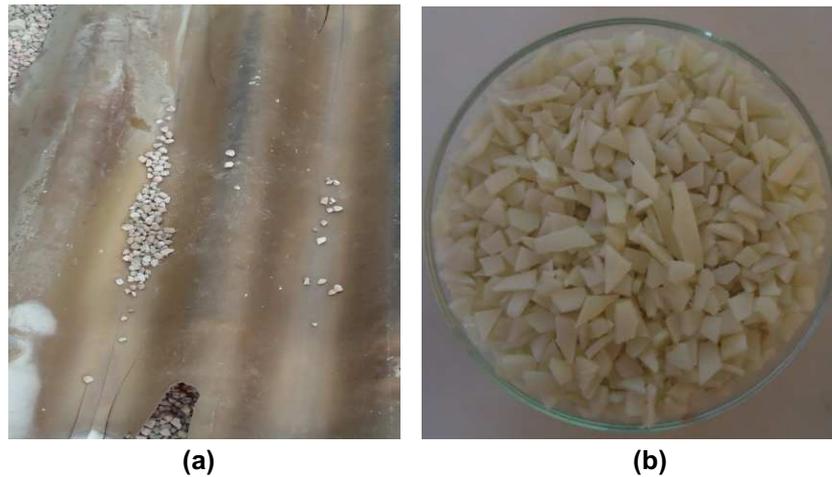


(a)



(b)

**Figura 2.29** (a) PC post-consumo (b) PC reciclado



**Figura 2.30** (a) PVC post-consumo (b) PVC reciclado

### **2.3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS RECICLADOS**

Las pruebas realizadas para la caracterización de los plásticos reciclados son las mismas que para los plásticos vírgenes:

- Determinación de las densidades
- Espectroscopía infrarroja
- Calorimetría diferencial de barrido
- Contenido de cenizas

## **2.4 EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS PLÁSTICOS**

### **2.4.1 COMPORTAMIENTO DE CADA PLÁSTICO RECICLADO: PEAD, PP, PC, PET y PVC EN AGUA POTABLE**

Se realizó para el PEAD, PP, PC, PET y PVC individualmente en el agua potable y se consideraron los tamaños de partícula comprendidos entre - 4,75 + 3,32 mm.

Se colocó cada plástico en el agua potable en reposo y agitación magnética a 417 rpm y 750 rpm con tiempos de agitación de 1, 3, y 5 minutos que permita la mejorar recuperación de cada plástico.

#### **2.4.2 COMPORTAMIENTO DE CADA PLÁSTICO RECICLADO: PC, PET y PVC EN LA SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO DE DENSIDAD 1,197 g/cm<sup>3</sup>**

El PC, PET y PVC se analizó individualmente en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>, los tamaños de partículas están comprendidos entre - 4,75 + 3,32 mm.

Cada plástico se colocó en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> en agitación magnética a 417 rpm y 750 rpm para obtener las mejores recuperaciones del PC en la superficie de la solución y del PET y PVC en el fondo del vaso de precipitación.

#### **2.4.3 SEPARACIÓN DE LA MEZCLA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PEAD, PP, PC, PET y PVC CON AGUA POTABLE**

El método de separación es igual al descrito para plásticos vírgenes, pero se analizó para los dos rangos de tamaños de partículas comprendidos entre - 4,75 + 3,32 mm y - 3,32 + 2,36 mm.

#### **2.4.4 SEPARACIÓN DE LA MEZCLA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PC, PET y PVC CON SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO DE DENSIDAD 1,197 g/cm<sup>3</sup>**

El método de separación es igual al descrito para plásticos vírgenes, pero se analizó con los dos rangos de tamaños de partículas comprendidos entre -4,75 + 3,32 mm y - 3,32 + 2,36 mm.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS DE MATERIAL VIRGEN

##### 3.1.1 DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES DE LOS MEDIOS DENSOS

###### 3.1.1.1 Determinación de la densidad del agua potable a 20°C

En la Tabla 3.1 se indica la densidad del agua potable determinada a 20 °C, su cálculo se presenta en el Anexo II.

**Tabla 3.1** Densidad del agua potable a 20°C

Medio denso	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Agua potable	0,9999

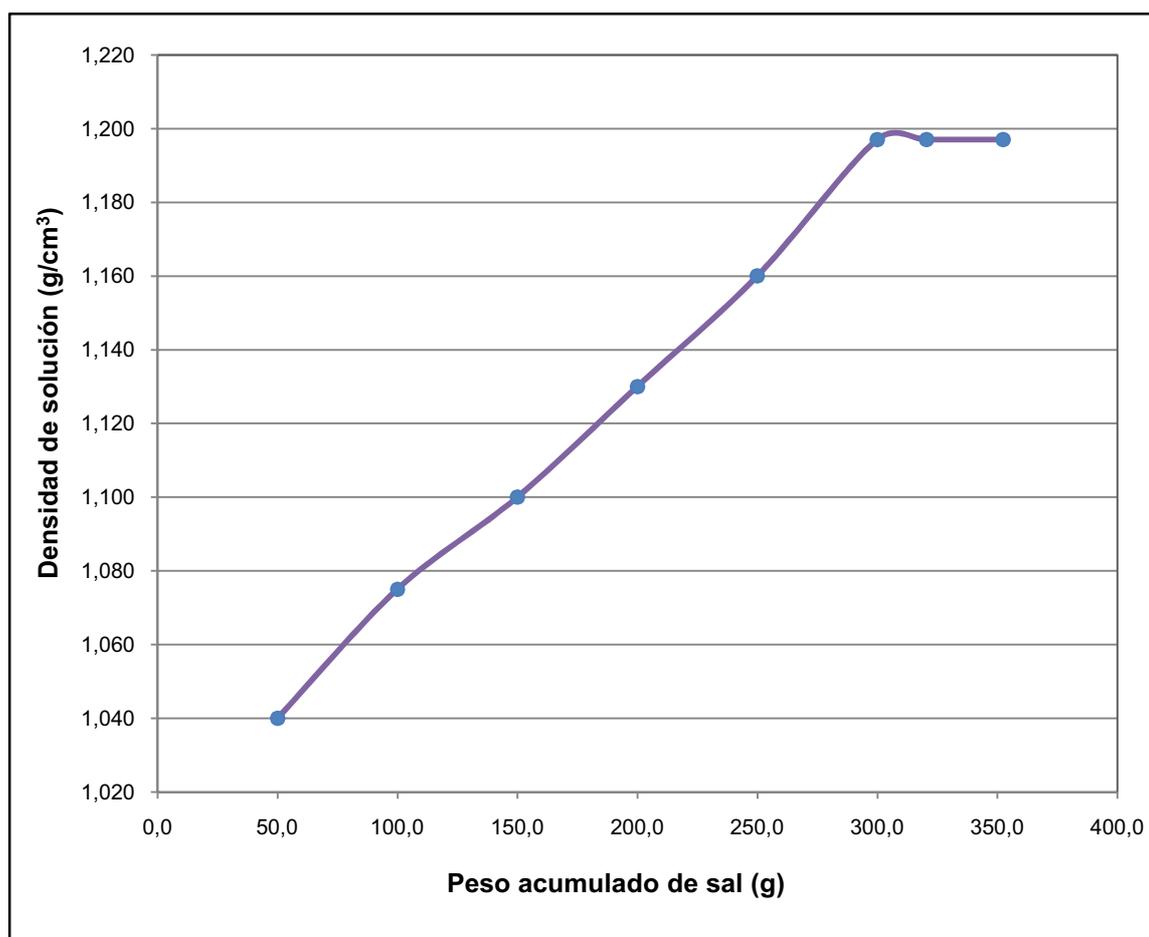
###### 3.1.1.2 Determinación de la densidad de la solución de cloruro de sodio

En la Tabla 3.2 y en la Figura 3.1, se pueden observar que la cantidad requerida mínima de sal común es igual a 300 g disueltos en 850 ml de agua destilada para obtener la densidad de la solución de cloruro de sodio igual a 1,197 g/cm<sup>3</sup>.

Cantidades superiores a 300 g de sal común en 850 ml de agua destilada provocan la saturación de la solución, que afecta la separación de los plásticos reciclados (PC, PET y PVC) porque las partículas de sal no disueltas se depositan en el fondo del vaso de precipitación y afectan la velocidad de rotación del agitador magnético (imán), es decir la agitación suministrada es menor a la agitación esperada por lo tanto afectará la separación de los plásticos.

**Tabla 3.2** Densidad de la solución de cloruro de sodio

<b>Peso añadido de sal</b>	<b>Peso acumulado de sal</b>	<b>Volumen de agua destilada</b>	<b>Volumen de solución</b>	<b>Densidad de solución</b>
(g)	(g)	(ml)	(ml)	(g/cm <sup>3</sup> )
50,0	50,0	850	870	1,040
50,0	100,0	850	880	1,075
50,0	150,0	850	900	1,100
50,0	200,0	850	920	1,130
50,0	250,0	850	940	1,160
50,0	300,0	850	960	1,197
20,5	320,5	850		1,197
32,0	352,5	850		1,197

**Figura 3.1** Densidad de la solución cloruro de sodio vs peso acumulado de sal

### 3.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS PLÁSTICOS VÍRGENES

#### 3.1.2.1 Determinación de las densidades de los plásticos vírgenes

En la Tabla 3.3, se muestran las densidades promedio calculadas y sus desviaciones estándar para cada plástico virgen. Las densidades experimentales de cada plástico se muestran en el Anexo III, para las cuales se aplicaron el criterio crítico Q y la prueba t para mejorar la exactitud de las mediciones realizadas. Para ello fueron necesarios los valores del criterio crítico Q y los valores críticos de t, que se muestran en el Anexo IV y Anexo V, respectivamente.

**Tabla 3.3** Densidades de los plásticos vírgenes

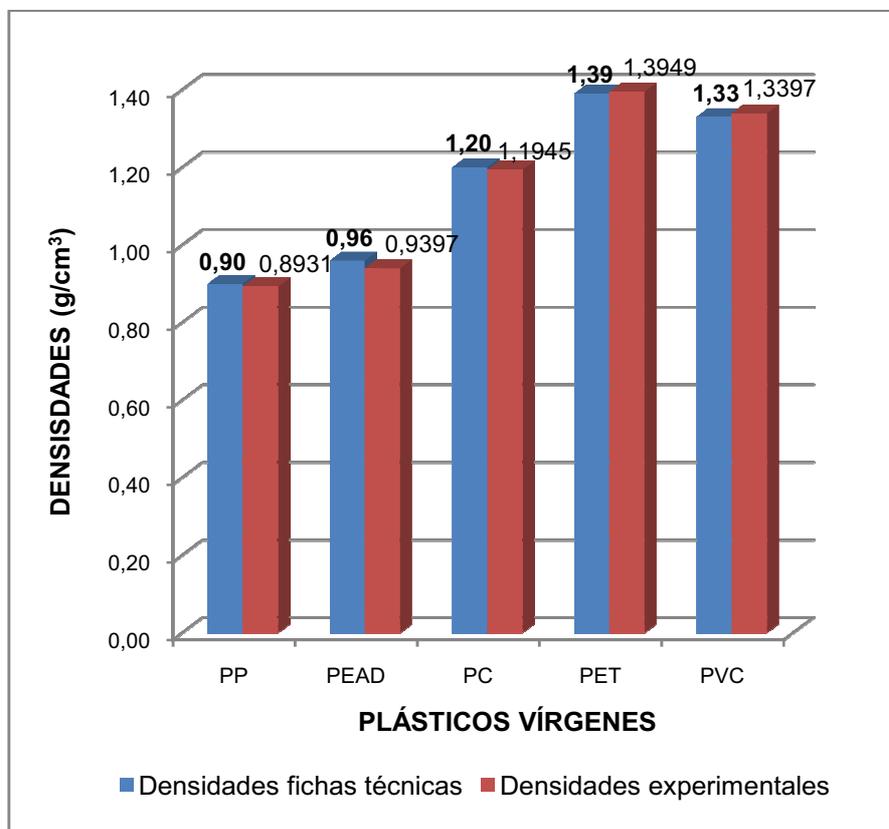
Plásticos vírgenes	Densidades promedio	Desviaciones estándar
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
PP	0,8931	0,0033
PEAD	0,9397	0,0045
PC	1,1945	0,0059
PET	1,3949	0,0054
PVC	1,3397	0,0036

En la Figura 3.2 se muestran las diferencias entre las densidades experimentales y las densidades de las fichas técnicas para los plásticos vírgenes.

El PP, PEAD y PC vírgenes tienen las densidades experimentales menores a las densidades de sus respectivas fichas técnicas, la razón puede ser por la diferencia en el método aplicado para la determinación de la densidad y la precisión de sus mediciones y resultados.

La densidad experimental del PET virgen es 1,3949 g/cm<sup>3</sup> se encuentra dentro del rango de densidades en su ficha técnica comprendidas entre 1,38 g/cm<sup>3</sup> a 1,40 g/cm<sup>3</sup>.

La densidad experimental del PVC virgen es  $1,3397 \text{ g/cm}^3$  comprendida entre  $1,31 \text{ g/cm}^3$  y  $1,35 \text{ g/cm}^3$  que es el rango de densidad del PVC en su ficha técnica.



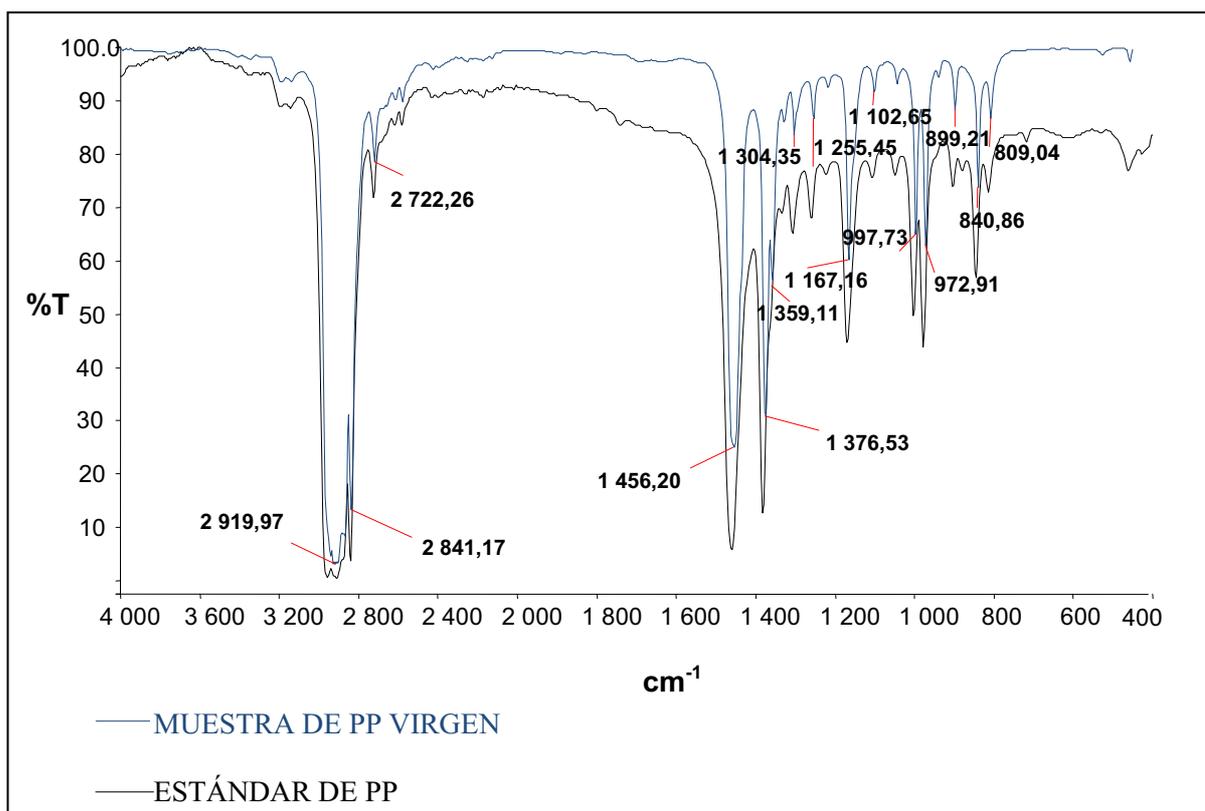
**Figura 3.2** Comparación entre las densidades en fichas técnicas y obtenidas experimentalmente

### 3.1.2.2 Espectroscopia infrarroja (IR)

#### **PP virgen**

En la Figura 3.3, se observa el espectro del PP virgen que evidencia que es PP por las bandas características, la interpretación de las bandas de absorción se muestran en la tabla 3.4. La ausencia de las bandas de absorción alrededor de  $1700 \text{ cm}^{-1}$  (características del grupo carbonilo) permite deducir que el PP no tiene aditivos y no está degradado.

La ausencia de bandas en el rango de  $750 - 700 \text{ cm}^{-1}$  permite asegurar de que se trata de un PP homopolímero. Las bandas de absorción en:  $1\ 304,35$ ,  $1\ 255,45$ ,  $1\ 167,16$ ,  $1\ 102,65$ ,  $997,73$ ,  $899,21$ ,  $840,86$  y  $809,04$  son bandas características del PP isotáctico. Por lo tanto el polipropileno virgen utilizado es un homopolímero isotáctico sin aditivos y no degradado.



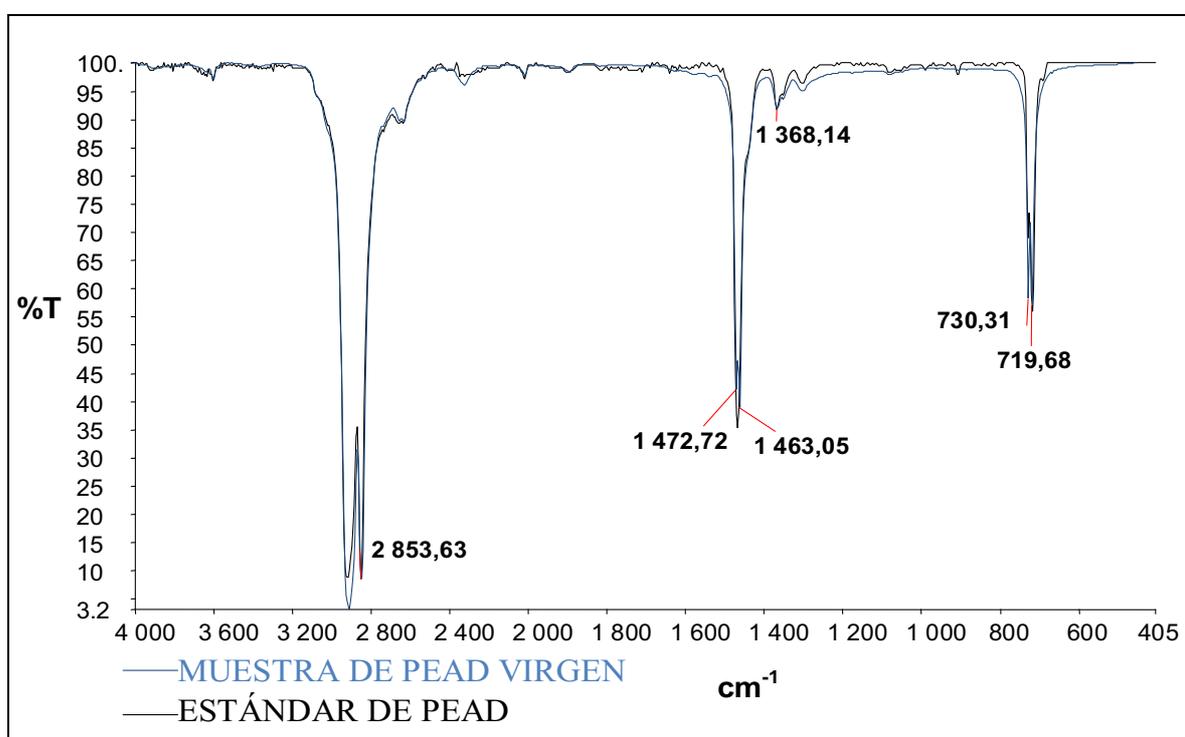
**Figura 3.3** Espectro del PP virgen

**Tabla 3.4** Interpretación de grupos funcionales del PP virgen

Grupo funcional	Nº de onda presente ( $\text{cm}^{-1}$ )
Metileno $\text{CH}_2$ : $\nu\text{-C-H-}$	$2\ 919,97 - 2\ 841,17 - 2\ 722,26$
Metileno $\text{CH}_2$ : $\delta\text{-C-H-}$	$1\ 456,20$
Metilo $\text{CH}_3$ : $\delta\text{-C-H-}$	$1\ 376,53$
Región de la huella dactilar	$1\ 359,11$
Región de la huella dactilar PP isotáctico	$1\ 304,35 - 1\ 255,45 - 1\ 167,16 - 1\ 102,65$ $997,73 - 899,21 - 840,86$ y $809,04$

### PEAD virgen

En la Figura 3.4, se puede observar las bandas de absorción características del PEAD. En la Tabla 3.5, se muestran los grupos funcionales y el enlace donde se produce la absorción de energía. La ausencia de las bandas de absorción en 1 378 y 1 380  $\text{cm}^{-1}$  indican que el PE no es de baja densidad. Presenta la banda de absorción en 1 368,14  $\text{cm}^{-1}$  que indica que el polietileno es de alta densidad.



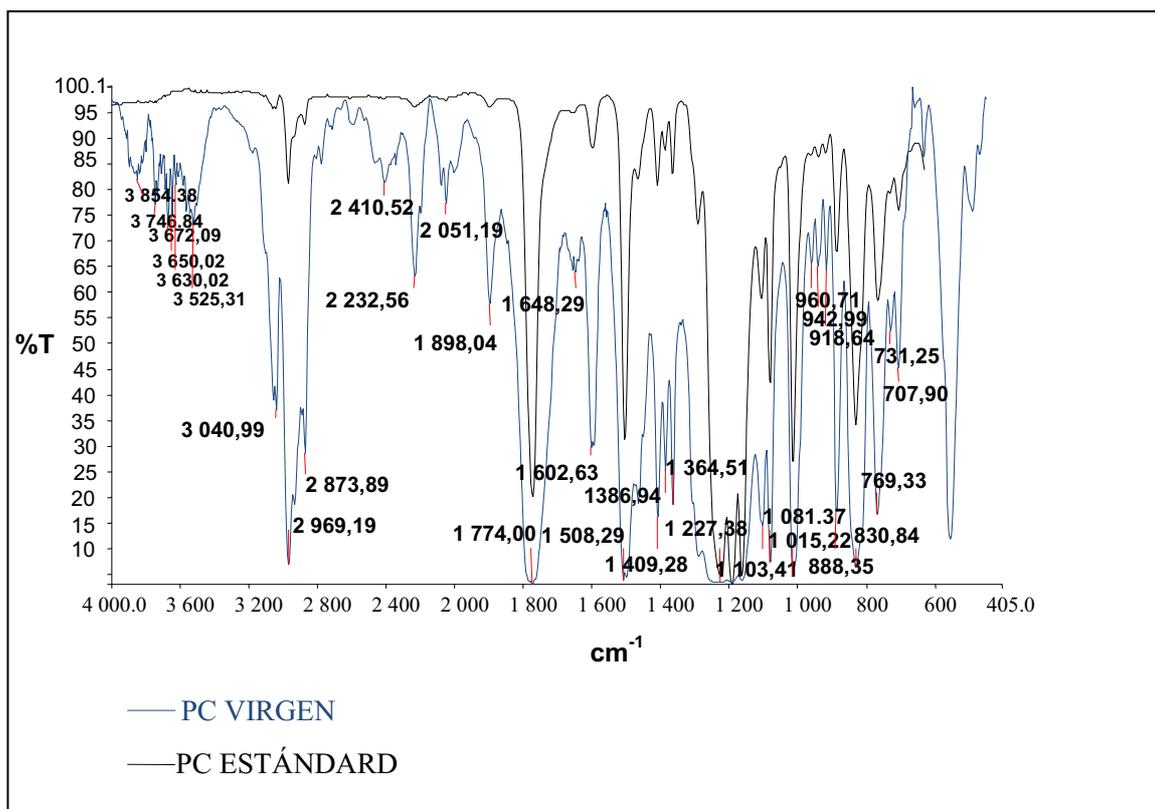
**Figura 3.4** Espectro de PEAD virgen

**Tabla 3.5** Interpretación de grupos funcionales del PEAD virgen

Grupo funcional	Nº de onda presente ( $\text{cm}^{-1}$ )
Metileno $\text{CH}_2$ : $\nu$ -C-H-	2 853,63
Metileno $\text{CH}_2$ : $\delta$ -C-H-	1 472,72 y 1 463,05
Bandas características	730,31 y 719,68

### PC virgen

En la Figura 3.5 se observan los espectros del PC virgen y PC estándar, el PC virgen tiene las mismas bandas de absorción que el PC estándar. Pero el PC virgen tiene las bandas de absorción en: 3 854,38, 3 746,84, 3 672,09, 3 650,02, 3 630,02, y 3 525,31  $\text{cm}^{-1}$  que no presenta el PC estándar, estas bandas indican que el PC virgen tiene humedad.



**Figura 3.5** Espectro del PC virgen

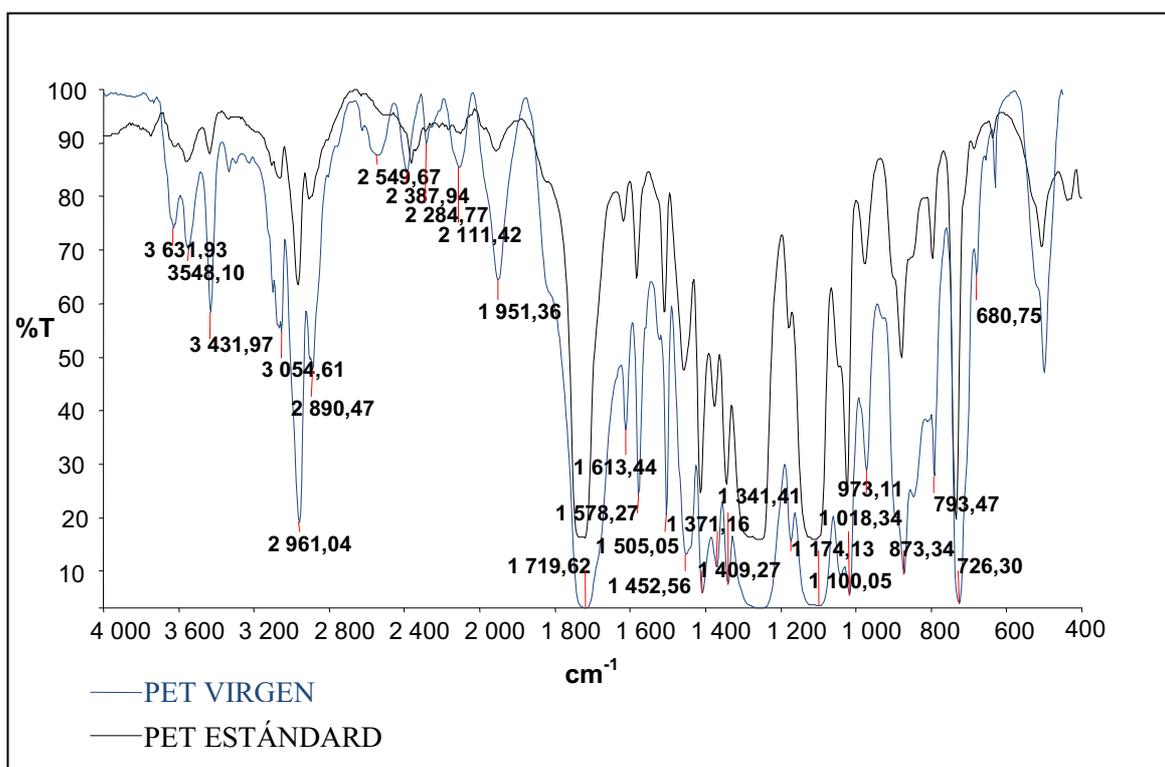
En la Tabla 3.6 se muestran las bandas de absorción donde se producen las absorciones de energía de los grupos funcionales característicos del PET y el tipo enlace que se tienen.

**Tabla 3.6** Interpretación de grupos funcionales del PC virgen

Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Humedad: ν -OH-	3 672,09 - 3 650,02 - 3 630,02 y 3 525,31
Aromáticos: ν C-H	3 040,99
Metilo CH <sub>3</sub> : ν C-H	2 969,19 y 2 873,89
Descompensación atmosférica	2 410,52 - 2 232,56 - 2 051,19 y 1 898,04
Carbonilo: ν C=O	1 774,00 y 1 648,29
Aromáticos: ν C=C	1 602,63 y 1 508,29
Metilo CH <sub>3</sub> : δ-C-H-	1 386,94 y 1 364,51
Región de la huella dactilar	1 409,28 - 1 227,38 - 1 103,41 - 1 081,37 y 1 015,22
Aromáticos: γ-C-H	960,71- 942,99 - 918,64 - 888,35 - 830,84 769,33 - 731,25 y 707,90

**PET virgen**

En la Figura 3.6 y en la Tabla 3.7, se observan el espectro y los grupos funcionales característicos del PET, en ambos no presentan la banda de absorción a 1 711 cm<sup>-1</sup> por tanto el PET no sufre degradación.

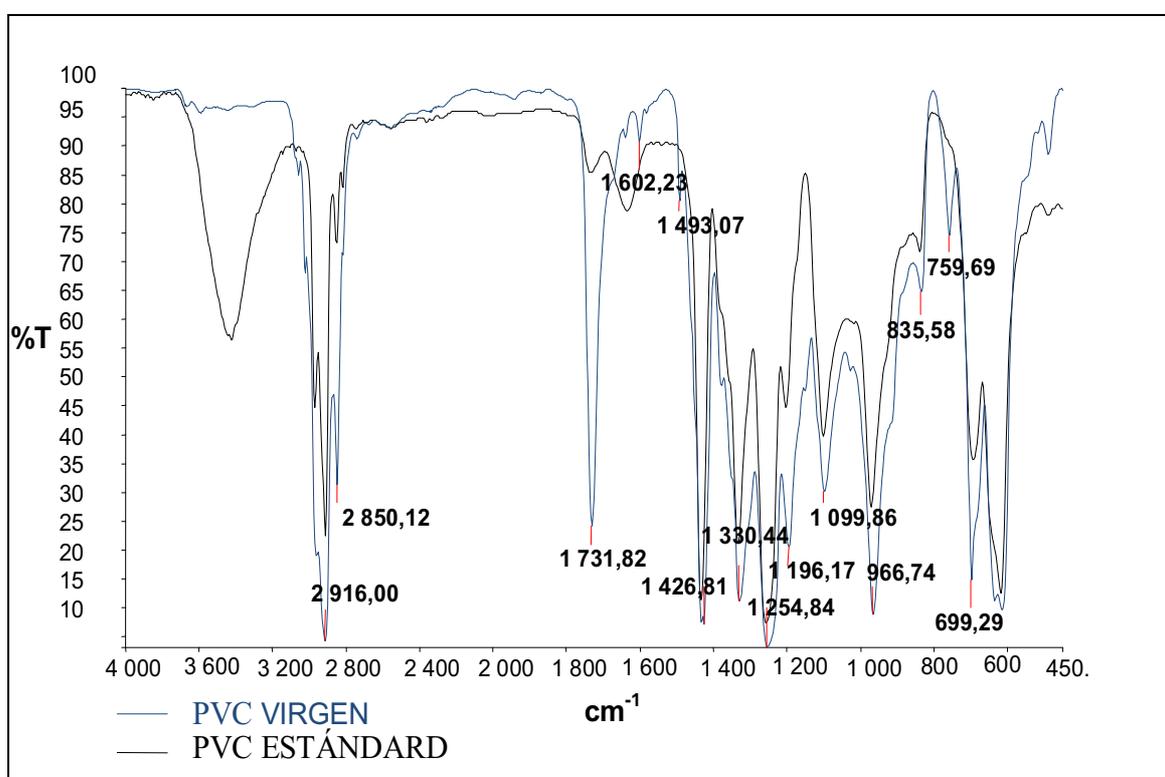
**Figura 3.6** Espectro del PET virgen

**Tabla 3.7** Interpretación de grupos funcionales del PET virgen

Grupo funcional	N° de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Humedad: $\nu$ -OH-	3 631,93- 3 548,10 y 3 431,97
Aromáticos: $\nu$ C-H	3 054,61
Metileno CH <sub>2</sub> : $\nu$ C-H	2 961,04 y 2 890,47
Descompensación atmosférica	2 549,67-2 387,94-2 284,77y 2 111,42
Aromáticos: $\delta$ -C-H-	1 951,36
Carbonilo: $\nu$ C=O	1 719,62
Aromáticos: $\nu$ C=C	1 613,44-1 578,27 y 1 505,05
Metileno CH <sub>2</sub> : $\delta$ C-H	1 452,56
Región de la huella dactilar	1 409,27 - 1 371,16 - 1 341,41 - 1 174,13 - 1 100,05 - 1 018,34
Aromáticos: $\gamma$ -C-H	973,11 - 873,34 - 793,47 - 726,30 y 680,75

**PVC virgen**

En la Figura 3.7, se observa el espectro del PVC virgen.

**Figura 3.7** Espectro de PVC virgen

En la Tabla 3.8 se muestran las bandas de absorción características del PVC. La absorción en 1 731,82 y 1 602,23 revelan que el PVC contiene plastificantes (grupos ftalatos).

**Tabla 3.8** Interpretación de grupos funcionales del PVC virgen

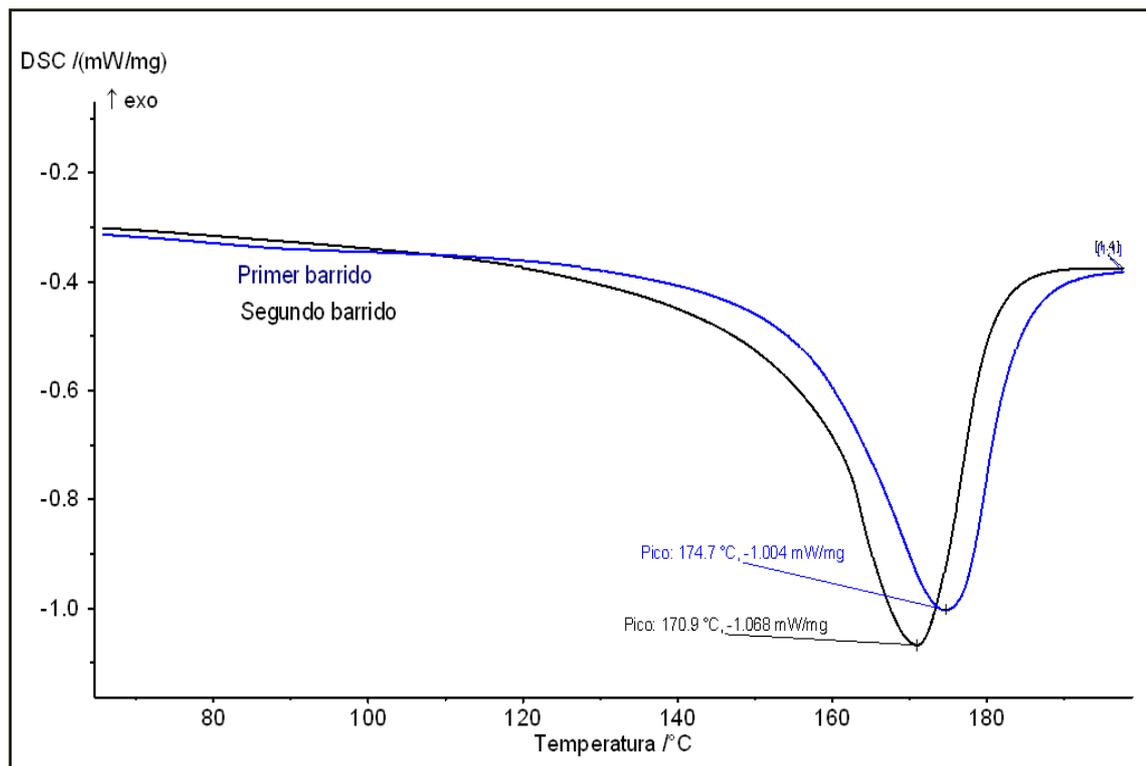
Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Metileno CH <sub>2</sub> : ν-C-H-	2 916,00 y 2 850,12
Carbonilo: ν C=O	1 731,82 y 1 602,23
Metileno CH <sub>2</sub> : δ C-H	1 493,07
Banda característica	1 426,81
Región de la huella de la molécula	1 330,44 - 1 196,17 - 1 099,86
C-Cl	966,74 - 835,58 - 759,69 y 699,29

### 3.1.2.3 Calorimetría diferencial de barrido

#### PP virgen

En la Figura 3.8, se muestra el termograma del PP virgen, el primer barrido revela la actual condición térmica del PP virgen pero interesa conocer la temperatura propia del PP que se revela en el segundo barrido.

La temperatura de fusión (T<sub>m</sub>) del PP virgen es 170,9 °C. La temperatura de fusión es mayor si es mayor el grado de cristalinidad del polímero, para el PP homopolímero isotáctico semicristalino (60-70%) la temperatura de fusión es 168°C, como se muestra en el Anexo VII, propiedades de los plásticos. Por lo tanto el PP virgen es un homopolímero isotáctico semicristalino con un posible grado de cristalinidad alrededor de 60-70%.



**Figura 3.8** Termograma del PP virgen

### **PEAD virgen**

En la Figura 3.9, se muestra el termograma del PEAD virgen, el cual revela la temperatura de fusión del PEAD virgen igual 138,8°C, en su ficha técnica es igual a 134°C, para ambas determinaciones se utilizó el método estándar ASTM D 3418 por calorimetría diferencial de barrido pero se asume que esta diferencia sea por las condiciones ambientales y el equipo utilizado.

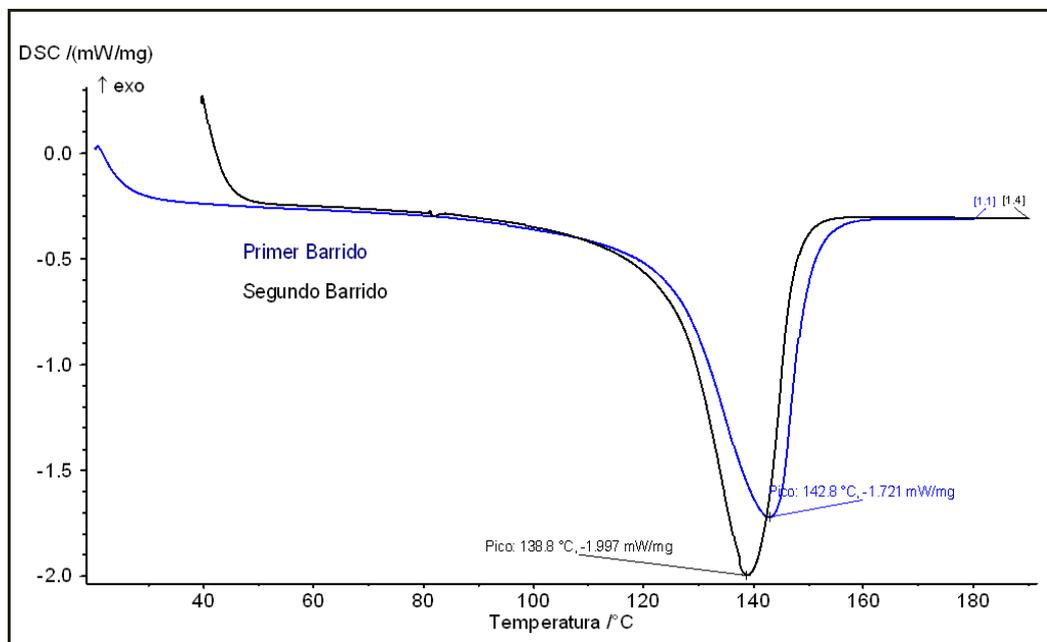
### **PC virgen**

La Figura 3.10, muestra el termograma del PC, que por ser un plástico amorfo posee temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) igual a 152,1°C, la temperatura de transición vítrea bibliográfica es igual a 145°C, como se muestra en el Anexo VII.

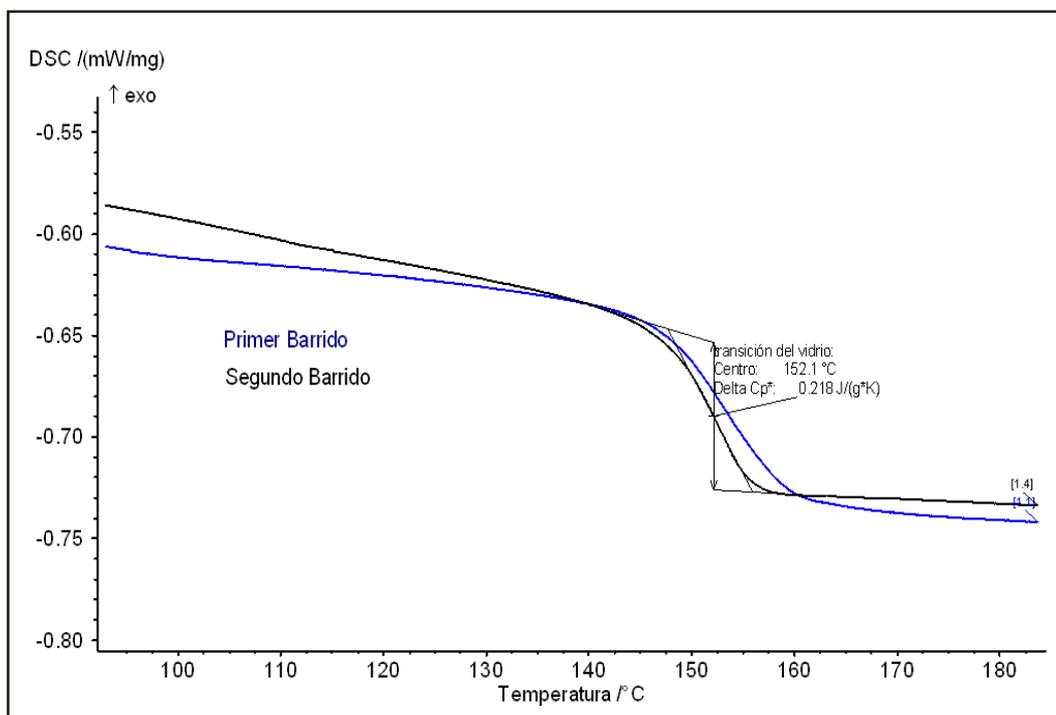
### **PET virgen**

En la Figura 3.11, se observa el termograma del PET, que es amorfo cuya  $T_g$  igual a 81,3 °C y es semicristalino con  $T_m$  igual a 248,1 °C. En la ficha técnica la

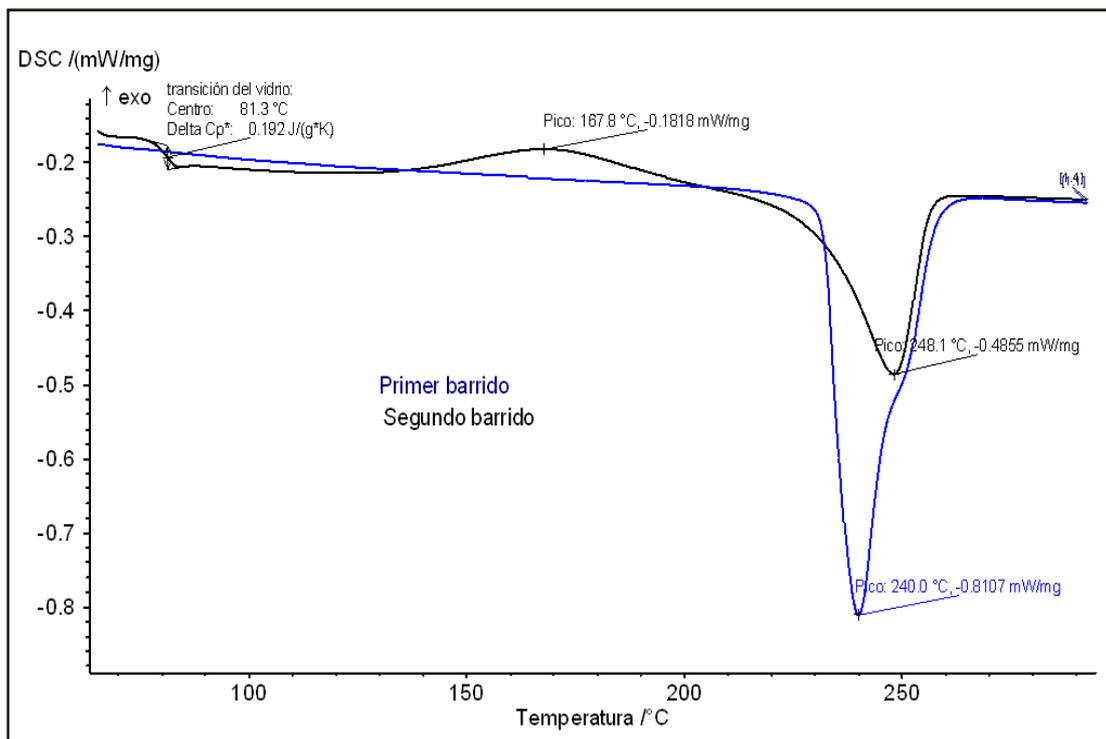
Tm es igual a 240°C. La Tm bibliográfica varía entre 250 °C a 260 °C y la Tg bibliográfica varía entre 70 °C a 80 °C, como se muestra en el Anexo VII.



**Figura 3.9** Termograma del PEAD virgen



**Figura 3.10** Termograma del PC virgen



**Figura 3.11** Termograma del PET virgen

#### 3.1.2.4 Contenido de cenizas

En la Tabla 3.9 se indican los contenidos promedios de cenizas de cada plástico expresado en porcentaje, sus cálculos se muestran en el Anexo VIII. El PP virgen tiene un contenido de cenizas de 0,0039 %, no tiene una cantidad significativa de aditivos.

El PEAD virgen tiene 0,0129 % de cenizas que puede ser por las cargas inorgánicas utilizadas para darle el color blanco brillante a los pellets. El PC tiene un contenido de cenizas mayor que los otros plásticos vírgenes igual a 0,0485 %.

El PET tiene un contenido de cenizas igual a 0,0237 % se supone por el color blanco que posee obtenido por la adición de pigmentos que son cargas inorgánicas.

**Tabla 3.9** Contenido de cenizas de los plásticos vírgenes

Plásticos	Contenido de cenizas	
	(%)	Desviación estándar
PP	0,0039	0,0012
PEAD	0,0129	0,0013
PC	0,0485	0,0348
PET	0,0227	0,0237

### 3.1.3 SEPARACIÓN DE LA MEZCLA DE PLÁSTICOS VÍRGENES: PEAD, PP, PC, PET y PVC

#### 3.1.3.1 Comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable

El comportamiento se analizó para el PEAD, PP, PC, PET y PVC vírgenes individualmente, se tomó de cada plástico 10 g y se colocó en 1 000 ml de agua potable sin y con agitación magnética

La Tabla 3.10 muestra los porcentajes de recuperación promedio del PEAD, PP, PC, PET y PVC vírgenes en agua potable sin agitación. Los cálculos se muestran en el Anexo IX. El PC virgen es el único plástico que tiene recuperación en ambos productos, mientras que el PEAD y PP se recuperan en el flotado y el PET y PVC en el sedimentado.

**Tabla 3.10** Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable en reposo

Plásticos vírgenes	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PEAD	100	0,00	0,00
PP	100	0,00	0,00
PC	0,29	99,71	0,28
PET	0,00	100	0,00
PVC	0,00	100	0,00

En la Tabla 3.11, se muestran los comportamientos individuales del PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable con velocidad de agitación de 417 rpm. Las recuperaciones son promedio y los cálculos se muestran en el Anexo IX. El PET y PVC tienen recuperaciones en el flotado y sedimentado, que no ocurría en el agua potable en reposo. Las recuperaciones del PET y PVC son similares debido a sus densidades parecidas e iguales a 1,3949 y 1,3397 g/cm<sup>3</sup> respectivamente. Para la agitación magnética a 417 rpm se utilizaron los imanes de agitación de diámetro\*longitud iguales a (10\*50) mm y (10\*68) mm que no alteraron las recuperaciones de cada plástico.

**Tabla 3.11** Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable con velocidad de agitación magnética de 417 rpm

Plásticos vírgenes	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PEAD	100	0,00	0,00
PP	100	0,00	0,00
PC	0,87	99,13	0,80
PET	0,35	99,65	0,27
PVC	0,26	99,74	0,37

En la Tabla 3.12, el PEAD y PP no se consideraron para el comportamiento en agua potable a 750 rpm porque en los ensayos anteriores sus recuperaciones fueron del 100 % en el flotado.

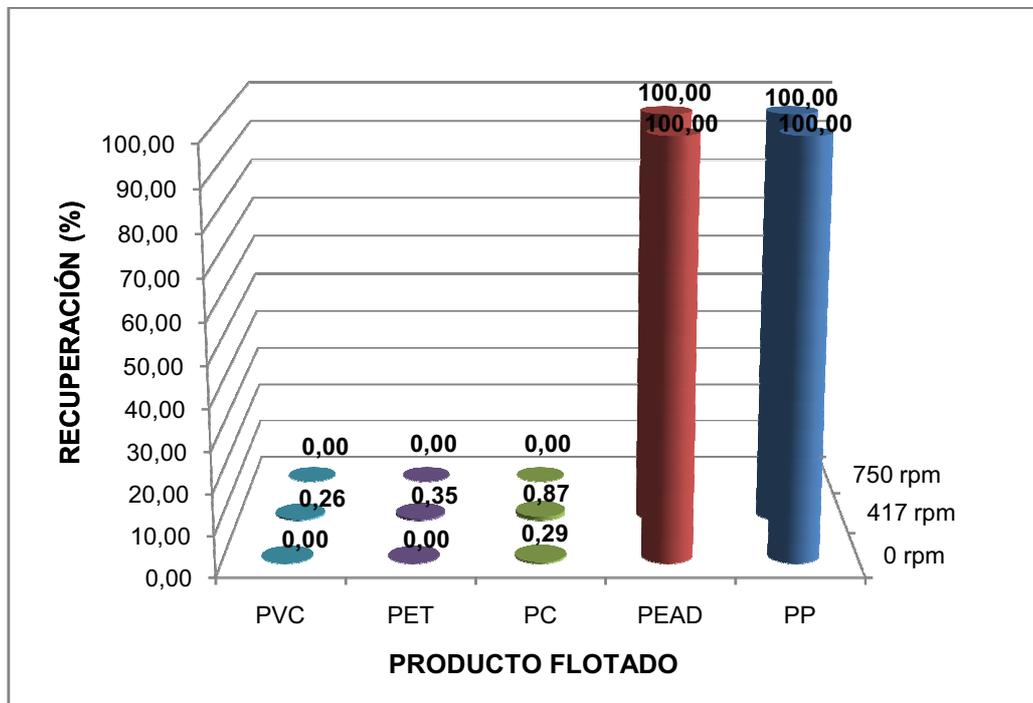
Para la agitación magnética a 750 rpm se utilizaron los imanes de agitación de las dimensiones diámetro\*longitud: (10\*50) mm, (10\*68) mm y (10\*40) mm que no modificaron las recuperaciones de cada plástico en el flotado y sedimentado.

El comportamiento del PC, PET y PVC es eficiente en agua potable a 750 rpm porque tienen porcentajes de recuperación del 100 % en el sedimentado.

**Tabla 3.12** Resultados del comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en agua potable con velocidad de agitación magnética de 750 rpm

Plásticos vírgenes	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	0,00	100,00	0,00
PET	0,00	100,00	0,00
PVC	0,00	100,00	0,00

La Figura 3.12 muestra las recuperaciones del PEAD, PP, PC, PET y PVC vírgenes en el producto flotado que fue analizado de manera individual. El comportamiento del PC, PET y PVC en agua potable a 417 rpm no es eficiente se tienen recuperaciones en el flotado de: PC 0,87 %, PET 0,35 % y PVC 0,26 %. La agitación a 750 rpm permite el comportamiento eficiente del PC, PET y PVC sus recuperaciones son del 0 % de cada plástico en el producto flotado.



**Figura 3.12** Comportamiento de cada plástico virgen en agua potable, para ensayos con y sin agitación magnética

### 3.1.3.2 Comportamiento de cada plástico virgen: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>

El comportamiento del PC, PET y PVC se analiza de manera individual, para lo cual se utiliza 960 ml de solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> y 10 g de plástico virgen (PC, PET y PVC).

En la Tabla 3.13 se presentan las recuperaciones promedio de PC, PET y PVC en el producto flotado y producto sedimentado a la velocidad de agitación magnética de 417 rpm. Los cálculos se muestran en el Anexo IX.

**Tabla 3.13** Resultados del comportamiento de los plásticos vírgenes: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

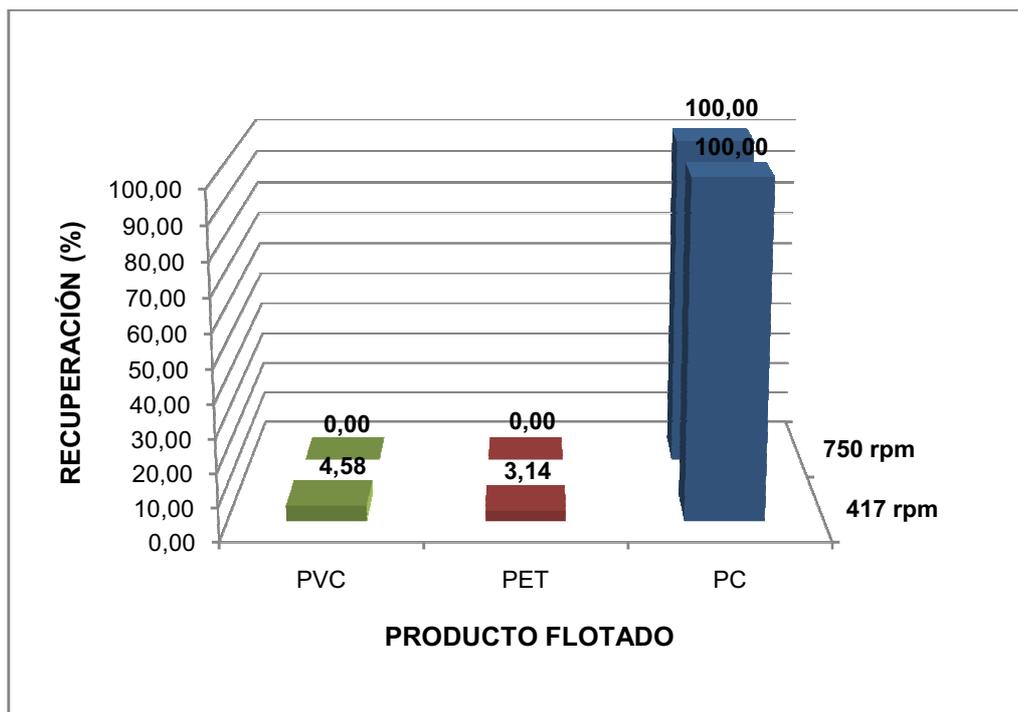
Plásticos vírgenes	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	100	0	0
PET	3,14	96,86	2,61
PVC	4,58	95,42	2,92

La Tabla 3.14 muestra las recuperaciones promedio del PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm.

**Tabla 3.14** Resultados del comportamiento de los plásticos vírgenes: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

Plásticos vírgenes	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	100,00	0,00	0,00
PET	0,00	100,00	0,00
PVC	0,00	100,00	0,00

En la Figura 3.13 se observa que la condición de operación óptima es con velocidad de agitación magnética igual a 750 rpm para la recuperación del 100 % PC flotado, 0 % de PET flotado y 0 % de PVC flotado. Consecuentemente la separación de cada plástico es eficiente en la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  con agitación magnética a 750 rpm.



**Figura 3.13** Comportamiento de cada plástico virgen en la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  con agitación magnética

### 3.1.3.3 Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable

La Tabla 3.15 muestra que la separación de las poliolefinas (PP y PEAD) de los plásticos PC, PET y PVC no es eficiente con agua potable en reposo. Existen recuperaciones del PC de  $5,25 \pm 2,43 \%$ , PET de  $0,18 \pm 0,19 \%$  y del PVC de  $0,65 \pm 0,56 \%$ .

**Tabla 3.15** Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PEAD, PP, PC, PET y PVC con agua potable en reposo y tiempo de reposo 3 minutos

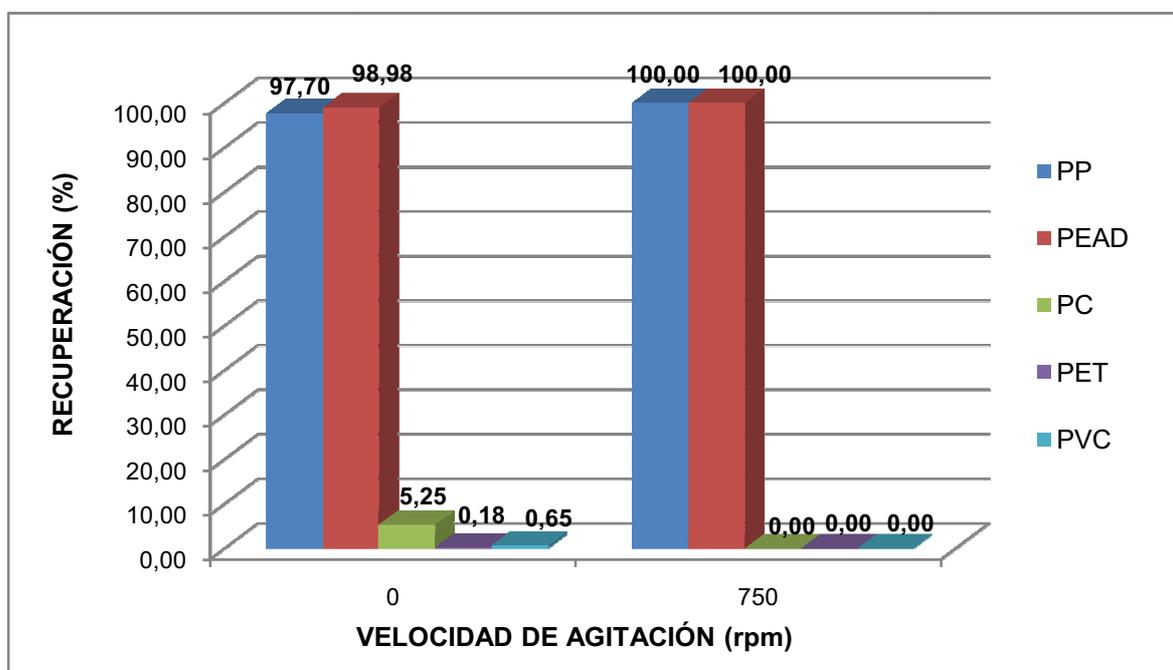
# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,0809	9,7607	0,8224	0,0127	0,1417	98,82	96,59	8,07	0,12	1,41
	Sedimentado	0,1203	0,3446	9,3740	10,3688	9,8950	1,18	3,41	91,93	99,88	98,59
	Total	10,2012	10,1053	10,1964	10,3815	10,0367	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,9994	9,9404	0,6789	0,0128	0,0571	99,08	99,14	6,74	0,13	0,57
	Sedimentado	0,0930	0,0860	9,3977	10,0139	10,0074	0,92	0,86	93,26	99,87	99,43
	Total	10,0924	10,0264	10,0766	10,0267	10,0645	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	9,9591	9,9699	0,4665	0,0156	0,0277	99,44	98,38	4,63	0,16	0,28
	Sedimentado	0,0560	0,1637	9,5999	10,0054	9,9757	0,56	1,62	95,37	99,84	99,72
	Total	10,0151	10,1336	10,0664	10,0210	10,0034	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	Flotado	9,9649	9,6453	0,5201	0,0512	0,0975	99,56	96,25	5,19	0,51	0,97
	Sedimentado	0,0442	0,3757	9,4959	9,9959	9,9276	0,44	3,75	94,81	99,49	99,03
	Total	10,0091	10,0210	10,0160	10,0471	10,0251	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
5	Flotado	9,8429	9,8407	0,1644	0,0000	0,0000	98,02	98,15	1,64	0,00	0,00
	Sedimentado	0,1988	0,1852	9,8422	10,0402	10,0394	1,98	1,85	98,36	100,00	100,00
	Total	10,0417	10,0259	10,0066	10,0402	10,0394	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					97,70	98,98	5,25	0,18	0,65
	Sedimentado	Recuperación promedio (%)					2,30	1,02	94,75	99,82	99,35
	Flotado	Desviación estándar (%)					1,23	0,61	2,43	0,19	0,56
	Sedimentado	Desviación estándar (%)					1,23	0,61	2,43	0,19	0,56

En la Tabla 3.16, se muestran las recuperaciones del PP, PEAD, PC, PET y PVC en el producto flotado iguales a: 100 %, 100 %, 0 %, 0 %, y 0 % respectivamente. Por lo tanto la separación de las poliolefinas (PP y PEAD) del PC, PET y PVC es eficiente con agua potable y agitación magnética a 750 rpm durante 3 minutos.

La Figura 3.14 muestra la comparación entre la separación de las poliolefinas (PP y PEAD) del PC, PET y PVC sin agitación y con agitación magnética a 750 rpm ambas condiciones durante 3 minutos.

**Tabla 3.16** Separación del PP y PEAD del PC, PET y PVC vírgenes con agua potable, velocidad de agitación magnética 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,0111	10,0302	0,0000	0,0000	0,0000	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0000	10,0487	10,0859	10,0227	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
	Total	10,0111	10,0302	10,0487	10,0859	10,0227	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	10,1715	10,2179	0,0000	0,0000	0,0000	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0000	10,1316	10,2585	10,1304	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
	Total	10,1715	10,2179	10,1316	10,2585	10,1304	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,1407	10,3341	0,0000	0,0000	0,0000	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0000	10,1625	10,2253	10,0048	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
	Total	10,1407	10,3341	10,1625	10,2253	10,0048	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	Flotado	10,0111	10,0307	0,0000	0,0000	0,0000	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0000	10,0487	10,0859	10,0227	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
	Total	10,0111	10,0307	10,0487	10,0859	10,0227	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	Recuperación promedio (%)					0,00	0,00	100,00	100,00	100,00



**Figura 3.14** Separación de los plásticos vírgenes PEAD, PP del PC, PET y PVC en agua potable con y sin agitación magnética durante 3 minutos

### 3.1.3.4 Separación de la mezcla de plásticos vírgenes: PC, PET y PVC con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>

La Tabla 3.17 muestra la separación del PC del PET y PVC con la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>, velocidad de agitación magnética 417 rpm y tiempo de agitación de 3 minutos. Los porcentajes de recuperación en el producto flotado son: PET 1,70 ± 0,88 %, esta cantidad no es problema si es procesado con el PC porque ambos plásticos son estructuralmente compatibles (poliésteres), y PVC igual a 5,38 ± 1,28 % que si es procesado con PC el producto obtenido estará degradado porque sus estructuras y temperaturas de procesamiento son incompatibles.

**Tabla 3.17** Separación del PC del PET y PVC vírgenes con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup>, velocidad de agitación magnética 417 rpm y tiempo de agitación 3 minutos.

# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	<b>Flotado</b>	10,0792	0,1012	0,4948	<b>100,00</b>	<b>1,01</b>	<b>4,92</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	9,9143	9,5657	<b>0,00</b>	<b>98,99</b>	<b>95,08</b>
	Total	10,0792	10,0155	10,0605	100,00	100,00	100,00
2	<b>Flotado</b>	10,0006	0,2090	0,4063	<b>99,60</b>	<b>2,09</b>	<b>4,05</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0397	9,8027	9,6301	<b>0,40</b>	<b>97,91</b>	<b>95,95</b>
	Total	10,0403	10,0117	10,0364	100,00	100,00	100,00
3	<b>Flotado</b>	10,0230	0,2769	0,5494	<b>99,62</b>	<b>2,76</b>	<b>5,48</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0385	9,7572	9,4796	<b>0,38</b>	<b>97,24</b>	<b>94,52</b>
	Total	10,0615	10,0341	10,0290	100,00	100,00	100,00
4	<b>Flotado</b>	10,0141	0,0939	0,7100	<b>99,67</b>	<b>0,94</b>	<b>7,08</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0333	9,9316	9,3123	<b>0,33</b>	<b>99,06</b>	<b>92,92</b>
	Total	10,0474	10,0255	10,0223	100,00	100,00	100,00
	<b>Flotado</b>	Recuperación promedio (%)			<b>99,72</b>	<b>1,70</b>	<b>5,38</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,28</b>	<b>98,30</b>	<b>94,62</b>
	<b>Flotado</b>	Desviación estándar (%)			<b>0,19</b>	<b>0,88</b>	<b>1,28</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,19</b>	<b>0,88</b>	<b>1,28</b>

La Tabla 3.18 muestra la recuperación del PC en el flotado igual a 100 %, la recuperación del PET 0 % y PVC igual a 0 % después de separar la mezcla de plásticos vírgenes con la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  con velocidad de agitación de 750 rpm.

**Tabla 3.18** Separación del PC del PET y PVC vírgenes con solución de cloruro de sodio densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , velocidad de agitación magnética 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos.

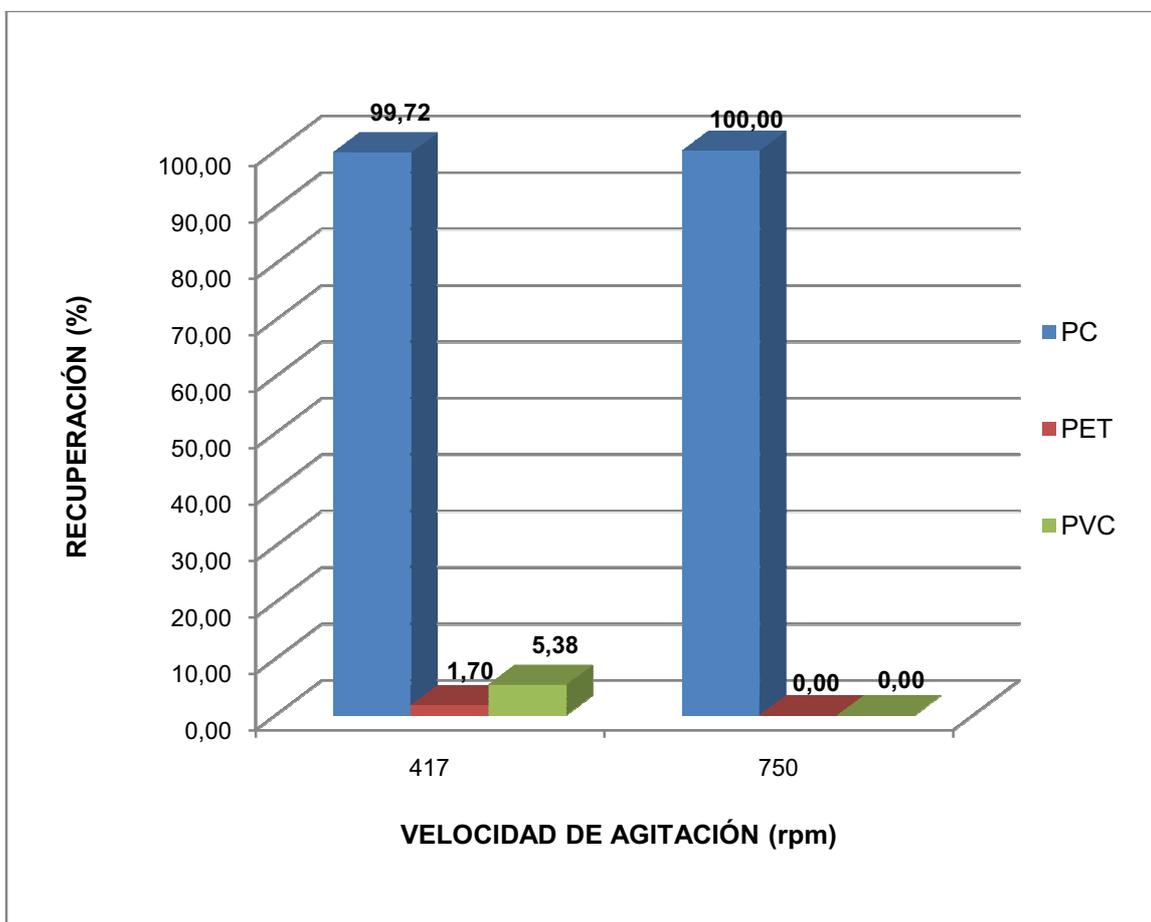
# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,0083	0,0000	0,0000	100,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	10,0949	10,0400	0,00	100,00	100,00
	Total	10,0083	10,0949	10,0400	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	10,0284	0,0000	0,0000	100,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	10,0743	10,0418	0,00	100,00	100,00
	Total	10,0284	10,0743	10,0418	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,0867	0,0000	0,0000	100,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0000	10,1090	10,0583	0,00	100,00	100,00
	Total	10,0867	10,1090	10,0583	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)			100,00	0,00	0,00
	Sedimentado				0,00	100,00	100,00

En la Figura 3.15, se indica la influencia de la velocidad de agitación magnética en la separación del PC del PET y PVC vírgenes. Se observa que a la velocidad de agitación magnética de 750 rpm las recuperaciones en el producto flotado son: 100 % de PC, 0 % de PET y 0 % de PVC, por lo tanto la separación del PC del PET y PVC vírgenes es eficiente con solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197$ , velocidad de agitación 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos.

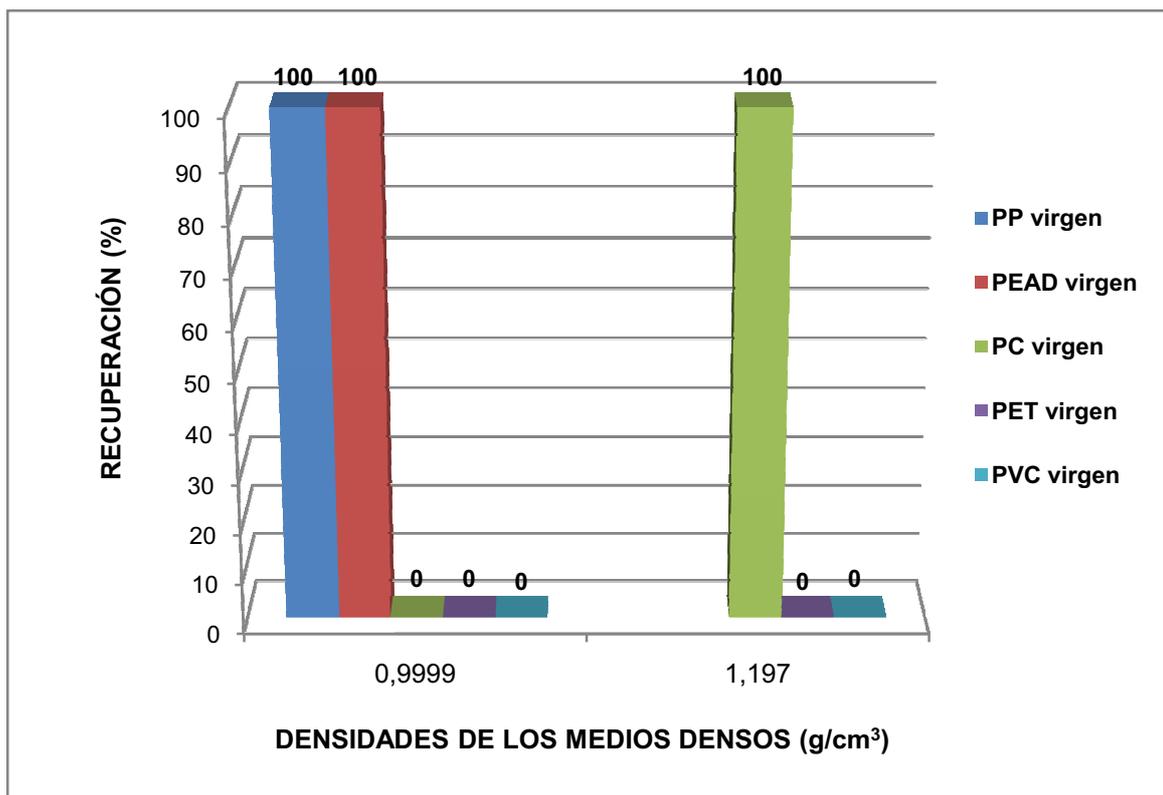
En la Figura 3.16, se observa que la separación del PP y PEAD del PC, PET y PVC vírgenes es eficiente con agua potable cuya densidad es igual a  $0,9999 \text{ g/cm}^3$ , velocidad de agitación magnética de 750 rpm y tiempo de agitación 3

minutos. Las recuperaciones en el producto flotado son: 100 % de PP, 100 % de PEAD, 0 % de PC, 0 % de PET y 0 % de PVC.

En la misma figura se observa que la separación del PC del PET y PVC vírgenes es eficiente si se utiliza como medio denso la solución de cloruro de sodio de densidad igual a  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , velocidad de agitación magnética de 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos. Las recuperaciones en el producto flotado son: 100 % de PC, 0 % de PET, 0 % de PVC.



**Figura 3.15** Separación de los plásticos vírgenes PC del PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  con agitación magnética durante 3 minutos



**Figura 3.16** Separación de los plásticos vírgenes PEAD, PP, PC, PET y PVC con medios densos diferentes, velocidad de agitación 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos

## 3.2 MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS FACTIBLES DE RECICLAR

### 3.2.1 DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES DE LOS PLÁSTICOS RECICLADOS

En la Tabla 3.19 se muestran las densidades del PEAD, PP, PC, PET y PVC reciclados. Para todos los plásticos reciclados excepto el PET se determinaron las densidades con tamaños de partícula mayores a 4,75 mm. La densidad del PET se determinó en función del tamaño y forma de la partícula debido a que su densidad experimental no concuerda con la densidad bibliográfica que está comprendida entre 1,38 a 1,40 g/cm<sup>3</sup>, como se muestra en el Anexo VII. Se determinó la densidad del PET con tamaños de partícula diferentes, tamaños mayores a 4,75 mm y tamaños entre -4,75 + 3,32 mm y de forma circular obtenido

con la perforadora. La densidad experimental del PET de forma circular es la más cercana a la densidad bibliográfica.

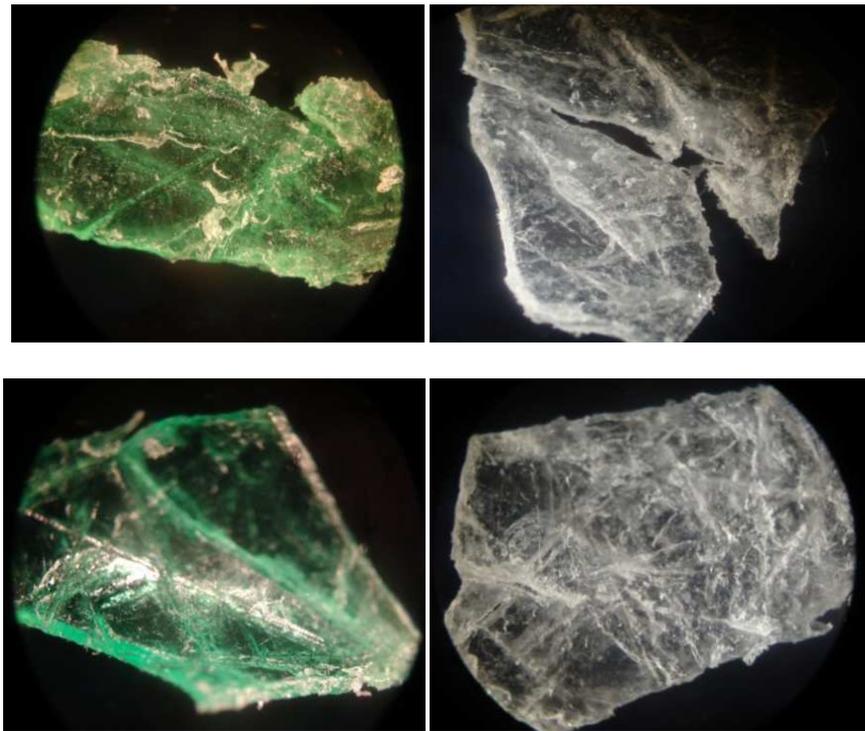
**Tabla 3.19** Densidades experimentales de los plásticos reciclados

Plásticos reciclados	Densidades promedio	Desviaciones estándar
	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )
PEAD	0,9106	0,0071
PP	0,8431	0,0114
PC	1,1763	0,0077
PET (tamaños diferentes)	1,1320	0,0666
PET (tamaños > 4,75 mm)	1,1721	0,0148
PET (tamaños -4,75 + 3,32 mm)	1,2870	0,0123
PET perforado	1,3512	0,0304
PVC	1,3375	0,0148

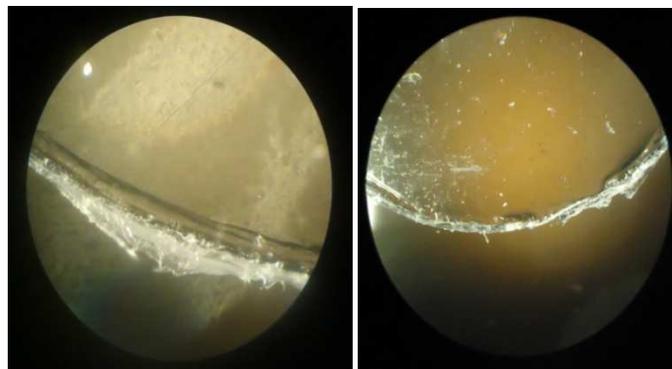
La Figura 3.17, son fotografías que muestran la apariencia del PET triturado, observadas desde el lente de un microscopio, éstas muestran grietas y cavidades dentro de las cuales pueden quedar aprisionadas burbujas de aire que afectan la densidad del PET. Las hojuelas de PET tienen formas aerodinámicas que provocan una leve flotación por tanto modifican la densidad efectiva del PET.

En la Figura 3.18, se muestran fotografías del PET perforado observadas a través del lente de un microscopio. El PET perforado tiene pequeñas irregularidades en los filos pero la superficie es compacta y no permite alojar burbujas de aire que provoquen alteración en la densidad del PET por tanto la densidad del PET perforado es igual a 1,3512 g/cm<sup>3</sup> muy parecida a la densidad bibliográfica del PET, como lo muestran los datos presentados en el Anexo VII.

En la Figura 3.19 se indican las diferencias entre las densidades de los plásticos reciclados y plásticos vírgenes. La mayor discrepancia se produce entre la densidad del PET virgen y la densidad del PET reciclado, que se debe a la forma y tamaño del PET reciclado.



**Figura 3.17** Fotografías del PET reciclado triturado



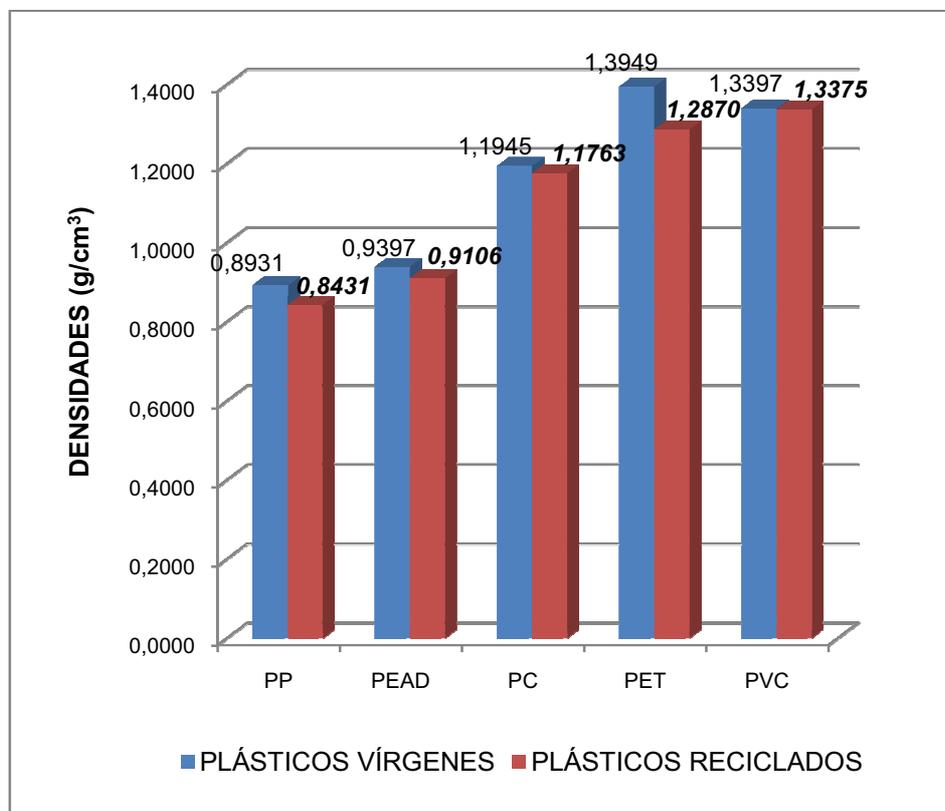
**Figura 3.18** Fotografías del PET reciclado perforado

### 3.2.2 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA (IR)

#### **PP reciclado**

En la Figura 3.20 y Tabla 3.20, se muestran el espectro del PP reciclado y la interpretación de las bandas de absorción, para asegurar el tipo de polipropileno.

La ausencia de bandas en el rango de  $750\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  permite asegurar que el PP es homopolímero.



**Figura 3.19** Comparación entre las densidades del PEAD, PP, PC, PET y PVC vírgenes y reciclados

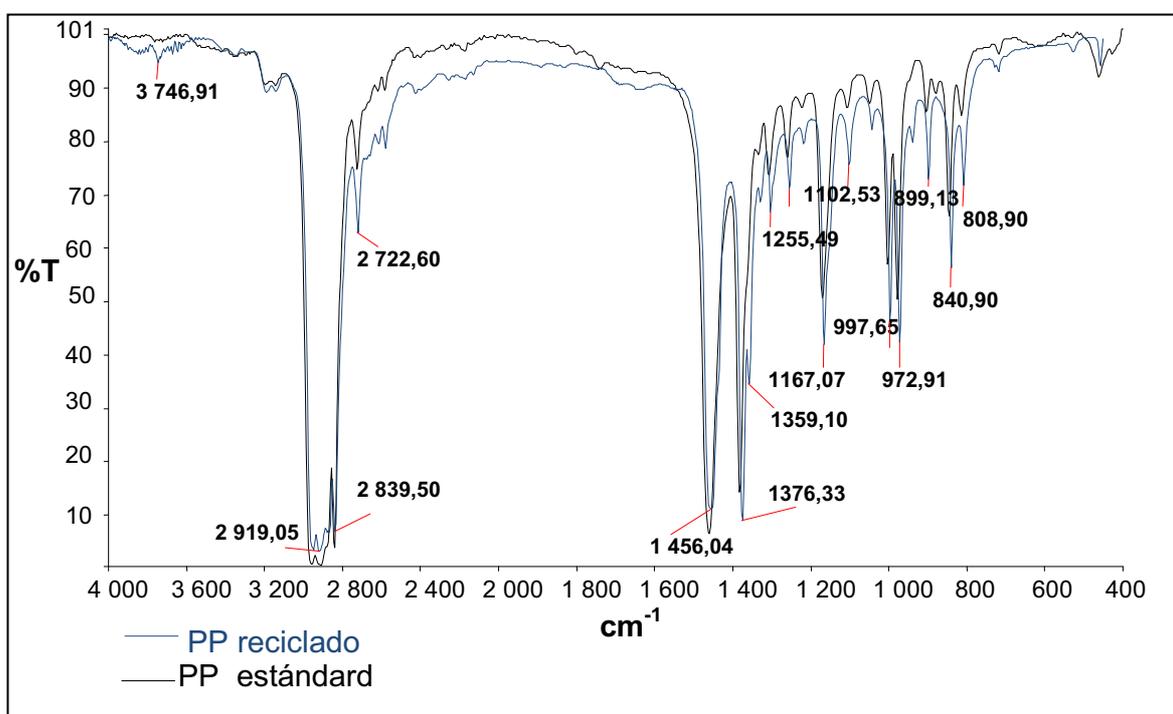
Las bandas de absorción en  $1\ 304,16$ ,  $1\ 255,49$ ,  $1\ 167,07$ ,  $1\ 102,53$ ,  $997,65$ ,  $899,13$ ,  $840,90$  y  $808,90\text{ cm}^{-1}$  son bandas de absorción características del PP isotáctico. La ausencia de bandas cerca a  $1\ 700\text{ cm}^{-1}$  permite asegurar que el PP reciclado no posee aditivos y no ha sufrido degradación.

### **PEAD reciclado**

En la Tabla 3.21 se presentan los grupos funcionales y el enlace donde se produce la absorción de energía.

Se analizó el espectro del PEAD reciclado observado en la Figura 3.21, el cual tiene las mismas bandas de absorción que el PEAD virgen con variaciones pequeñas en los dos números decimales.

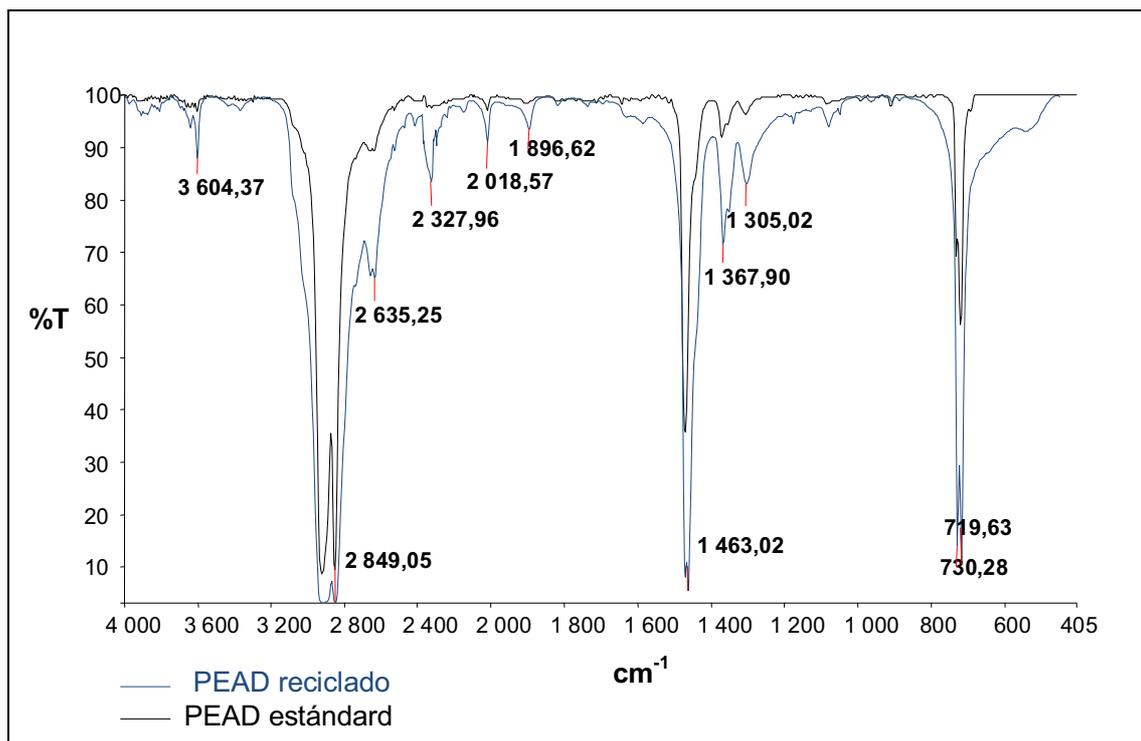
La identificación estructural de la molécula es la misma para los dos polietilenos de alta densidad. El polietileno reciclado tiene la banda de absorción en  $1\,367,90\text{ cm}^{-1}$  que permite asegurar que es de alta densidad.



**Figura 3.20** Espectro PP reciclado

**Tabla 3.20** Interpretación de grupos funcionales del PP reciclado

Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Metileno CH <sub>2</sub> : ν-C-H-	2 919,05 - 2 839,50 - 2 722,60
Metileno CH <sub>2</sub> : δ-C-H-	1 456,04
Metilo CH <sub>3</sub> : δ-C-H-	1 376,33
PP isotáctico	1 304,16 - 1 255,49 - 1 167,07 - 1 102,53 997,65-899,13-840,90 y 808,90



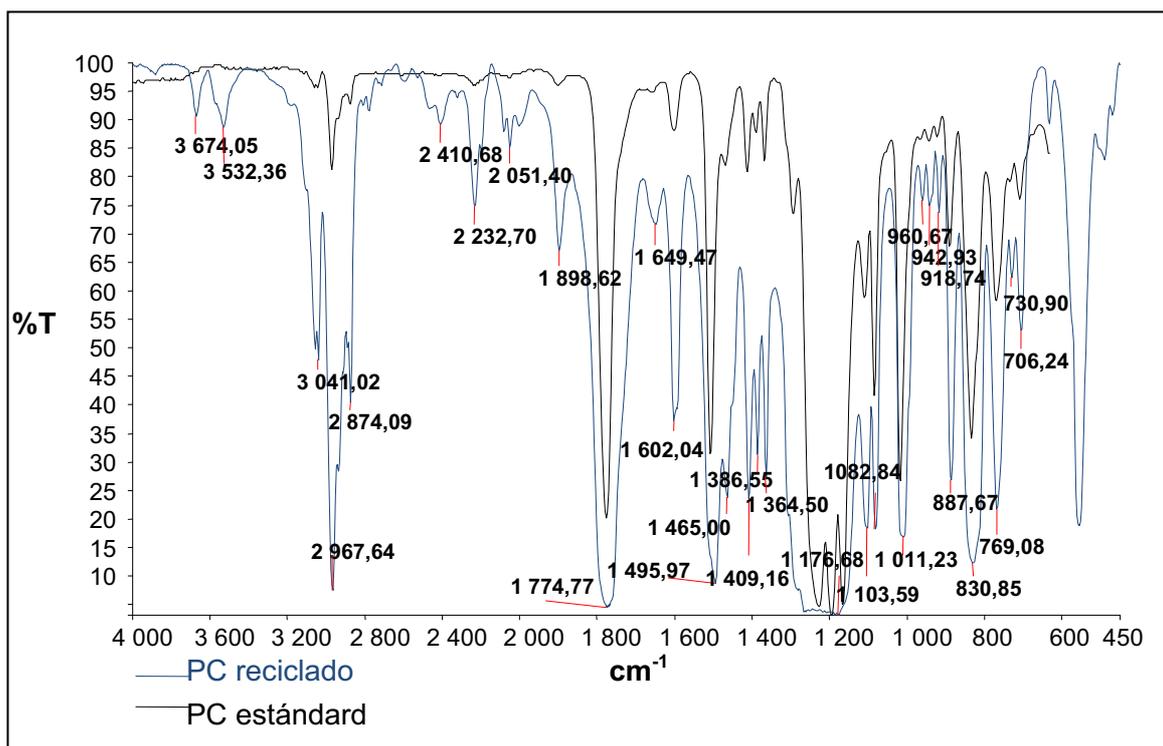
**Figura 3.21** Espectro PEAD reciclado

**Tabla 3.21** Interpretación de grupos funcionales del PEAD reciclado

Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Descompensación atmosférica	3 604,37
Metileno CH <sub>2</sub> : ν-C-H-	2 849,05
Descompensación atmosférica	2 635,25 - 2 327,96 - 2 018,57 - 1 896,62
Alta densidad	1 367,90
Región de la huella de la molécula	1 305,02
Bandas características	730,28 y 719,63

### **PC reciclado**

En la Figura 3.22 y Tabla 3.22, muestran el espectro del PC e interpretación de las bandas de absorción, el PC virgen tiene mayor número de bandas de absorción de humedad que el PC reciclado. Las bandas de absorción de humedad comunes son 3 674,05 y 3 525,36. Por tanto se asume que el PC virgen tiene mayor contenido de humedad.



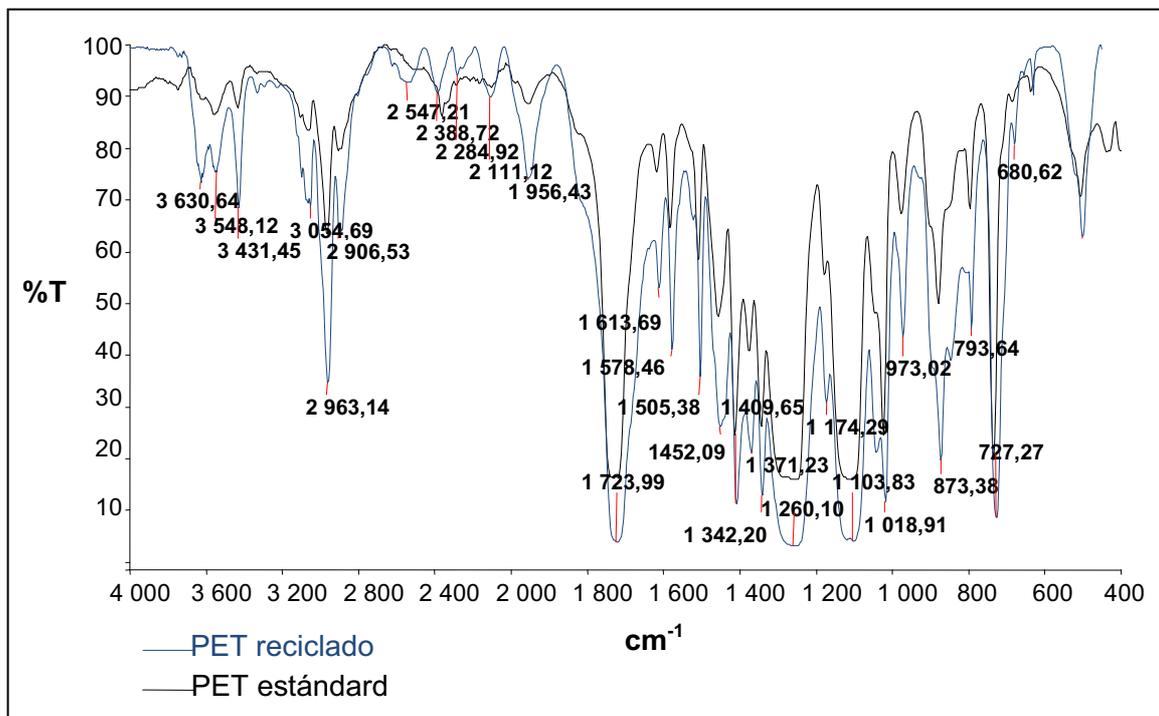
**Figura 3.22** Espectro de PC reciclado

**Tabla 3.22** Interpretación de grupos funcionales del PC reciclado

Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Humedad: $\nu$ -OH-	3 674,05 y 3 532,36
Aromáticos: $\nu$ -CH-	3 041,02
Metil CH <sub>3</sub> : $\nu$ -CH-	2 967,64 y 2 874,09
Descompensación atmosférica	2 410,68 - 2 232,70 - 2 051,40 - 1 898,62
Carbonilo: $\nu$ C=O	1 774,77 y 1 649,47
Aromáticos: $\nu$ C=C	1 602,04 - 1 495,97 y 1 465,00
Región de la huella de la molécula	1 409,16
Metil CH <sub>3</sub> : $\delta$ -CH-	1 386,55 y 1 364,50
Región de la huella de la molécula	1 176,68 - 1 103,59 - 1 082,84 y 1 011,23
Aromáticos: $\gamma$ -C-H	960,67-942,93-918,74-887,67-830,85-769,08-730,90 y 706,24

### PET reciclado

En la Figura 3.23 y Tabla 3.23, se muestran el espectro y la interpretación de las bandas de absorción del PET reciclado.



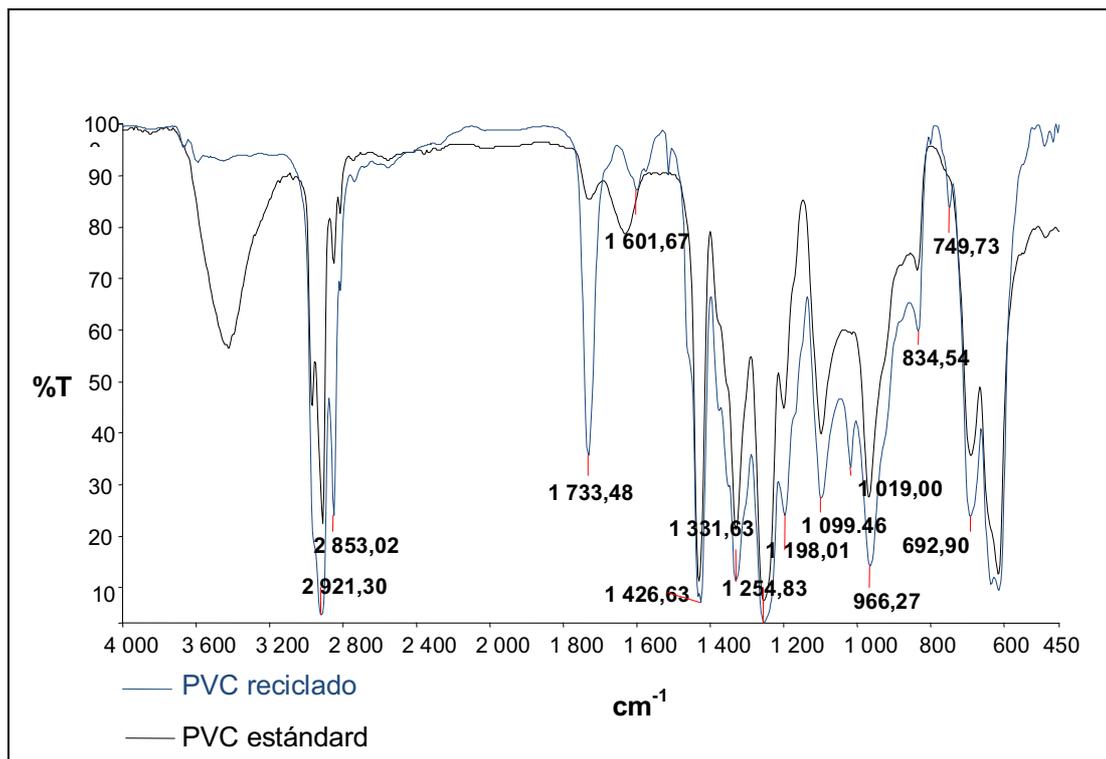
**Figura 3.23** Espectro de PET reciclado

**Tabla 3.23** Interpretación de grupos funcionales del PET reciclado

Grupo funcional	Nº de onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Humedad: $\nu$ -OH-	3 630,64- 3 548,12 y 3 431,45
Aromáticos: $\nu$ -CH-	3 054,69
Metileno CH <sub>2</sub> : $\nu$ -CH-	2 963,14 y 2 906,53
Aromáticos: $\delta$ -CH-	1 956,43
Carbonilo: $\nu$ C=O	1 723,99
Aromáticos: $\nu$ C=C	1 613,69 - 1 578,46 - 1 505,38
Metileno CH <sub>2</sub> : $\delta$ -CH-	1 452,09
Región de la huella de la molécula	1 409,65-1 371,23 - 1 342,20 - 1 342,20 - 1 260,10 - 1 174,29 - 1 103,83 y 1 018, 91
Aromáticos: $\gamma$ -C-H	973,02-873,38-793,64- 727,27 y 680,62

### PVC reciclado

En la Figura 3.24 y Tabla 3.24, se muestran el espectro del PVC reciclado y la interpretación de las bandas de absorción, las bandas de absorción en 1 733,48 y 1 601,67 correspondientes a ftalatos (en su estructura tienen el grupo carbonilo) muestran que está plastificado igual que el PVC virgen.



**Figura 3.24** Espectro de PVC reciclado

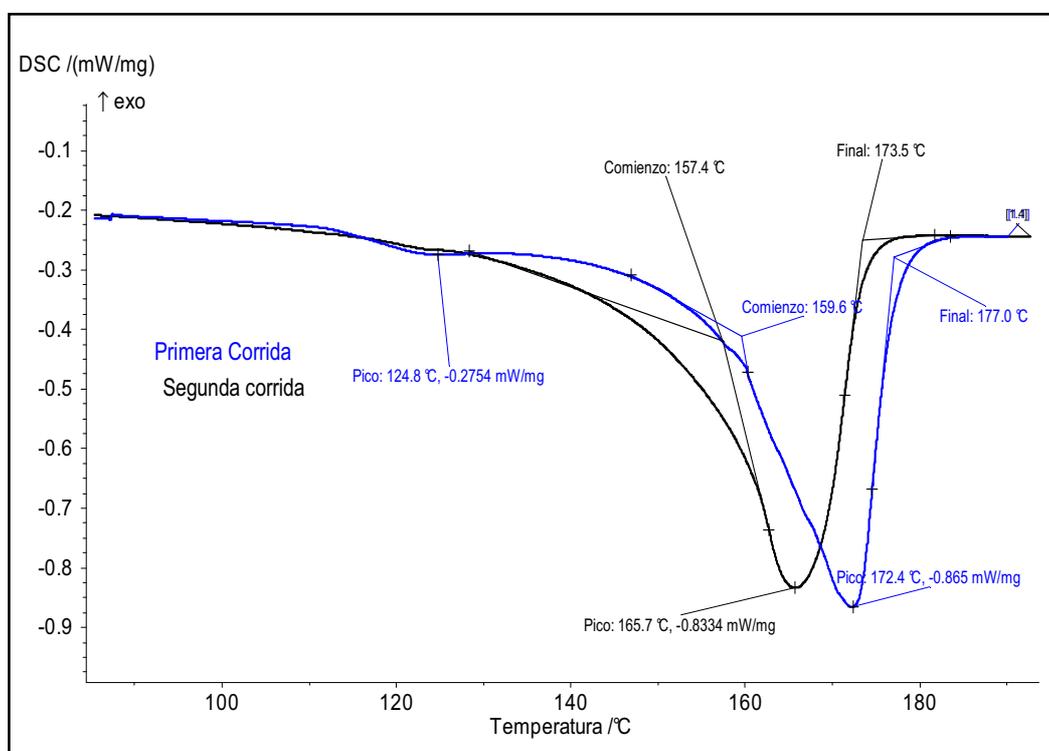
**Tabla 3.24** Interpretación de grupos funcionales del PVC reciclado

Grupo funcional	Nº de Onda presente (cm <sup>-1</sup> )
Metileno CH <sub>2</sub> : ν-C-H-	2 921,30 y 2 853,02
Carbonilo: ν C=O	1 733,48 y 1 601,67
Metileno CH <sub>2</sub> : δ-C-H-	1 426,63
Región de la huella de la molécula	1 331,63 - 1 251,83 - 1 198,01 - 1 099,46 y 1 019,00
C-Cl	834,54-749,73 y 692,90

### 3.2.3 CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

#### **PP reciclado**

En la Figura 3.25, la temperatura de fusión del PP reciclado es 166,7 °C menor que la temperatura de fusión del PP virgen de 170,9 °C con una diferencia de 5,2 °C. La temperatura de fusión depende del grado de cristalinidad del polímero, por lo tanto el PP reciclado tendrá un grado de cristalinidad menor que el PP virgen la estructura molecular del PP reciclado será menos compacta y por lo tanto su densidad será menor que la densidad del PET virgen.



**Figura 3.25** Termograma del PP reciclado

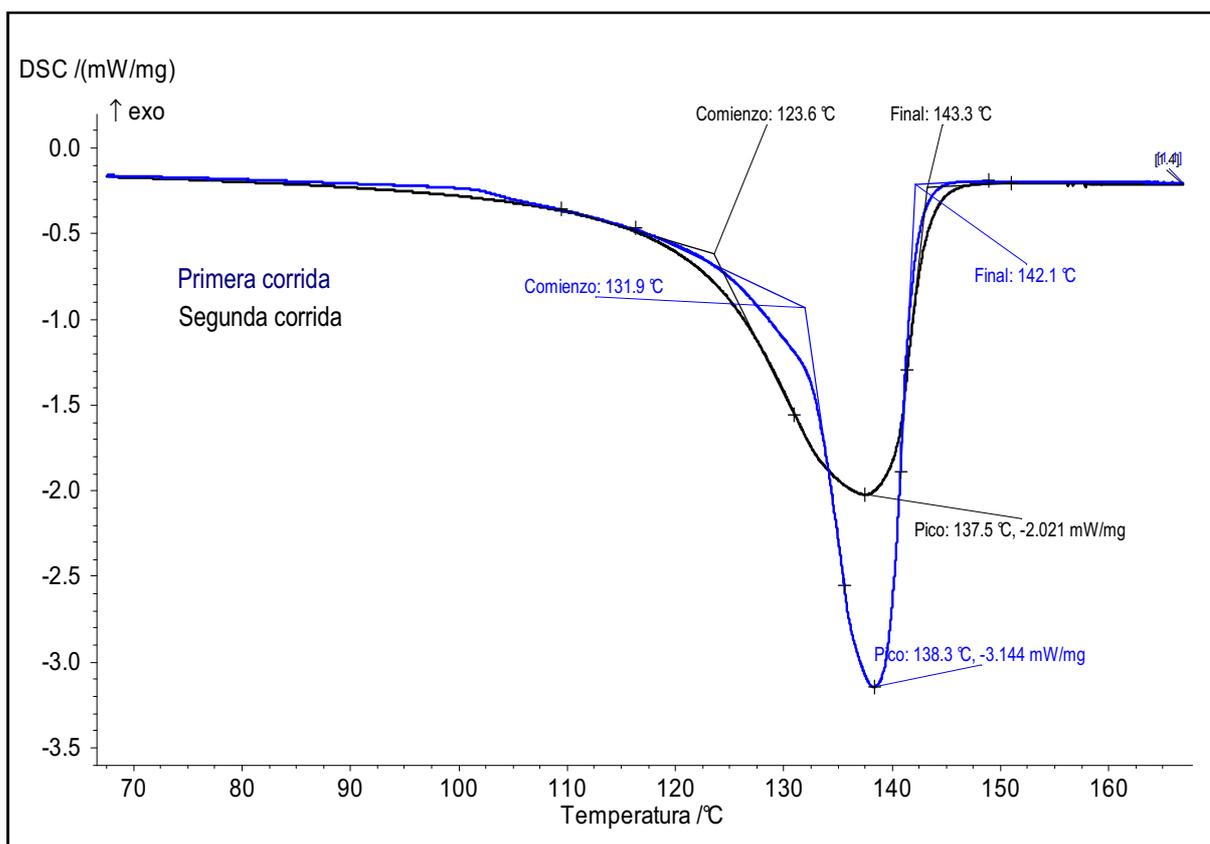
#### **PEAD reciclado**

En la Figura 3.26, la temperatura de fusión del PEAD reciclado es de 137,5°C menor a 1,3°C que el PEAD virgen de 138,8°C. La temperatura de fusión del PEAD reciclado es menor entonces el grado de cristalinidad es menor y por lo

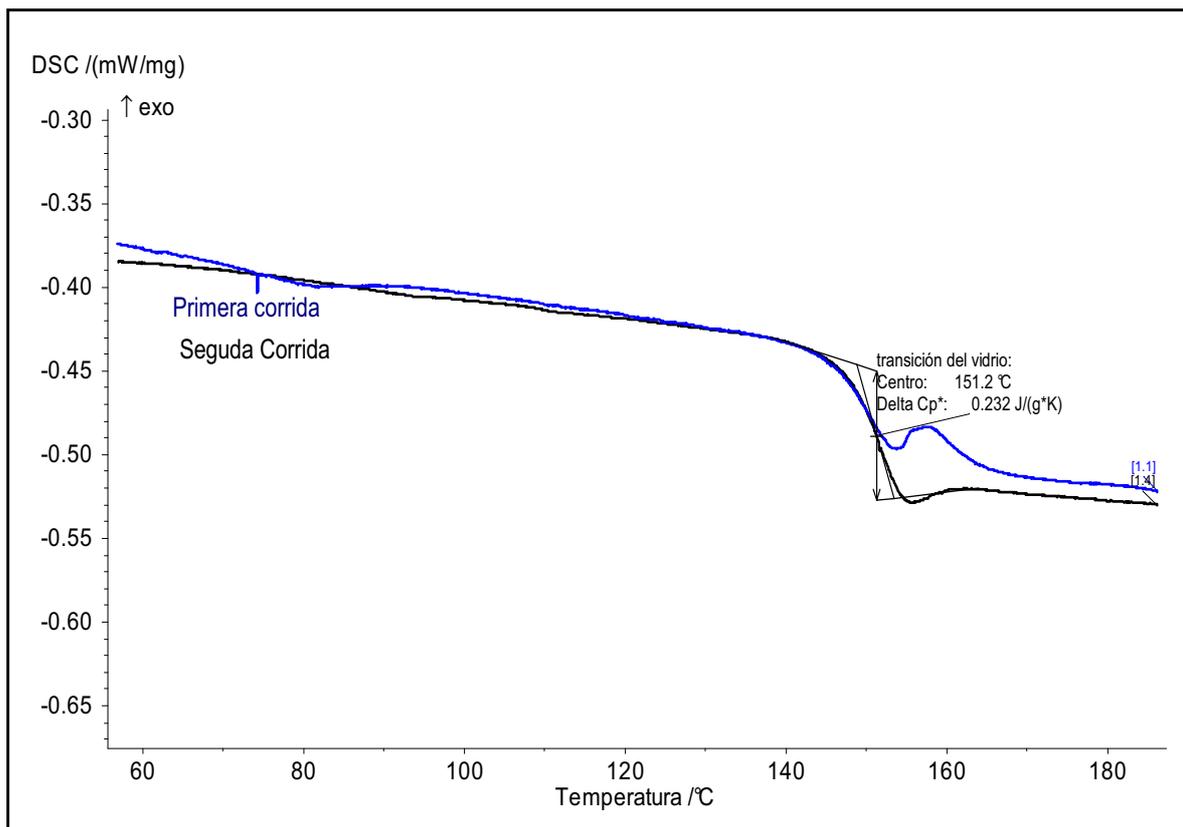
tanto es menos compacto y su densidad será menor que la densidad del PEAD virgen.

### **PC reciclado**

En la Figura 3.27, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del PC reciclado es de  $151,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y para el PC virgen de  $152,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Según la  $T_g$  del PC virgen y reciclado existe mayor grado de empaquetamiento de la estructura amorfa del PC en el PC virgen por lo tanto su densidad va ser ligeramente mayor que la densidad del PC reciclado, ya que la diferencia entre las  $T_g$  no es alta.



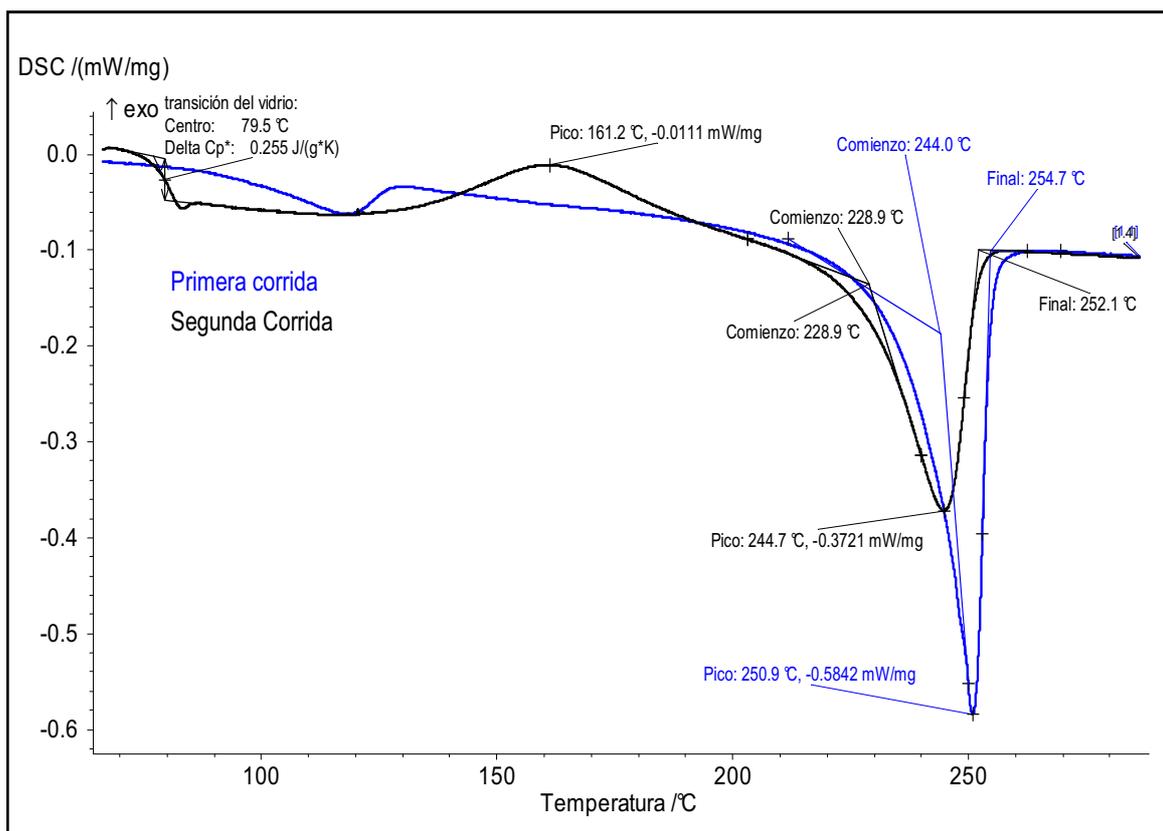
**Figura 3.26** Termograma del PEAD reciclado



**Figura 3.27** Termograma del PC reciclado

### **PET reciclado**

En la Figura 3.28, se muestran en la segunda corrida la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la temperatura de fusión ( $T_m$ ) del PET reciclado iguales a: 75,9 °C y 244,7 °C, en comparación a la  $T_g$  y  $T_m$  del PET virgen, son temperaturas menores. Esto influye en el grado de cristalinidad del PET reciclado (botellas de bebidas) menor que el grado de cristalinidad del PET virgen. Por tanto la densidad del PET reciclado será menor que la densidad del PET virgen porque la microestructura del PET reciclado tiene menos regiones cristalinas que lo hacen menos compacto.



**Figura 3.28** Termograma del PET reciclado

### 3.2.4 CONTENIDO DE CENIZAS

El contenido de cenizas (cargas inorgánicas) en los plásticos reciclados se muestra en la Tabla 3.25.

**Tabla 3.25** Contenido de cenizas de plásticos reciclados

Plásticos	Contenido de cenizas	
	(%)	Desviación estándar
PEAD	0,7744	0,1034
PP	0,0690	0,0326
PC	0,2638	0,3548
PET	0,0158	0,0195

### 3.3 EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE RESIDUOS PLÁSTICOS

#### 3.3.1 COMPORTAMIENTO DE CADA PLÁSTICO RECICLADO: PEAD, PP, PC, PET y PVC EN AGUA POTABLE

Las pruebas se realizaron para cada plástico reciclado (PEAD, PP, PC, PET y PVC) de tamaño de partícula  $-4,75+3,32$  mm, en agua potable que es el medio denso. La variable de operación analizada es la velocidad de agitación magnética a 0 rpm, 417 rpm y 750 rpm. En la Tabla 3.26, se muestran recuperaciones del PC y PET en la superficie del agua potable que no debe ocurrir porque sus densidades son mayores a la densidad del agua potable, esto se debe a la tensión superficial del agua potable que mantiene las hojuelas de PC y PET en la superficie, por tanto se necesita mayor velocidad de agitación para que las hojuelas de PC y PET se hundan en el fondo del vaso de precipitación.

**Tabla 3.26** Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable en reposo

Plásticos reciclados	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PP	100,00	0,00	0,00
PEAD	100,00	0,00	0,00
PC	2,37	97,63	1,35
PET	5,77	94,23	1,12
PVC	0,00	100,00	0,00

En la Tabla 3.27, se muestran las recuperaciones de PC, PET y PVC en el producto flotado, que son mayores en agua potable a 417 rpm que en agua potable en reposo. Por tanto no es conveniente la agitación magnética a 417 rpm, porque las recuperaciones del PC, PET y PVC disminuyen en el producto sedimentado a pesar de ser una agitación uniforme en todo el sistema, esto no ocurre con la agitación manual que se aplicó por pocos segundos en el agua potable en reposo.

**Tabla 3.27** Resultados del comportamiento de cada plástico reciclado: PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable a 417 rpm

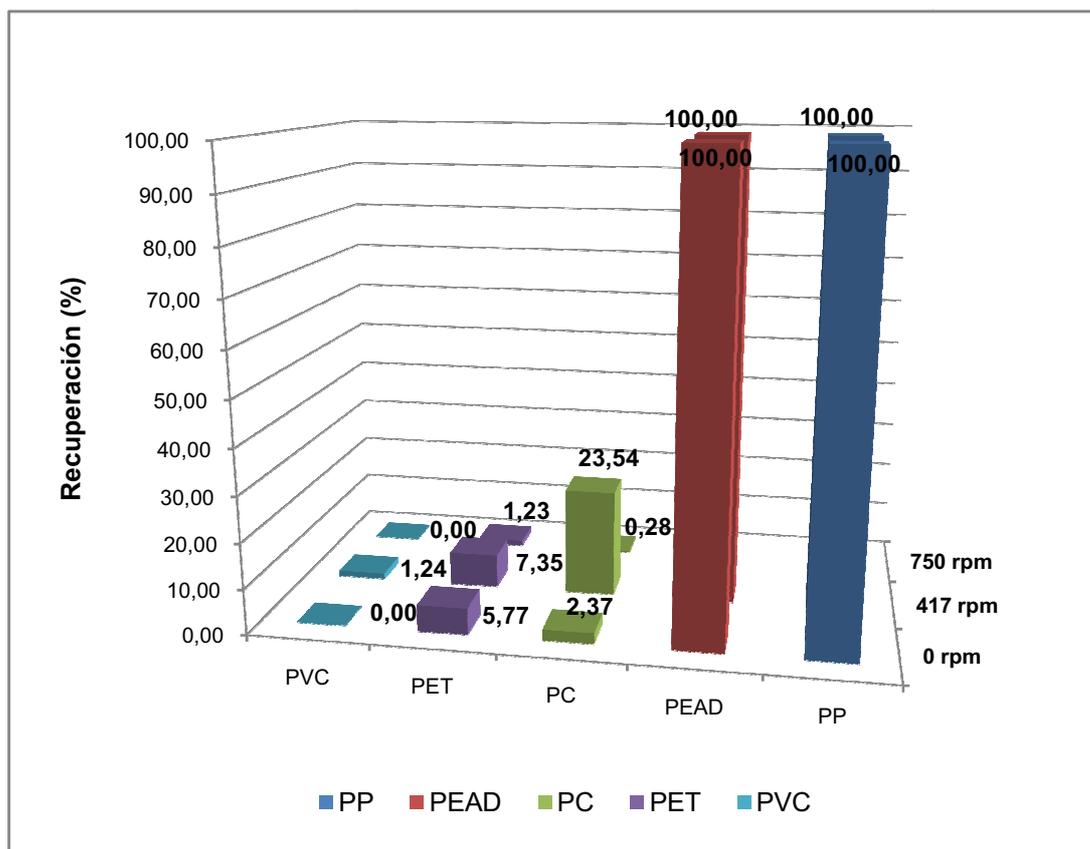
Plásticos reciclados	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PP	100,00	0,00	0,00
PEAD	100,00	0,00	0,00
PC	23,54	76,46	5,28
PET	7,35	92,65	0,90
PVC	1,24	98,76	0,40

En la Tabla 3.28, se muestran las recuperaciones del PC, PET y PVC reciclados. No se tomaron en cuenta el PEAD y PP porque sus recuperaciones en el agua potable en reposo y a 417 rpm son el 100 % de cada una en la superficie del agua potable. Las recuperaciones del PC y PET en el sedimentado aumentan en el agua potable en agitación magnética a 750 rpm. Por tanto la separación de cada plástico dependerá de la velocidad de agitación, a mayor velocidad de agitación mayor recuperación del plástico de interés ya sea en el flotado o en el sedimentado.

En la Figura 3.29, se muestra la recuperación de PEAD, PP, PC, PET y PVC en la superficie del agua potable en función de la velocidad de agitación. La velocidad de agitación óptima es a 750 rpm porque se obtienen mejores recuperaciones: 100 % de PP, 100 % de PEAD, 0,28 % DE PC, 1,23 % de PET y 0 % de PVC.

**Tabla 3.28** Resultados del comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en agua potable a 750 rpm

Plásticos reciclados	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	0,28	99,72	0,12
PET	1,23	98,77	0,38
PVC	0,00	100,00	0,00



**Figura 3.29** Porcentaje de recuperación para ensayos del comportamiento de cada plástico reciclado PEAD, PP, PC, PET y PVC en agua potable con y sin velocidad de agitación magnética

### 3.3.2 COMPORTAMIENTO DE CADA PLÁSTICO RECICLADO: PC, PET y PVC EN SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO DE DENSIDAD $1,197 \text{ g/cm}^3$

Se utilizaron los plásticos reciclados PC, PET y PVC de tamaños de partículas iguales a  $-4,75+3,32 \text{ mm}$ . El medio denso utilizado es la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ .

La variable de operación analizada es la velocidad de agitación, se aplicó agitación magnética a 417 rpm y 750 rpm.

En la Tabla 3.29, se muestran las recuperaciones del PET y PVC en la solución de cloruro de sodio a 417 rpm. La recuperación del PET es muy baja igual a 39,39 % y la recuperación del PVC es igual a 94,24 % en el sedimentado. Para el PC de

densidad menor a la densidad de la solución su recuperación es igual a 100 % en el flotado.

**Tabla 3.29** Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PC, PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  a 417 rpm

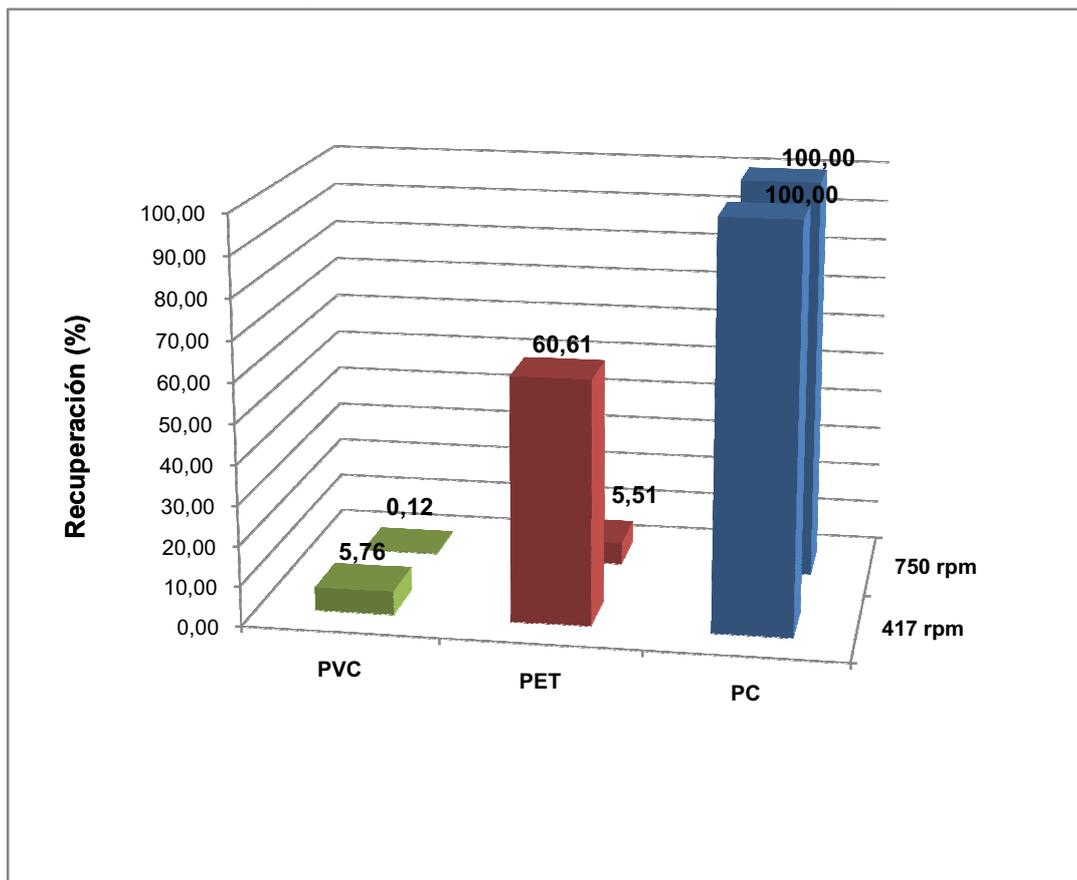
Plásticos reciclados	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	100	0,00	0,00
PET	60,61	39,39	6,09
PVC	5,76	94,24	2,45

En la Tabla 3.30, se muestran las recuperaciones del PC en el flotado igual a 100 % mediante la solución de cloruro de sodio a 750 rpm. Para el PET y PVC las recuperaciones en el sedimentado aumentan 94,49 % y 99,88 % respectivamente, con respecto a las recuperaciones en la solución de cloruro de sodio a 417 rpm.

En la Figura 3.30, se muestran las recuperaciones para el PVC, PET y PC en la superficie de la solución de cloruro de sodio de densidad igual a  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , se observa que a la velocidad de agitación de 750 rpm se obtienen las mejores recuperaciones: 100 % de PC, 5,51 % de PET y 0,12 % de PVC.

**Tabla 3.30** Resultados del comportamiento de los plásticos reciclados: PC, PET y PVC en la solución de cloruro de sodio densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  a 750 rpm

Plásticos reciclados	Recuperación flotado	Recuperación sedimentado	Desviación estándar
	(%)	(%)	(%)
PC	100,00	0,00	0,00
PET	5,51	94,49	1,44
PVC	0,12	99,88	0,14



**Figura 3.30** Porcentaje de recuperación para ensayos del comportamiento de cada plástico reciclado: PC, PET y PVC en solución de cloruro de sodio densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$  con y sin velocidad de agitación magnética

### 3.3.3 SEPARACIÓN DE LA MEZCLA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PEAD, PP, PC, PET y PVC CON AGUA POTABLE

#### 3.3.3.1 Tamaño de partícula $-4,75+3,32 \text{ mm}$

Para la separación de las poliolefinas recicladas (PEAD y PP) de PC, PET y PVC reciclados se utilizó el agua potable como medio denso. La mezcla está compuesta de 10 g de cada plástico colocada en 1000 ml de agua potable.

En la Tabla 3.31, se observan las recuperaciones en el flotado compuesta por: 100 % de PP, 99,39 % de PEAD pero existe la presencia de 0,47 % de PC, 6,85 % de PET y 0 % de PVC.

En la Tabla 3.32, se observan las recuperaciones en el flotado compuesta por: 99,05 % de PP, 97,60 % de PEAD pero existe la presencia de 1,09 % de PC, 2,43 % de PET y 0,09 % de PVC.

En la Tabla 3.33, se observan las recuperaciones en el flotado compuesta por: 99,35 % de PP, 96,34 % de PEAD pero existe la presencia de 0,06 % de PC, 0,25 % de PET y 0 % de PVC.

En la Figura 3.31, se compara las recuperaciones de PEAD, PP, PC, PET y PVC con las tres velocidades de agitación. Para las velocidades de agitación de 417 rpm y 750 rpm durante 5 minutos, las recuperaciones de PEAD y PP no son muy diferentes. Por tanto la agitación magnética durante 5 minutos de agitación disminuye la recuperación del PEAD y PP en la superficie del agua potable, con respecto a sus recuperaciones en agua potable en reposo. La velocidad de agitación de 750 rpm permite mejorar la recuperación del PEAD y PP porque disminuye las interferencias por parte del PC, PET y PVC.

**Tabla 3.31** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 4,75 + 3,32 mm) en agua potable en reposo durante 5 minutos

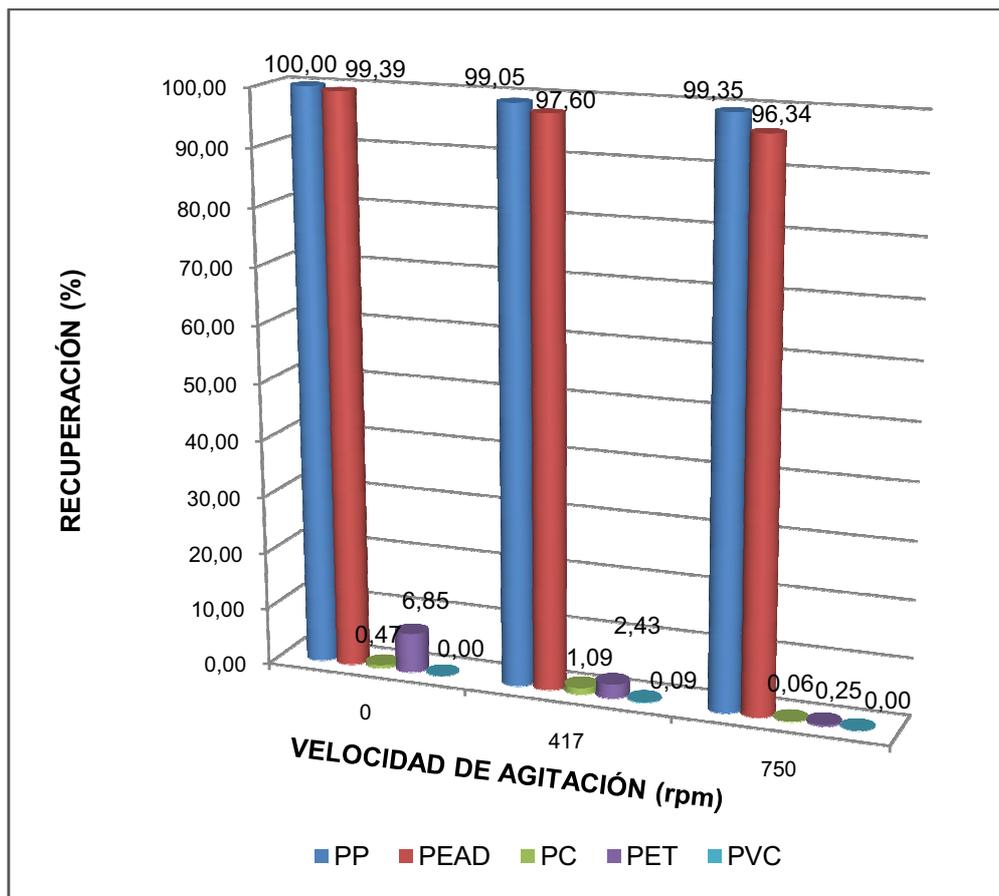
# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	9,9714	9,9020	0,0000	0,0244	0,0000	100,00	98,55	0,00	0,25	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,1461	9,9886	9,8752	9,9572	0,00	1,45	100,00	99,75	100,00
	Total	9,9714	10,0481	9,9886	9,8996	9,9572	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,8789	10,0722	0,0000	0,3859	0,0000	100,00	99,72	0,00	3,97	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0281	9,6433	9,3330	10,0251	0,00	0,28	100,00	96,03	100,00
	Total	9,8789	10,1003	9,6433	9,7189	10,0251	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	9,9992	9,9972	0,1406	1,6382	0,0000	100,00	99,90	1,40	16,32	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,0097	9,9244	8,4000	9,9973	0,00	0,10	98,60	83,68	100,00
	Total	9,9992	10,0069	10,0650	10,0382	9,9973	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					100,00	99,39	0,47	6,85	0,00
	Sedimentado						0,00	0,61	99,53	93,15	100,00
	Flotado	Desviación estándar (%)					0,00	0,74	0,81	8,41	0,00
	Sedimentado						0,00	0,74	0,81	8,41	0,00

**Tabla 3.32** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 4,75 + 3,32 mm) en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,0412	9,9009	0,0190	0,0581	0,0284	100,00	100,00	0,19	0,60	0,28
	Sedimentado	0,0000	0,0000	9,8198	9,6927	10,0237	0,00	0,00	99,81	99,40	99,72
	Total	10,0412	9,9009	9,8388	9,7508	10,0521	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,7734	9,2034	0,0432	0,0881	0,0000	97,30	93,37	0,43	0,88	0,00
	Sedimentado	0,2713	0,6536	10,0248	9,9008	9,9872	2,70	6,63	99,57	99,12	100,00
	Total	10,0447	9,8570	10,0680	9,9889	9,9872	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,0842	9,7836	0,2641	0,5560	0,0000	99,84	99,43	2,64	5,81	0,00
	Sedimentado	0,0160	0,0558	9,7494	9,0141	9,5656	0,16	0,57	97,36	94,19	100,00
	Total	10,1002	9,8394	10,0135	9,5701	9,5656	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					99,05	97,60	1,09	2,43	0,09
	Sedimentado						0,95	2,40	98,91	97,57	99,91
	Flotado	Desviación estándar (%)					1,52	3,68	1,35	2,93	0,16
	Sedimentado						1,52	3,68	1,35	2,93	0,16

**Tabla 3.33** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: -4,75+3,32 mm) en agua potable a 750 rpm durante 5 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,0066	9,6068	0,0000	0,0086	0,0000	99,65	95,43	0,00	0,09	0,00
	Sedimentado	0,0356	0,4596	10,0343	9,9987	10,0335	0,35	4,57	100,00	99,91	100,00
	Total	10,0422	10,0664	10,0343	10,0073	10,0335	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,9607	9,7282	0,0000	0,0336	0,0000	99,18	96,88	0,00	0,33	0,00
	Sedimentado	0,0819	0,3138	10,0474	10,0355	10,0232	0,82	3,12	100,00	99,67	100,00
	Total	10,0426	10,0420	10,0474	10,0691	10,0232	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	9,9902	9,7001	0,0197	0,0343	0,0000	99,22	96,72	0,19	0,33	0,00
	Sedimentado	0,0790	0,3288	10,2029	10,2293	10,0698	0,78	3,28	99,81	99,67	100,00
	Total	10,0692	10,0289	10,2226	10,2636	10,0698	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					99,35	96,34	0,06	0,25	0,00
	Sedimentado						0,65	3,66	99,94	99,75	100,00
	Flotado	Desviación estándar (%)					0,26	0,79	0,11	0,14	0,00
	Sedimentado						0,26	0,79	0,11	0,14	0,00



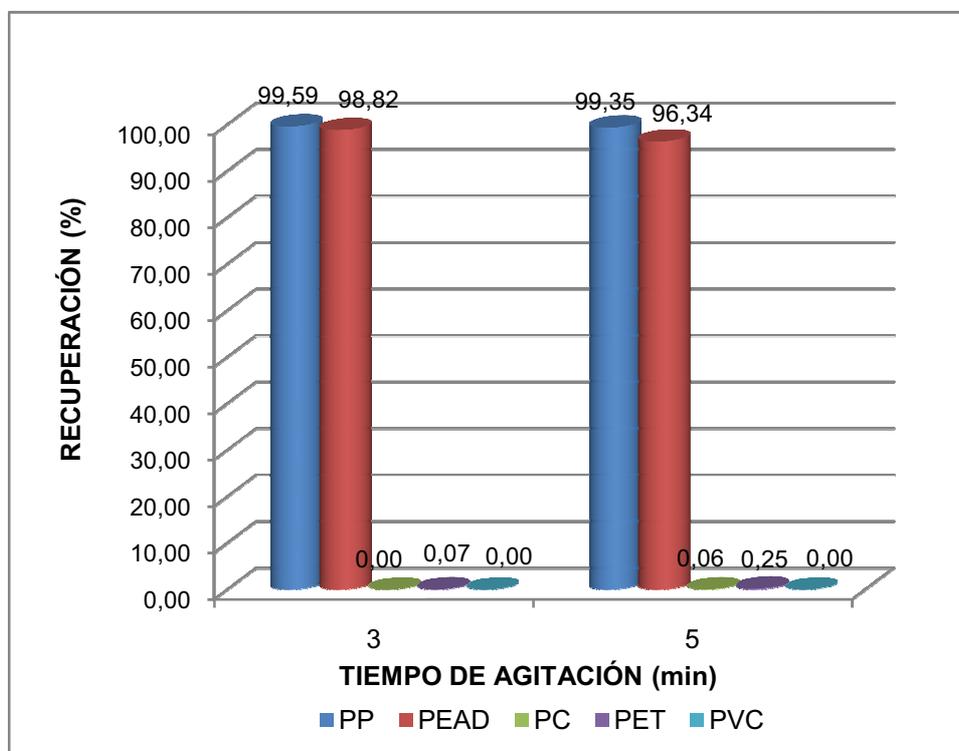
**Figura 3.31** Separación de los plásticos reciclados PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula:  $-4,75+3,32$  mm), en agua potable con y sin agitación magnética durante 5 minutos

En la Tabla 3.34, se observan las recuperaciones del PP, PEAD, PC, PET y PVC en la superficie del agua potable iguales a: 99,59 %, 98,82 %, 0 % de PC, 0,07 % de PET y 0 % de PVC, con velocidad de agitación magnética de 750 rpm durante 3 minutos de agitación.

En la Figura 3.32, se compara las recuperaciones del PEAD, PP, PC, PET y PVC con los dos tiempos de agitación magnética, en ella, se observan que el tiempo de agitación óptimo es de 3 minutos porque la recuperación del PEAD incrementa y las recuperaciones del PC y PET disminuyen en la superficie del agua potable.

**Tabla 3.34** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula:  $-4,75+3,32\text{mm}$ ) en agua potable a 750 rpm durante 3 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	10,2941	10,4585	0,0000	0,0000	0,0000	99,90	99,28	0,00	0,00	0,00
	Sedimentado	0,0099	0,0762	10,0864	9,9563	10,0796	0,10	0,72	100,00	100,00	100,00
	Total	10,3040	10,5347	10,0864	9,9563	10,0796	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	10,0327	10,4116	0,0000	0,0089	0,0000	99,12	98,26	0,00	0,09	0,00
	Sedimentado	0,0890	0,1843	9,9645	10,2332	10,7007	0,88	1,74	100,00	99,91	100,00
	Total	10,1217	10,5959	9,9645	10,2421	10,7007	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,3621	9,9464	0,0000	0,0113	0,0000	99,74	98,91	0,00	0,11	0,00
	Sedimentado	0,0275	0,1092	10,1804	10,0757	10,0841	0,26	1,09	100,00	99,89	100,00
	Total	10,3896	10,0556	10,1804	10,0870	10,0841	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					99,59	98,82	0,00	0,07	0,00
	Sedimentado						0,41	1,18	100,00	99,93	100,00
	Flotado	Desviación estándar (%)					0,41	0,51	0,00	0,06	0,00
	Sedimentado						0,41	0,51	0,00	0,06	0,00



**Figura 3.32** Efecto del tiempo de agitación en la separación de plásticos reciclados (tamaño de partícula:  $-4,75+3,32\text{ mm}$ ) en agua potable a 750 rpm

### 3.3.3.2 Tamaño de partícula -3,32+2,36 mm

La separación de plásticos reciclados se experimentó para los tamaños de partícula entre -4,75 + 3,32 mm, se analizaron las velocidades de agitación para determinar la velocidad de agitación óptima que permita la separación eficaz de las poliolefinas (PEAD y PP) del PC, PET y PVC.

En la Tabla 3.35, las recuperaciones del PP y PEAD en la superficie del agua potable son respectivamente de: 97,86 % y 97,13 %, con la presencia de 0,75 % de PC, 4,31 % de PET y 0,31 % de PVC, en agua potable en reposo.

En la Tabla 3.36, las recuperaciones del PP y PEAD en la superficie del agua potable son respectivamente: 99,41 % y 95,39 %, con la presencia de 2,63 % de PC, 5,81 % de PET y 0,02 % de PVC, en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos.

En la Tabla 3.37, las recuperaciones del PP y PEAD en la superficie del agua potable son respectivamente: 98,13 % y 97,24 %, con la presencia de 0,94 % de PC, 1,46 % de PET y 0,05 % de PVC, en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos.

En la Figura 3.33, se comparan las recuperaciones de las poliolefinas con las 3 velocidades de agitación, se puede ver que se tienen resultados similares, por lo que se podría trabajar con cualquier velocidad. Pero al comparar las recuperaciones del PC, PET y PVC con las 3 velocidades de agitación, se observa que la velocidad de agitación más conveniente es a 750 rpm porque las recuperaciones del PC, PET y PVC disminuyen.

**Tabla 3.35** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable en reposo durante 5 minutos

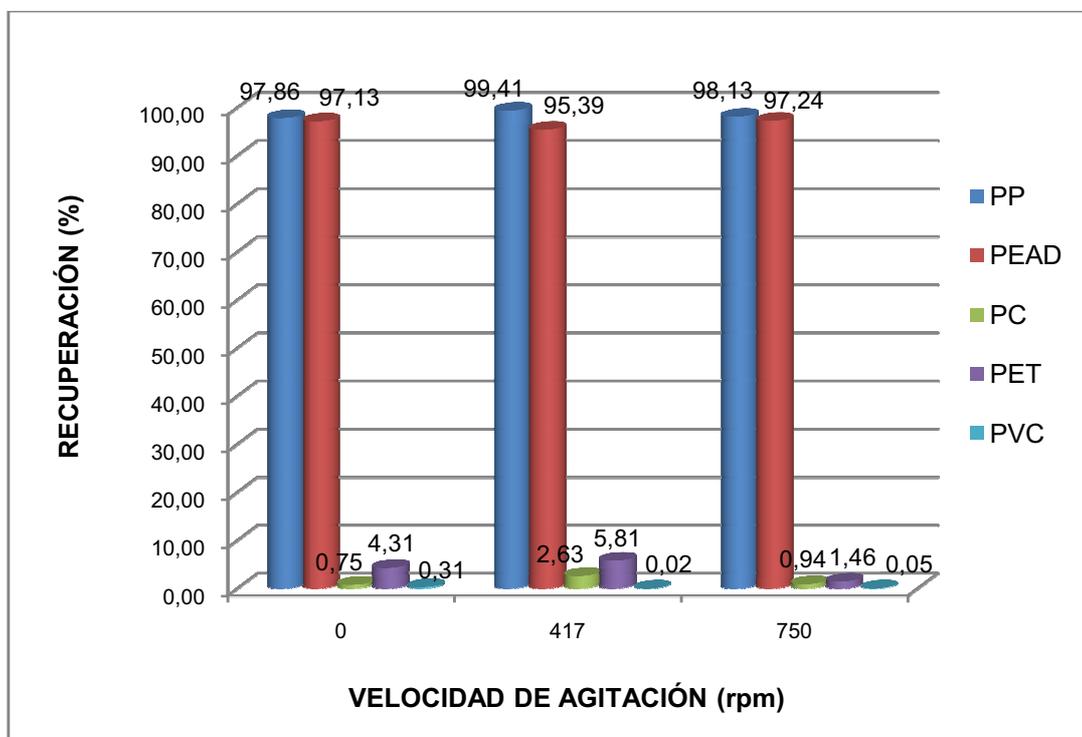
# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	9,4667	9,5166	0,0800	0,1094	0,0802	97,09	95,56	0,82	1,13	0,80
	Sedimentado	0,2835	0,4417	9,6995	9,5739	9,9258	2,91	4,44	99,18	98,87	99,20
	Total	9,7502	9,9583	9,7795	9,6833	10,0060	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,3830	9,7094	0,0869	0,1533	0,0000	97,07	96,59	0,87	1,54	0,00
	Sedimentado	0,2833	0,3427	9,8655	9,8306	9,9024	2,93	3,41	99,13	98,46	100,00
	Total	9,6663	10,0521	9,9524	9,9839	9,9024	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	9,8140	10,0055	0,0563	1,0200	0,0122	99,43	99,24	0,57	10,25	0,12
	Sedimentado	0,0564	0,0765	9,9076	8,9281	9,9640	0,57	0,76	99,43	89,75	99,88
	Total	9,8704	10,0820	9,9639	9,9481	9,9762	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					97,86	97,13	0,75	4,31	0,31
	Sedimentado						2,14	2,87	99,25	95,69	99,69
	Flotado	Desviación estándar (%)					1,36	1,90	0,16	5,15	0,43
	Sedimentado						1,36	1,90	0,16	5,15	0,43

**Tabla 3.36** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP del PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable a 417 rpm durante 5 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	9,9512	9,5018	0,3918	0,5932	0,0065	98,22	94,89	3,95	5,97	0,06
	Sedimentado	0,1806	0,5115	9,5384	9,3512	10,0835	1,78	5,11	96,05	94,03	99,94
	Total	10,1318	10,0133	9,9302	9,9444	10,0900	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	10,0307	9,6848	0,2355	0,4407	0,0000	100,00	95,59	2,38	4,32	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,4468	9,6763	9,7670	10,0290	0,00	4,41	97,62	95,68	100,00
	Total	10,0307	10,1316	9,9118	10,2077	10,0290	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,0177	9,7886	0,1598	0,7065	0,0000	100,00	95,69	1,58	7,15	0,00
	Sedimentado	0,0000	0,4408	9,9484	9,1815	10,1014	0,00	4,31	98,42	92,85	100,00
	Total	10,0177	10,2294	10,1082	9,8880	10,1014	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					99,41	95,39	2,63	5,81	0,02
	Sedimentado						0,59	4,61	97,37	94,19	99,98
	Flotado	Desviación estándar (%)					1,03	0,44	1,20	1,42	0,04
	Sedimentado						1,03	0,44	1,20	1,42	0,04

**Tabla 3.37** Separación de los plásticos reciclados: PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: - 3,32 + 2,36 mm) en agua potable a 750 rpm durante 5 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g					Recuperación, %				
		PP	PEAD	PC	PET	PVC	PP	PEAD	PC	PET	PVC
1	Flotado	9,8622	10,0893	0,0589	0,1340	0,0000	98,19	98,95	0,59	1,33	0,00
	Sedimentado	0,1816	0,1068	9,9444	9,9056	10,1250	1,81	1,05	99,41	98,67	100,00
	Total	10,0438	10,1961	10,0033	10,0396	10,1250	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	Flotado	9,8090	9,7177	0,0675	0,1211	0,0000	97,70	96,35	0,67	1,20	0,00
	Sedimentado	0,2314	0,3685	9,9464	9,9494	10,1854	2,30	3,65	99,33	98,80	100,00
	Total	10,0404	10,0862	10,0139	10,0705	10,1854	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	Flotado	10,0336	9,8046	0,1589	0,1843	0,0150	98,50	96,41	1,57	1,83	0,15
	Sedimentado	0,1529	0,3654	9,9936	9,8978	10,2471	1,50	3,59	98,43	98,17	99,85
	Total	10,1865	10,1700	10,1525	10,0821	10,2621	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	Flotado	Recuperación promedio (%)					98,13	97,24	0,94	1,46	0,05
	Sedimentado						1,87	2,76	99,06	98,54	99,95
	Flotado	Desviación estándar (%)					0,41	1,49	0,54	0,33	0,08
	Sedimentado						0,41	1,49	0,54	0,33	0,08



**Figura 3.33** Separación de los plásticos reciclados PEAD, PP de PC, PET y PVC (tamaño de partícula: -3,32+2,36mm), en agua potable con y sin agitación magnética durante 5 minutos

### 3.3.4 SEPARACIÓN DE LA MEZCLA DE PLÁSTICOS RECICLADOS: PC, PET y PVC RECICLADOS CON SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO DENSIDAD 1,197 g/cm<sup>3</sup>

#### 3.3.4.1 Tamaño de partícula -4,75+3,32 mm

Se analizó a 750 rpm, no a 417 rpm porque en los resultados del comportamiento del PET, su recuperación en la superficie de la solución es 60,61 %. Por lo tanto la separación del PC del PET y PVC no sería eficaz a 417 rpm. En la Tabla 3.38, se muestra la separación del PC del PET y PVC con la solución de cloruro de sodio de densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm y tiempo de agitación de 5 minutos.

**Tabla 3.38** Separación de los plásticos reciclados: PC del PET y PVC (tamaños de partícula - 4,75 + 3,32 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 5min

# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	<b>Flotado</b>	9,8124	0,6284	0,0000	<b>97,93</b>	<b>6,04</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,2073	9,7680	10,1092	<b>2,07</b>	<b>93,96</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0197	10,3964	10,1092	100,00	100,00	100,00
2	<b>Flotado</b>	9,7237	0,5298	0,0000	<b>97,24</b>	<b>5,29</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,2765	9,4915	10,0680	<b>2,76</b>	<b>94,71</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0002	10,0213	10,0680	100,00	100,00	100,00
3	<b>Flotado</b>	9,9605	0,6245	0,0324	<b>99,19</b>	<b>5,88</b>	<b>0,31</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0809	9,4428	9,9955	<b>0,81</b>	<b>48,38</b>	<b>51,21</b>
	Total	10,0414	10,0673	10,0279	100,00	54,26	51,52
4	<b>Flotado</b>	9,9113	0,3511	0,0476	<b>98,81</b>	<b>3,41</b>	<b>0,46</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,1198	9,6586	9,9757	<b>1,19</b>	<b>48,89</b>	<b>50,50</b>
	Total	10,0311	10,0097	10,0233	100,00	52,30	50,96
5	<b>Flotado</b>	9,8610	0,6606	0,0000	<b>98,57</b>	<b>6,28</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,1427	9,3420	10,0008	<b>1,43</b>	<b>47,94</b>	<b>51,32</b>
	Total	10,0037	10,0026	10,0008	100,00	54,22	51,32
	<b>Flotado</b>	Recuperación promedio (%)			<b>98,62</b>	<b>5,17</b>	<b>0,13</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>1,38</b>	<b>49,35</b>	<b>51,99</b>
	<b>Flotado</b>	Desviación estándar (%)			<b>0,97</b>	<b>1,13</b>	<b>0,20</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,97</b>	<b>2,61</b>	<b>2,26</b>

### 3.3.4.2 Tamaño de partícula -3,32 + 2,36 mm

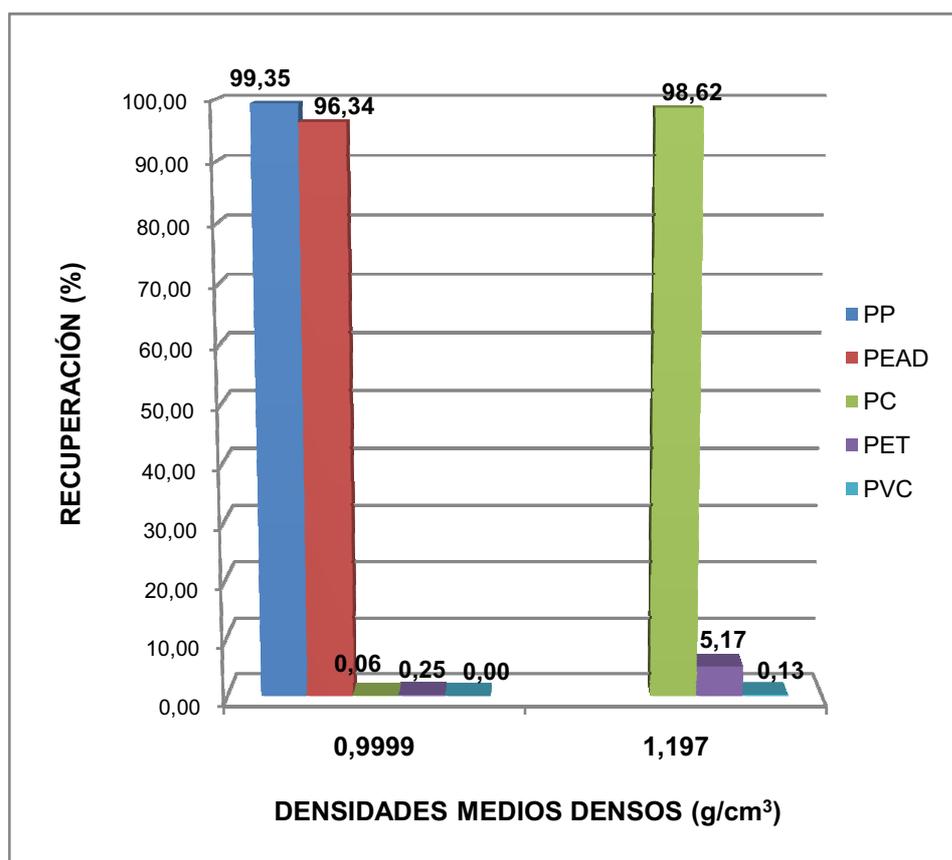
En la Tabla 3.39, se muestra la separación del PC del PET y PVC con la solución de cloruro de sodio de densidad igual a 1,197 g/cm<sup>3</sup>, velocidad de agitación 750 rpm y tiempo de agitación 3 minutos. Durante los ensayos para la separación de los plásticos reciclados (PC del PET y PVC) se observó que si el tiempo de agitación es 3 minutos, este tiempo no es suficiente para que la mezcla tenga contacto total (humedezca) con la solución de cloruro de sodio y permita la separación. El tiempo de agitación de 5 minutos es el tiempo mínimo porque los plásticos se humedecen y separan, esto ocurre para los dos rangos de tamaños de partícula.

**Tabla 3.39** Separación de los plásticos reciclados: PC del PET y PVC (tamaño de partícula: -3,32 + 2,36 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 5min

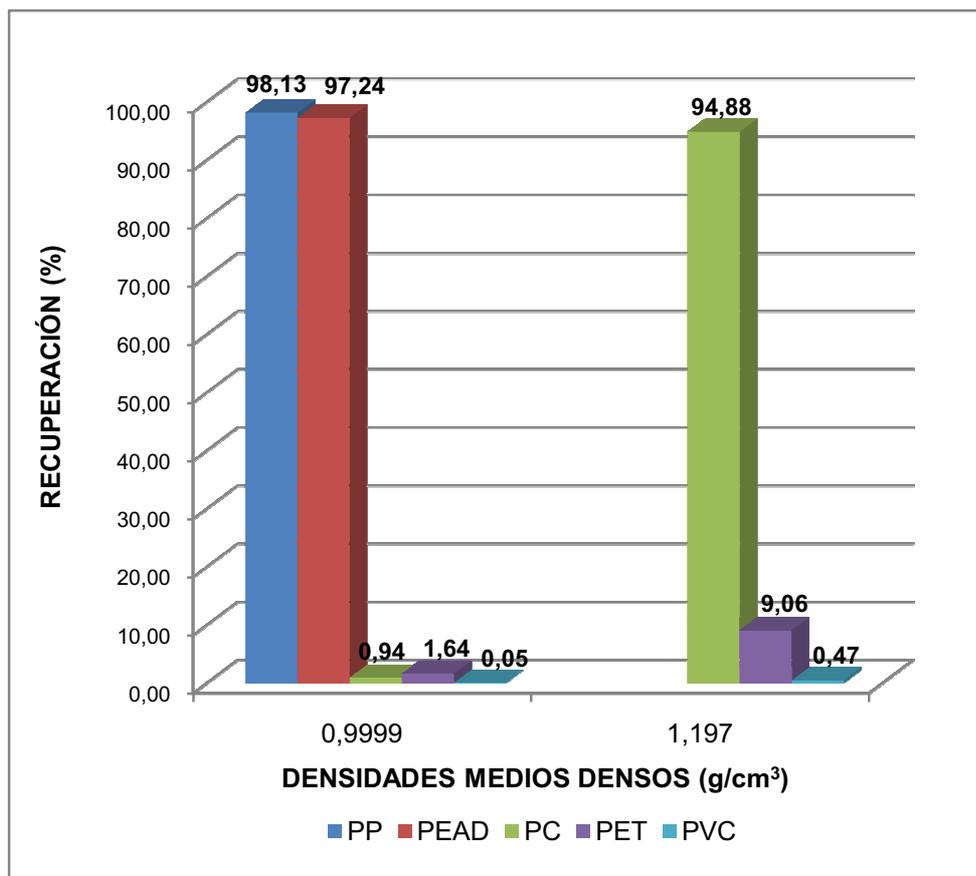
# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	<b>Flotado</b>	9,4694	0,8941	0,0568	<b>94,39</b>	<b>8,93</b>	<b>0,57</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,5627	9,1154	9,9467	<b>5,61</b>	<b>91,07</b>	<b>99,43</b>
	Total	10,0321	10,0095	10,0035	100,00	100,00	100,00
2	<b>Flotado</b>	9,4869	0,5392	0,0499	<b>94,65</b>	<b>5,39</b>	<b>0,49</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,5366	9,4710	10,0411	<b>5,35</b>	<b>94,61</b>	<b>99,51</b>
	Total	10,0235	10,0102	10,0910	100,00	100,00	100,00
3	<b>Flotado</b>	9,5465	0,9937	0,0432	<b>95,28</b>	<b>9,83</b>	<b>0,43</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,4731	9,1160	10,0410	<b>4,72</b>	<b>90,17</b>	<b>99,57</b>
	Total	10,0196	10,1097	10,0842	100,00	100,00	100,00
4	<b>Flotado</b>	9,5271	1,2106	0,0376	<b>95,18</b>	<b>12,10</b>	<b>0,38</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,4820	8,7956	9,9686	<b>4,82</b>	<b>87,90</b>	<b>99,62</b>
	Total	10,0091	10,0062	10,0062	100,00	100,00	100,00
	<b>Flotado</b>	Recuperación promedio (%)			<b>94,88</b>	<b>9,06</b>	<b>0,47</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>5,12</b>	<b>90,94</b>	<b>99,53</b>
	<b>Flotado</b>	Desviación estándar (%)			<b>0,43</b>	<b>2,79</b>	<b>0,08</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,43</b>	<b>2,79</b>	<b>0,08</b>

En la Figura 3.34, se puede observar la separación de los plásticos reciclados de tamaño de partícula  $-4,75 + 3,32$  mm, con los dos medios densos: en agua potable y en la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , a  $750 \text{ rpm}$  y tiempo de agitación igual a 5 minutos, condiciones de operación mejores porque se obtienen las mejores separaciones de los plásticos.

En la Figura 3.35, se muestra la separación de los plásticos reciclados de tamaño de partícula  $-3,32 + 2,36$  mm, con los dos medios densos: en agua potable y en la solución de cloruro de sodio de densidad igual a  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , a  $750 \text{ rpm}$  y tiempo de agitación igual a 5 minutos, las mejores condiciones de operación que obtienen la mejor separación de los plásticos.



**Figura 3.34** Separación de los plásticos reciclados (tamaño de partícula:  $-4,75 + 3,32$  mm) con diferentes medios densos a la velocidad de agitación de  $750 \text{ rpm}$  y tiempo de agitación 5 minutos



**Figura 3.35** Separación de los plásticos reciclados (tamaño de partícula:  $-3,32 + 2,36$  mm) con diferentes medios densos a la velocidad de agitación de 750 rpm y tiempo de agitación 5 minutos

### 3.3.5 SEPARACIÓN DE LOS PLÁSTICOS: PC y PVC CON SOLUCIÓN DE CLORURO DE SODIO DENSIDAD $1,197$ g/cm<sup>3</sup>

En la Tabla 3.40, se muestran las recuperaciones de PC y PVC en la superficie de la solución de cloruro de sodio de densidad igual a  $1,197$  g/cm<sup>3</sup>. Las recuperaciones son iguales a: 100 % de PC y 0 % de PVC. Por tanto, la separación del PC del PVC es eficaz, con la aplicación de agitación magnética a 750 rpm durante 3 minutos de agitación. Es importante la separación total del PC y PVC para obtener dos plásticos puros, para la producción de nuevos productos que no atenten contra el medio ambiente.

**Tabla 3.40** Separación de los plásticos reciclados: PC y PVC con solución de cloruro de sodio en agitación magnética a 750 rpm y tiempo de agitación de 3 minutos

# pruebas	Producto	Contenido, g		Recuperación, %	
		PC	PVC	PC	PVC
1	<b>Flotado</b>	10,0464	0,0000	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	10,0380	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0464	10,0380	100,00	100,00
2	<b>Flotado</b>	10,0283	0,0000	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	10,0235	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0283	10,0235	100,00	100,00
3	<b>Flotado</b>	10,0751	0,0000	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	10,0997	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0751	10,0997	100,00	100,00
4	<b>Flotado</b>	10,0464	0,0000	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	10,0380	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0464	10,0380	100,00	100,00
5	<b>Flotado</b>	10,0026	0,0000	<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	10,0019	<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0026	10,0019	100,00	100,00
	<b>Flotado</b>	Recuperación promedio (%)		<b>100,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>			<b>0,00</b>	<b>100,00</b>
	<b>Flotado</b>	Desviación estándar (%)		<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>			<b>0,00</b>	<b>0,00</b>

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- Del objetivo general planteado al inicio del proyecto se logró separar las mezclas de residuos plásticos en base a sus diferentes densidades, para la separación del PP y PEAD del PC, PET y PVC las recuperaciones del PP y PEAD son casi del 100 % para cada una, con un bajo porcentaje de contaminación de PET igual a 0,03 %.
- Al tener en consideración que el PVC mezclado con otros plásticos provoca contaminación del ambiente, el método por diferencia de densidad es eficiente para separar por completo todas las partículas de PVC de todas las partículas de PP y PEAD.
- Dentro del proceso de separación por diferencia de densidades es importante tomar en consideración los rangos de tamaños de partícula, de los experimentos realizados se concluye que el rango de tamaño de partícula óptimo para la separación eficiente de los plásticos reciclados es  $-4,75 + 3,32$  mm.
- Para la separación de los plásticos particulados es importante tomar en cuenta la densidad del medio denso, la cual varía con las densidades de los plásticos que se requieren separar. De las pruebas realizadas para la separación del PP y PEAD del PC, PET y PVC se usó como medio denso el agua potable de densidad  $0,9999 \text{ g/cm}^3$ , y para la separación del PC del PET y PVC se usó como medio denso la solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ .
- La densidad de la solución de cloruro de sodio puede ser igual que la densidad del plástico que se requiere separar en el producto flotado, ya que la separación del PC virgen del PET y PVC vírgenes es eficiente a pesar de la estrecha diferencia entre la densidad del PC virgen igual a  $1,1945 \text{ g/cm}^3$  y la densidad de la solución de cloruro de sodio igual a  $1,197 \text{ g/cm}^3$ .

- Es importante que la solución de cloruro de sodio no se sature, porque las partículas de sal común no disueltas debilitan la velocidad de agitación magnética lo cual reduce la eficiencia de la separación de los plásticos reciclados (PC del PET y PVC) ya que los porcentajes de recuperación en el producto flotado del PET y PVC aumentan.
- La velocidad de agitación magnética es una condición importante porque a mayor velocidad de agitación mayor humectación del plástico y mejora la eliminación de las burbujas de aire, lo cual permite obtener recuperaciones mayores de los plásticos de densidades mayores que la densidad del medio denso en el producto sedimentado que favorece la separación del plástico de interés en el producto flotado.
- Para mejorar la separación de los plásticos reciclados (PC del PET y PVC) el tiempo de agitación mínimo es de 5 minutos. Para que los plásticos se humedezcan y tengan tiempo de separarse.
- La densidad del PET influye en la eficiencia de la separación de los plásticos reciclados (PC del PET y PVC) porque su densidad es  $1,2870 \text{ g/cm}^3$ . La recuperación del PET reciclado es 8 % en el producto flotado a diferencia de lo ocurrido en la separación de los plásticos vírgenes la densidad del PET virgen es  $1,3949 \text{ g/cm}^3$  que permite la recuperación del 100 % de PET en el producto sedimentado.
- La densidad del PET reciclado es afectada principalmente por las formas y tamaños de las partículas.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Para la preparación de la solución de cloruro de sodio, no añadir 300 g de sal de golpe en el agua destilada puesto que es difícil disolver toma mucho tiempo.

- Utilizar la misma barra de agitación para todas las pruebas de separación por diferencia de densidades, que tenga dimensiones de 7\*40 mm (diámetro\*longitud) para que la velocidad de agitación sea igual a 750 rpm.
- Aplicar otro tipo de agitación para experimentar con velocidades de agitación superiores a 750 rpm. Ya que con el agitador magnético es posible agitar hasta 750 rpm porque la barra de agitación se dispara hacia las paredes del vaso de precipitación al subir la velocidad de agitación.
- Limpiar bien los plásticos para realizar las pruebas de caracterización y separación por diferencia de densidades sobre todo para las muestras de PET reciclado.
- No añadir más de 300 g de sal para evitar el mal funcionamiento de la barra de agitación y desuso para velocidades de agitación a 750 rpm. Ya que existen partículas de sal asentadas en el vaso de precipitación que impiden el movimiento de la barra de agitación y desgastan el material.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Andrango, M. y Córdova, S., 2007, "Diseño de un Programa de Reciclaje de Plástico en la Escuela Politécnica Nacional", Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito-Ecuador, pp. 28, 83.
2. ASEPLAS, 2011, "Estadísticas", Revista de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos, edición # 27, 34.
3. Banco Central del Ecuador, 2010, "Totales de exportaciones de un producto", [http://www.portal.bce.fin.ec/vto\\_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp](http://www.portal.bce.fin.ec/vto_bueno/seguridad/ComercioExteriorEst.jsp), (Mayo, 2011).
4. Bove-ag, 2009, "Plásticos mecanizables", [http://www.plasticosmecanizables.com/plásticos\\_pet.html](http://www.plasticosmecanizables.com/plásticos_pet.html), (Julio, 2011).
5. Burat, F., Güney, A. y Kangal, O., 2009, "Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method", <http://www.sciencedirect.com/>, (Marzo, 2010).
6. Cáceres, M., Sánchez, M., Maspoch, M., Sánchez, M. y Sánchez, A., 2009, "Desarrollo de un proceso de reciclaje para la fracción mixta de residuos de plástico, provenientes de plantas de separación selectiva", <http://upcommons.upc.edu>, (Mayo, 2011).
7. Castro, L., 2011, "Los plásticos en el ámbito mundial", <http://airdplastico.wordpress.com/2011/06/02/los-plasticos-en-el-ambito-mundial/>, (Diciembre, 2011).
8. De la Torre, F., 2008, "Gestión integral de residuos sólidos urbanos Distrito Metropolitano de Quito", <http://www.dirsa.org/pgirsu/inicio.html>, (Febrero, 2011).

9. EMASEO, 2009, "Informe de gestión 2009", [www.emaseo.gov.ec/documentos/.../informe%20%20gestion%202009.pdf](http://www.emaseo.gov.ec/documentos/.../informe%20%20gestion%202009.pdf), (Junio. 2011).
10. Fundación AVINA, Fundación Alianza en el Desarrollo y Ciudad Saludable Perú, 2010, "Hacia la inclusión social y económica de los recicladores en Ecuador", <http://www.ciudadsaludable.org>, (Junio, 2011).
11. Fundación para la Investigación y el Desarrollo Ambiental (FIDA), 2005, "¿Cómo se reciclan los plásticos?", <http://www.fida.es:8001/fida/VisNot?=3a1c92b290b716e4373bd54105714c>, (Mayo, 2011).
12. Fundación Natura, 2009, "ET2: falta una planta de reciclaje", <http://www.fnatura.org/noticia.php?nc=3827>, (Julio, 2010).
13. Gottfried, E., Riedel, G. y Trawiel, P., 2004, "Thermal Analysis of Plastics", Editorial Hanser Publishers, Munich, Alemania, pp. 335, 338, 340.
14. IDES, 2010, "Prospector", <http://prospector.ides.com/default.aspx?CRMOK>, (Junio, 2011).
15. INEC, 2010, "Ecuador en cifras", <http://www.ecuadorencifras.com/cifras-inec/main.html>, (Junio, 2011).
16. Koenig, J., 1992, "Theory of Polymer Characterization", Editorial American Chemical Society, New York, U.S.A., p. 92.
17. Mettler Toledo, 1997, "Instrucciones de manejo para balanzas AT/AG y PG/PG-S/PR para la determinación de la densidad", Suiza, p. 56.
18. Miller, J.C. y Miller, J.N., 1993, "Estadística para química analítica", 2da. edición, Editorial ADDISON-WESLEY Iberoamericana S.A., Wilmington, Estados Unidos, pp. 30, 49.

19. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2009, "Manejo de residuos en el Distrito Metropolitano de Quito", [http://www.quitoambiente.com/index.php?option=com\\_jdownloads&Itemid=67&task=viewcategory&catid=5](http://www.quitoambiente.com/index.php?option=com_jdownloads&Itemid=67&task=viewcategory&catid=5), (Marzo, 2011).
20. Pascoe, R. y O'Connell, B., 2002, "Flame treatment for the selective wetting and separation of PVC and PET", <http://www.sciencedirect.com/>, (Marzo, 2010).
21. Patentados.com, 2007, "Separación de plásticos con múltiples etapas", <http://patentados.com/patente/separacion-de-plasticos-con-multiples-etapas/>, (Julio, 2011)
22. Pavez, O., 2005, "Apuntes concentración de materiales II", <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Pavez/APUNTES%20%20DE%20CONCENTRACION%20DE%20MINERALES%20II.pdf>, (Mayo, 2010).
23. Roca, I., 2005, "Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)", <http://es.scribd.com/doc/58168104/53/Soluciones-para-minimizar-los-residuos-plasticos>, (Junio, 2011).
24. Rosales, C., 2007, "Espectroscopía IR", <http://www.fq.uh.cu>, (Mayo, 2011).
25. Scheirs, J., 2000, "Compositional and Failure Analysis of Polymers", Editorial Wiley, New York, U.S.A., p. 152.
26. Secretaría de Ambiente, 2010, "Gestores de residuos", <http://www.quitoambiente.gob.ec/home/>, (Marzo, 2011).
27. Shen, H., Forssberg, E. y Pugh, R., 2001, "Selective flotation separation of plastics by chemical conditioning with methyl cellulose", <http://www.sciencedirect.com/>, (Marzo, 2010).

28. Stevens, R., 1947, "Handbook of Chemistry", 4ta. Edición, Editorial Handbook Publishers, U.S.A., p. 1141.
  
29. Takoungsakdakun, T. y Pongstabodee, S., 2007, "Separation of mixed post-consumer PET-POM-PVC plastic waste using selective flotation", <http://www.sciencedirect.com/>, (Mayo, 2010).
  
30. Wuebcken, W., 1995, "International Plastics Handbook for the Technologist, Engineer and User", edición # 3, Editorial Carl Hanser Verlag, pp. 183, 184.

## **ANEXOS**

## Anexo I

### Valores bibliográficos de la densidad de la solución de cloruro de sodio

En la Tabla A 1, se indica la cantidad máxima de sal común que se puede agregar en 1 000 ml de agua destilada para obtener la densidad de la solución de cloruro de sodio igual a 1,1972 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla A 1** Preparación de soluciones de cloruro de sodio

Gravedad específica	Peso de la solución de NaCl expresada en			NaCl %	Grados	
	Gramos por litro	Libras por galones U.S.	Libras por pie cúbico		Baumé	Twaddell
1,0053	10,05	0,08390	0,6276	1	0,8	1,06
1,0125	20,25	0,1690	1,264	2	1,8	2,50
1,0268	41,07	0,3428	2,564	4	3,8	5,36
1,0413	62,48	0,5214	3,901	6	5,8	8,26
1,0559	84,47	0,7050	5,274	8	7,7	11,18
1,0707	107,1	0,8935	6,684	10	9,6	14,14
1,0857	130,3	1,087	8,134	12	11,5	17,14
1,1009	154,1	1,286	9,622	14	13,3	20,18
1,1162	178,6	1,490	11,15	16	15,1	23,24
1,1319	203,7	1,700	12,72	18	16,9	26,38
1,1478	229,6	1,916	14,33	20	18,7	29,56
1,1640	256,1	2,137	15,99	22	20,4	32,80
1,1804	283,3	2,364	17,69	24	22,2	36,08
1,1972	311,3	2,598	19,43	26	23,9	39,44

(Stevens, 1941)

## Anexo II

### Cálculo de la densidad del agua potable a 20°C

El cálculo de la densidad del agua potable a 20 °C se realizó con la ecuación [1].

$$\rho_l = \frac{m_a - m_l}{10} + 0.0012 \left( \frac{g}{cm^3} \right) \quad [1]$$

Donde:

$m_a$  = peso del cuerpo de desplazamiento en aire = 22,2207 g

$m_l$  = peso del cuerpo de desplazamiento en el agua potable = 12,2336 g

Se reemplaza los valores en la ecuación [1] y se obtiene la densidad del agua potable a 20°C.

$$\rho_l = \frac{(22,2207 - 12,2336)}{10} + 0,0012 \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\rho_l = \frac{9,9871}{10} + 0,0012 \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

$$\rho_l = 0,99871 + 0,0012 \left( \frac{g}{cm^3} \right) = 0,9999 \left( \frac{g}{cm^3} \right)$$

### Anexo III

#### Tablas de las densidades experimentales de los plásticos vírgenes y reciclados

En las Tablas siguientes se muestran las densidades experimentales de los plásticos vírgenes y reciclados.

**Tabla A 2** Densidades experimentales del PEAD virgen y criterio crítico Q (Qc)

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenado	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	
10 determinaciones							
0,2342	-0,0154	20,1	0,99821	0,9378	0,9341	0,117	Aceptado
0,2059	-0,0137	20,3	0,99817	0,9371	0,9357		
0,2343	-0,0164	20,3	0,99817	0,9341	0,9363		
0,2133	-0,0122	20,3	0,99817	0,9454	0,9371		
0,2225	-0,0132	20,4	0,99815	0,9435	0,9373		
0,2349	-0,0144	20,4	0,99815	0,9417	0,9378		
0,2294	-0,0124	20,4	0,99815	0,9482	0,9417		
0,2071	-0,0141	20,4	0,99815	0,9357	0,9435		
0,2093	-0,0141	20,5	0,99813	0,9363	0,9454		
0,2338	-0,0155	20,5	0,99813	0,9373	0,9482	0,198	
Promedio	0,9397	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0045	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 3** Densidades experimentales del PP virgen y criterio crítico Q (Qc)

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	---
Día 1, 10 determinaciones ( no se colocó la moneda)						
0,2919	-0,0329	19,1	0,99841	0,8985	0,8956	
0,2285	-0,0248	19,3	0,99837	0,9018	0,8961	
0,2391	-0,0262	19,4	0,99835	0,9010	0,8961	
0,2101	-0,0235	19,6	0,99831	0,8991	0,8969	
0,2793	-0,0320	19,7	0,99829	0,8969	0,8985	
0,2656	-0,0307	19,7	0,99829	0,8961	0,8991	
0,2822	-0,0309	19,8	0,99827	0,9010	0,9004	
0,2287	-0,0264	20,0	0,99823	0,8961	0,9010	
0,2688	-0,0312	20,0	0,99823	0,8956	0,9010	
0,2870	-0,0316	20,0	0,99823	0,9004	0,9018	
Promedio	0,8986	g/cm3	D.S.	0,0022	g/cm3	Rechazado
Día 1, 10 determinaciones						
0,2997	-0,0370	20,5	0,99813	0,8896	0,8864	0,351   Aceptado
0,2387	-0,0280	20,5	0,99813	0,8945	0,8896	
0,2847	-0,0330	20,5	0,99813	0,8957	0,8896	
0,2820	-0,0330	20,5	0,99813	0,8948	0,8924	
0,2744	-0,0320	20,5	0,99813	0,8951	0,8940	
0,2723	-0,0320	20,5	0,99813	0,8944	0,8944	
0,2835	-0,0350	20,5	0,99813	0,8896	0,8945	
0,2665	-0,0340	20,5	0,99813	0,8864	0,8948	
0,2796	-0,0330	20,5	0,99813	0,8940	0,8951	
0,2667	-0,0320	20,5	0,99813	0,8924	0,8957	0,061   Aceptado
Promedio	0,8926	g/cm3	D.S.	0,0031	g/cm3	
Día 2, 10 determinaciones						
0,2743	-0,0300	20,5	0,99813	0,9009	0,8892	0,002   Aceptado
0,2810	-0,0332	20,5	0,99813	0,8939	0,8908	
0,2585	-0,0302	20,6	0,99811	0,8949	0,8912	
0,2887	-0,0352	20,7	0,99808	0,8908	0,8916	
0,2379	-0,0283	20,8	0,99806	0,8932	0,8923	
0,2857	-0,0343	20,9	0,99804	0,8923	0,8932	
0,2603	-0,0316	20,9	0,99804	0,8912	0,8939	
0,2233	-0,0252	21,0	0,99802	0,8980	0,8949	
0,2325	-0,0281	21,0	0,99802	0,8916	0,8980	
0,2582	-0,0320	21,0	0,99802	0,8892	0,9009	0,248   Aceptado
Promedio	0,8936	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0036	g/cm <sup>3</sup>	
Promedio total	0,8931	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0033	g/cm <sup>3</sup>	

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 4** Densidades experimentales del PC virgen y cálculo del criterio Qc

<b>Peso en aire</b>	<b>Peso en agua</b>	<b>Temperatura</b>	<b>*Densidad agua destilada</b>	<b>Densidad plástico</b>	<b>Ordenado</b>	<b>Qc</b>	
<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>(g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>-</b>	
8 determinaciones							
1,2251	0,1988	20,6	0,99811	1,1926	1,1910	0,007	Acceptado
0,6340	0,1022	20,7	0,99808	1,1911	1,1911		
0,4402	0,0713	20,9	0,99804	1,1921	1,1911		
0,3924	0,0633	20,9	0,99804	1,1912	1,1912		
0,2635	0,0425	21,0	0,99802	1,1911	1,1921		
0,2851	0,0492	21,0	0,99802	1,2074	1,1926		
0,2646	0,0442	21,0	0,99802	1,1994	1,1994		
0,2575	0,0415	21,0	0,99802	1,1910	1,2074	0,488	Acceptado
Promedio	1,1945	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0059	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 5** Densidades experimentales del PET virgen y cálculo del criterio  $Q_c$

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenado	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
Día 1, (7 determinaciones)							
0,2551	0,0718	18,4	0,99855	1,3909	1,3885	0,001	Aceptado
0,2722	0,0782	18,4	0,99855	1,4023	1,3904		
0,2855	0,0800	18,5	0,99853	1,3885	1,3909		
0,2654	0,0762	18,5	0,99853	1,4019	1,3930		
0,2611	0,0744	18,6	0,99851	1,3976	1,3976		
0,3036	0,0858	18,7	0,99849	1,3930	1,4019		
0,4579	0,1288	18,8	0,99847	1,3904	1,4023	0,027	Aceptado
Promedio	1,3949	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0056	g/cm <sup>3</sup>		
Día 2, (10 determinaciones)							
0,6768	0,1922	18,3	0,99857	1,3958	1,3852	0,004	Aceptado
0,3541	0,1013	18,5	0,99853	1,3999	1,3896		
0,3737	0,1075	18,6	0,99851	1,4029	1,3917		
0,4393	0,1240	18,6	0,99851	1,3924	1,3924		
0,4753	0,1357	18,7	0,99849	1,3987	1,3958		
0,4791	0,1363	19,1	0,99841	1,3966	1,3963		
0,3974	0,1130	19,3	0,99837	1,3963	1,3966		
0,3869	0,1078	19,4	0,99835	1,3852	1,3987		
0,4841	0,1360	19,4	0,99835	1,3896	1,3999		
0,4765	0,1344	19,5	0,99833	1,3917	1,4029	0,174	Aceptado
Promedio	1,3949	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0053	g/cm <sup>3</sup>		
Promedio total	1,3949	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0054	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 6** Densidades experimentales del PVC virgen y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenado	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
10 mediciones							
0,7171	0,1813	17,4	0,9987	1,3378	1,3343	0,070	Rechazado
0,5572	0,1411	17,5	0,9987	1,3386	1,3351		
0,7851	0,1973	17,6	0,9987	1,3351	1,3378		
0,4598	0,1173	17,7	0,9987	1,3419	1,3386		
0,7661	0,1943	17,8	0,9987	1,3393	1,3389		
0,6147	0,1581	18,0	0,9986	1,3456	1,3393		
0,4780	0,1220	18,0	0,9986	1,3420	1,3419		
0,8811	0,2211	18,0	0,9986	1,3343	1,3420		
0,4628	0,1186	18,0	0,9986	1,3439	1,3439		
0,9172	0,2325	18,2	0,9986	1,3389	1,3456	0,150	Aceptado
Promedio	1,3397	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0036	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 7** Densidades experimentales del PEAD reciclado y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenado	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	---	
10 determinaciones							
0,3097	-0,0246	21,7	0,99786	0,9256	0,9033	0,071	Aceptado
0,4313	-0,0444	21,8	0,99784	0,9059	0,9049		
0,2997	-0,0298	21,4	0,99793	0,9089	0,9053		
0,3433	-0,0347	21,5	0,99791	0,9075	0,9059		
0,3575	-0,0317	21,5	0,99791	0,9178	0,9075		
0,3348	-0,0304	21,6	0,99789	0,9160	0,9089		
0,2496	-0,0259	21,6	0,99789	0,9053	0,9104		
0,2352	-0,0245	21,7	0,99786	0,9049	0,9160		
0,3087	-0,0301	21,7	0,99786	0,9104	0,9178		
0,2649	-0,0281	21,8	0,99784	0,9033	0,9256	0,350	Aceptado
Promedio	0,9106	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0071	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 8** Densidades experimentales del PP reciclado y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
Día 1, 10 determinaciones							
0,4535	-0,0775	21,4	0,99793	0,8535	0,8405	0,064	Acceptado
0,5097	-0,0913	21,5	0,99791	0,8475	0,8416		
0,4908	-0,0920	21,5	0,99791	0,8416	0,8444		
0,4577	-0,0839	21,5	0,99791	0,8445	0,8445		
0,4701	-0,0850	21,5	0,99791	0,8463	0,8463		
0,5167	-0,0858	21,5	0,99791	0,8570	0,8475		
0,7745	-0,1305	21,5	0,99791	0,8552	0,8528		
0,6817	-0,1171	21,6	0,99789	0,8528	0,8535		
0,4209	-0,0772	21,6	0,99789	0,8444	0,8552		
0,3822	-0,0722	21,6	0,99789	0,8405	0,8570	0,109	Acceptado
Promedio	0,8483	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0059	g/cm <sup>3</sup>		
Día 2, 10 determinaciones							
0,5725	-0,0940	20,5	0,99813	0,8586	0,8061	0,239	Acceptado
0,4287	-0,0739	20,5	0,99813	0,8526	0,8187		
0,4295	-0,0929	20,5	0,99813	0,8218	0,8218		
0,5149	-0,1138	20,5	0,99813	0,8187	0,8381		
0,4793	-0,0892	20,5	0,99813	0,8427	0,8427		
0,3841	-0,0740	20,5	0,99813	0,8381	0,8433		
0,4487	-0,0829	20,5	0,99813	0,8437	0,8437		
0,5078	-0,0878	20,4	0,99815	0,8522	0,8522		
0,4116	-0,0763	20,4	0,99815	0,8433	0,8526		
0,4557	-0,1094	20,4	0,99815	0,8061	0,8586	0,114	Acceptado
Promedio	0,8378	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0169	g/cm <sup>3</sup>		
Promedio total	0,8431	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0114	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 9** Densidades experimentales del PC reciclado y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
Día 1, 4 determinaciones							
0,1729	0,0270	21,0	0,99802	1,1839	1,1610	0,504	Acceptado
0,2345	0,0355	21,0	0,99802	1,1773	1,1725		
0,1513	0,0211	21,0	0,99802	1,1610	1,1773		
0,1743	0,0258	21,3	0,99795	1,1725	1,1839	0,290	Acceptado
Promedio	1,1737	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0097	g/cm <sup>3</sup>		
Día 2, 3 determinaciones							
0,1563	0,0244	20,2	0,99819	1,1840			
0,2150	0,0326	20,2	0,99819	1,1778			
0,2995	0,0456	20,4	0,99815	1,1786			
Promedio	1,1802	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0034	g/cm <sup>3</sup>		
Día 3, 5 determinaciones							
0,2455	0,0378	20,5	0,99813	1,1810	1,1630	0,229	Acceptado
0,3026	0,0450	20,5	0,99813	1,1737	1,1688		
0,4790	0,0675	20,6	0,99811	1,1630	1,1737		
0,4057	0,0589	20,6	0,99811	1,1688	1,1810		
0,3152	0,0502	21,0	0,99802	1,1883	1,1883	0,289	Acceptado
Promedio	1,1750	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0099	g/cm <sup>3</sup>		
Promedio total	1,1763	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0077	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 10** Densidades experimentales del PVC reciclado y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
Día 1, 5 determinaciones							
0,6893	0,1799	20,6	0,99811	1,3518	1,3285	0,193	Aceptado
0,6299	0,1611	20,6	0,99811	1,3423	1,3354		
0,4419	0,1096	20,6	0,99811	1,3285	1,3423		
0,6983	0,1759	20,6	0,99811	1,3354	1,3518		
0,2413	0,0646	20,8	0,99806	1,3641	1,3641	0,346	Aceptado
Promedio	1,3444	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0140	g/cm <sup>3</sup>		
Día 2, 4 determinaciones							
0,5952	0,1524	21,9	0,99782	1,3424	1,3129	0,284	Aceptado
0,8184	0,2106	21,9	0,99782	1,3448	1,3220		
0,7221	0,1728	21,9	0,99782	1,3129	1,3424		
0,6147	0,1503	21,9	0,99782	1,3220	1,3448	0,073	Aceptado
Promedio	1,3305	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0156	g/cm <sup>3</sup>		
Promedio total	1,3375	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0148	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 11** Densidades experimentales del PET reciclado de distintos tamaños y cálculo del criterio Qc

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
Día 1, (10 determinaciones)							
0,0779	0,0134	21,0	0,99802	1,2066	1,0238	0,128	Aceptado
0,0624	0,0015	21,0	0,99802	1,0238	1,0498		
0,1056	0,0147	21,0	0,99802	1,1606	1,0824		
0,0936	0,0072	21,0	0,99802	1,0824	1,1025		
0,3389	0,0430	21,5	0,99791	1,1441	1,1417		
0,1635	0,0079	21,5	0,99791	1,0498	1,1441		
0,1445	0,0224	21,5	0,99791	1,1822	1,1606		
0,1606	0,0298	21,5	0,99791	1,2265	1,1822		
0,0895	0,0084	21,5	0,99791	1,1025	1,2066		
0,1456	0,0182	21,5	0,99791	1,1417	1,2265	0,098	Aceptado
Promedio	1,1320	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0666	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 12** Densidades experimentales del PET reciclado de tamaños > a 4,75 mm

Peso en aire (g)	Peso en agua (g)	Temperatura (°C)	*Densidad agua destilada (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad plástico (g/cm <sup>3</sup> )	Ordenados (g/cm <sup>3</sup> )	Qc
Día 1, (3 determinaciones)						
0,2386	0,035	22	0,9978	1,1705	1,142	
0,2439	0,0306	22,5	0,99768	1,142	1,1644	
0,3135	0,0446	22,5	0,99768	1,1644	1,1705	
Promedio	1,159	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,015	g/cm <sup>3</sup>	
Día 2, (2 determinaciones)						
0,076	0,0111	20	0,99823	1,1702	1,1591	
0,1965	0,0271	20	0,99823	1,1591	1,1702	
Promedio	1,1646	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0078	g/cm <sup>3</sup>	
Día 3, (7 determinaciones)						
0,2097	0,0306	20	0,99823	1,17	1,163	0,075
0,1864	0,0362	20	0,99823	1,24	1,1688	Acceptado
0,2815	0,0429	20,1	0,99821	1,1789	1,17	
0,2455	0,0378	20,5	0,99813	1,181	1,1737	
0,3026	0,045	20,5	0,99813	1,1737	1,1789	
0,479	0,0675	20,6	0,99811	1,163	1,181	0,117
0,4057	0,0589	20,6	0,99811	1,1688	1,24	0,767
Promedio	1,1726	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0067	g/cm <sup>3</sup>	Rechazado
Día 4, (10 determinaciones)						
0,4159	0,0695	20,5	0,99813	1,1996	1,141	0,286
0,3402	0,0423	20,6	0,99811	1,141	1,1714	Acceptado
0,3836	0,0624	20,8	0,99806	1,1932	1,1746	
0,3632	0,0579	21	0,99802	1,1885	1,1777	
0,2958	0,0498	21,1	0,998	1,2012	1,1885	
0,3907	0,0724	21,2	0,99798	1,2262	1,1932	
0,36	0,053	21,5	0,99791	1,1714	1,1996	
0,3302	0,0657	21,5	0,99791	1,247	1,2012	
0,3405	0,0517	21,6	0,99789	1,1777	1,2262	
0,26	0,0389	21,7	0,99786	1,1746	1,247	0,196
Promedio	1,1920	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0296	g/cm <sup>3</sup>	Acceptado
Promedio	1,1721	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0148	g/cm <sup>3</sup>	

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 13** Densidades experimentales del PET reciclado de tamaños  $-4,75 + 3,32$  mm

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
10 determinaciones							
0,2630	0,0599	21,8	0,99784	1,2933	1,2700	0,049	Acceptado
0,2980	0,0659	21,9	0,99782	1,2823	1,2720		
0,1910	0,0433	22,0	0,99780	1,2915	1,2800		
0,2275	0,0516	22,0	0,99780	1,2917	1,2823		
0,2046	0,0489	22,0	0,99780	1,3124	1,2836		
0,1976	0,0422	22,0	0,99780	1,2700	1,2915		
0,2113	0,0454	22,1	0,99777	1,2720	1,2917		
0,2739	0,0608	22,3	0,99773	1,2836	1,2933		
0,3044	0,0669	22,3	0,99773	1,2800	1,2934		
0,2181	0,0497	22,4	0,99771	1,2934	1,3124	0,448	Acceptado
Promedio	1,2870	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0123	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Tabla A 14** Densidades experimentales del PET perforado por la marca de botella

Peso en aire (g)	Peso en agua (g)	Temperatura (°C)	*Densidad agua destilada (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad plástico (g/cm <sup>3</sup> )	Ordenados (g/cm <sup>3</sup> )	Qc -
Coca cola 450 ml						
0,1974	0,0528	20,4	0,99815	1,3638		
0,1525	0,0434	20,6	0,99811	1,3964		
0,2160	0,0553	20,0	0,99823	1,3429		
Promedio	1,3677	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0269	g/cm <sup>3</sup>	
Coca cola fioravanti 2lt						
0,1670	0,0446	20,8	0,99806	1,3629	1,3629	0,799 Aceptado
0,1627	0,0448	20,9	0,99804	1,3785	1,3755	
0,1710	0,0471	21,0	0,99802	1,3786	1,3785	
0,1651	0,0452	21,0	0,99802	1,3755	1,3786	0,009 Aceptado
Promedio	1,3739	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0074	g/cm <sup>3</sup>	
Pepsi de 450 ml						
0,1956	0,0522	21,0	0,99802	1,3625	1,2964	0,645 Aceptado
0,2188	0,0502	21,1	0,99800	1,2964	1,3440	
0,2103	0,0540	21,2	0,99798	1,3440	1,3625	
0,1643	0,0445	20,0	0,99823	1,3702	1,3702	0,104 Aceptado
Promedio	1,3433	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0332	g/cm <sup>3</sup>	
Nesté 450 ml						
0,0829	0,0231	19,5	0,99833	1,3852	1,3852	
0,0904	0,0263	19,7	0,99829	1,4091	1,4091	
0,0847	0,0252	19,9	0,99825	1,4222	1,4222	
Promedio	1,4055	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0188	g/cm <sup>3</sup>	
All natural agua 450 ml						
0,1389	0,0382	18,5	0,99853	1,3785		
0,1137	0,0294	18,7	0,99849	1,3479		
0,1249	0,0303	18,9	0,99845	1,3194		
Promedio	1,3486	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0295	g/cm <sup>3</sup>	
Cifrut 450 ml						
0,1427	0,0342	19,0	0,99843	1,3143		
0,1226	0,0308	19,3	0,99837	1,3345		
0,1316	0,0338	19,4	0,99835	1,3446		
Promedio	1,3312	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0154	g/cm <sup>3</sup>	
All Natural limonada 450 ml (color verde)						
0,1763	0,0488	21,5	0,99791	1,3811	1,3195	0,015 Aceptado
0,1726	0,0440	21,7	0,99786	1,3405	1,3405	
0,1722	0,0450	21,9	0,99782	1,3520	1,3520	
0,1178	0,0344	20,4	0,99815	1,4111	1,3811	
0,1186	0,0288	20,4	0,99815	1,3195	1,4111	0,328 Aceptado
Promedio	1,3608	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0358	g/cm <sup>3</sup>	

**Tabla A 15** Densidades experimentales del PET perforado con mezcla de botellas de marcas diferentes

Peso en aire	Peso en agua	Temperatura	*Densidad agua destilada	Densidad plástico	Ordenados	Qc	
(g)	(g)	(°C)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	-	
10 determinaciones							
0,1569	0,0388	22,5	0,99768	1,3267	1,2885	0,388	Acceptado
0,1793	0,0502	22,5	0,99768	1,3868	1,3267		
0,2182	0,0581	22,5	0,99768	1,3609	1,3354		
0,1877	0,0508	22,5	0,99768	1,3691	1,3482		
0,2249	0,0616	22,6	0,99766	1,3752	1,3609		
0,2818	0,0634	22,6	0,99766	1,2885	1,3691		
0,1683	0,0456	22,6	0,99766	1,3696	1,3696		
0,3025	0,0763	22,6	0,99766	1,3354	1,3752		
0,2059	0,0534	22,6	0,99766	1,3482	1,3868	0,118	Acceptado
0,1487	0,0487	22,6	0,99766	1,4847	1,4847	0,499	Rechazado
Promedio	1,3512	g/cm <sup>3</sup>	D.S.	0,0304	g/cm <sup>3</sup>		

(\*Mettler, 1997)

**Anexo IV**  
**Valores del criterio crítico tabulado ( $Q_{TAB}$ )**

En la Tabla A 16 se muestran los valores del criterio crítico tabulado  $Q_{TAB}$  para un intervalo de confianza de 95 %.

**Tabla A 16** Valores del criterio crítico tabulado ( $Q_{TAB}$ )

<b>Tamaño de muestra</b>	<b>Valor crítico tabulado</b>
<b>(n)</b>	<b>(<math>Q_{TAB}</math>)</b>
4	0,831
5	0,717
6	0,621
7	0,570
8	0,524
9	0,492
10	0,464

(Miller, 1993)

## Anexo V

### Valores críticos de t ( $t_c$ )

En la Tabla A 17 se muestran los valores críticos de t para un intervalo de confianza t(S), siendo S la certidumbre estadística deseada.

**Tabla A 17** Valores críticos de t ( $t_c$ )

Tamaño de muestra	t(S=95, P= 0,05)	t(S=99, P= 0,01)
n		
1	12,71	63,66
2	4,3	9,92
3	3,18	5,84
4	2,78	4,6
5	2,57	4,03
10	2,23	3,17
20	2,09	2,85
30	2,04	2,75
50	2,01	2,68
100	1,98	2,63

## Anexo VI

### Ejemplo de cálculo de las densidades de los plásticos

- Densidades de los plásticos flotados y sumergidos

Para el ejemplo de cálculo se usaron los datos de las densidades experimentales del PEAD virgen, como se muestra en la Tabla A 2.

Se calcularon las densidades del PEAD con la ecuación [2].

$$\rho_S = \frac{m_a}{(m_a - m_l)} * \rho_l + 0.0012 \quad [2]$$

Donde:

$m_a$ : peso del plástico en aire

$m_l$ : peso del plástico en el agua destilada

$$\rho_S = \frac{0,2342}{(0,2342 - (-0,0154))} * 0,99821 + 0,0012$$

$$\rho_S = \frac{0,2342}{0,2496} * 0,99821 + 0,0012$$

$$\rho_S = 0,9366 + 0,0012 = 0,9378$$

El cálculo del criterio crítico Q ( $Q_C$ ) mediante la ecuación [4], sólo para los valores menor y mayor del rango de densidades. Para este caso 0,9341 g/cm<sup>3</sup> y 0,9482 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

$$Q_C = \frac{\text{valor sospechoso} - \text{valor más próximo}}{\text{valor mayor} - \text{valor menor}} \quad [A.1]$$

$$Q_C = -\frac{(0,9341 - 0,9357)}{(0,9482 - 0,9341)} = 0,117, \quad Q_{TAB} = 0,464 > Q_C = 0,117$$

$$Q_C = \frac{(0,9482-0,9454)}{(0,9482-0,9341)} = 0,198, Q_{TAB} = 0,464 > Q_C = 0,198$$

El  $Q_{TAB}$  es 0,464 porque son 10 determinaciones, como se muestra en el Anexo IV, tanto como para el mayor y menor valor del rango de densidades del PEAD virgen los  $Q_C$  son menores que el  $Q_{TAB}$ , por lo tanto las densidades se aceptan para el cálculo de la densidad promedio.

$$\rho_p = \frac{(0,9341 + 0,9357 + 0,9363 + \dots + 0,9482)}{10} = 0,9397 \frac{g}{cm^3}$$

Cálculo de la desviación estándar

$$D.S. = \sqrt{\frac{(0,9341 - 0,9397)^2 + (0,9357 - 0,9397)^2 + \dots + (0,9482 - 0,9397)^2}{10 - 1}} = 0,0045 \frac{g}{cm^3}$$

Los datos de las densidades experimentales del PP virgen se realizaron a 2 condiciones diferentes, en el primer grupo de determinaciones no se colocó la moneda de 1 centavo sobre el platillo de la cesta de sólidos flotantes, pero para el segundo grupo de determinaciones se colocó la moneda, como lo muestran los datos presentados en Tabla A 2. Para aceptar las dos medias de cada grupo como verdaderas se aplicó el método de medias de prueba t.

Para la cual se asumió como media aritmética verdadera, la obtenida al colocar la moneda la cual corresponde  $0,8926 \text{ g/cm}^3$ .

Primero: se cálculo la desviación estándar combinada con la ecuación [5].

$$D.S.C. = \sqrt{\frac{(n_A-1)*D.S._A^2 + (n_B-1)*D.S._B^2}{n_A+n_B-2}} \quad [A.2]$$

Donde:

$n_A$  y  $n_B$  : tamaños de las muestras

$D.S._A$  y  $D.S._B$ : desviación estándar de cada muestra

$n-1$ : grados de libertad

Se reemplazaron los datos de la tabla A 2 en la ecuación [5] para obtener la D.S.C.

$$D.S.C. = \sqrt{\frac{(10-1)*0,0023^2 + (10-1)*0,0031^2}{10+10-2}} = 0,0027$$

Segundo: se calculó  $\tau$  con la ecuación [6].

$$\tau = \left| \frac{(\rho_A - \rho_B)}{D.S.C} \right| * \sqrt{\frac{n_A * n_B}{(n_A + n_B)}} \quad [A.3]$$

Donde:

$(\rho_A)$ : densidad promedio para la primera condición

$(\rho_B)$ : densidad promedio para la segunda condición

$$\tau = \left| \frac{(0,8986 - 0,8926)}{0,0027} \right| * \sqrt{\frac{10 * 10}{(10 + 10)}}$$

$$\tau = 4,96$$

Según el Anexo V, para 18 grados de libertad el  $t_{C18(95\%)} = 2,10$  es  $< \tau = 4,96$  por lo tanto  $\rho_A$  (densidad promedio sin la moneda) difiere significativamente  $\rho_B$ , con una probabilidad del 95%. Las dos condiciones difieren, por tanto la  $\rho_A$  determinada sin colocar la moneda de 1 centavo sobre el plato de la cesta para sólidos flotantes no sirve para calcular la densidad promedio total del PP.

## Anexo VII

### Propiedades de los plásticos

En la Tabla A 18, se indican las propiedades térmicas del PEAD, PP, PC y PET útiles para el análisis de los resultados de la calorimetría diferencial de barrido.

**Tabla A 18** Propiedades de los plásticos

Plásticos	Densidad	Temperatura fusión, T <sub>m</sub>	Norma	Temperatura transición vítrea, T <sub>g</sub>
	(g/cm <sup>3</sup> )	(°C)		(°C)
PEAD	0,941-0,965 (a 23°C)	130-137	ASTM	
PP-H isotáctico (semicristalino, 60-70%)	0,900-0,910 (a 23°C)	168	ASTM	0-20
PC	1,20-1,24			145
PET amorfo, semicristalino	1,38-1,40 (semicristalino)	250-260		70-80

(Wilbrand, 1995; Gottfried, 2004)

## Anexo VIII

### Cálculo del contenido de cenizas

En la Tabla A 19 y Tabla A 20, se muestra el cálculo del contenido de cenizas para el PEAD, PP, PC y PET vírgenes y reciclados respectivamente.

**Tabla A 19** Contenido de cenizas plásticos vírgenes

Característica	PEAD		PP		PC		PET	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Peso del crisol, $W_1$ (g)	25,549	25,5214	32,0346	32,2457	33,3156	32,2379	32,2407	32,0368
Peso muestra (g)	10,1404	10,0535	10,5128	10,0033	10,0424	5,063	5,062	5,0795
Peso c+m, $W_2$ (g)	35,6894	35,5749	42,5474	42,249	43,358	37,3009	37,3027	37,1163
Peso c+ c, $W_3$ (g)	25,5504	25,5226	32,0351	32,246	33,318	32,2416	32,241	32,0388
Inorgánicos (%)	0,0138	0,0119	0,0048	0,003	0,0239	0,0731	0,0059	0,0394
Promedio (%)	0,0129		0,0039		0,0485		0,0227	
Desviación estándar	0,0013		0,0012		0,0348		0,0237	

Peso c + m: peso del crisol más el peso de la muestra

Peso c + c: peso del crisol más el peso de las cenizas

**Tabla A 20** Contenido de cenizas plásticos reciclados

Característica	PEAD		PP		PC			PET	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2	M3	M1	M2
Peso del crisol, $W_1$ (g)	33,3165	32,2214	32,2377	32,2013	33,3205	25,548	32,2385	32,0346	32,0369
Peso muestra (g)	10,0052	9,9958	9,9942	10,0009	5,039	5,0686	10,0336	5,0753	5,0598
Peso c+m, $W_2$ (g)	43,3217	42,2172	42,2319	42,2022	38,3595	30,6166	42,2721	37,1099	37,0967
Peso c+ c, $W_3$ (g)	33,4013	32,2915	32,2469	32,2059	33,3215	25,582	32,2486	32,0361	32,037
Inorgánicos (%)	0,8476	0,7013	0,0921	0,0460	0,0198	0,6708	0,1007	0,0296	0,0020
Promedio (%)	0,7744		0,0690		0,2638			0,0158	
Desviación estándar	0,1034		0,0326		0,3548			0,0195	

Peso c + m: peso del crisol más el peso de la muestra

Peso c + c: peso del crisol más el peso de las cenizas

## Anexo IX

### Comportamiento de los plásticos

En las Tablas siguientes se muestran los datos experimentales del comportamiento de cada plástico ya sea en agua potable y solución de cloruro de sodio de densidad  $1,197 \text{ g/cm}^3$ , con variación de la velocidad de agitación.

**Tabla A 21** Comportamiento del PEAD virgen en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0470	0,0000	10,0470	100,00	0,00
10,0358	0,0000	10,0358	100,00	0,00
10,0349	0,0000	10,0349	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 22** Comportamiento del PP virgen en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0507	0,0000	10,0507	100,00	0,00
10,0108	0,0000	10,0108	100,00	0,00
10,2363	0,0000	10,2363	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 23** Comportamiento del PC virgen en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,0607	10,0607	0,00	100,00
0,0000	10,0988	10,0988	0,00	100,00
0,0434	10,0057	10,0491	0,43	99,57
0,0606	10,0580	10,1186	0,60	99,40
0,0135	10,1043	10,1178	0,13	99,87
0,0571	9,9825	10,0396	0,57	99,43
Promedio			0,29	99,71
Desviación estándar			0,28	0,28

**Tabla A 24** Comportamiento del PET virgen en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,0029	10,0029	0,00	100,00
0,0000	10,0105	10,0105	0,00	100,00
0,0000	10,0240	10,0240	0,00	100,00
0,0000	10,0096	10,0096	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 25** Comportamiento del PVC virgen en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,2322	10,2322	0,00	100,00
0,0000	10,0306	10,0306	0,00	100,00
0,0000	10,0212	10,0212	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 26** Comportamiento del PEAD virgen en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,4103	0,0000	10,4103	100,00	0,00
10,0222	0,0000	10,0222	100,00	0,00
10,0172	0,0000	10,0172	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 27** Comportamiento del PP virgen en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,8217	0,0000	10,8217	100,00	0,00
10,0547	0,0000	10,0547	100,00	0,00
10,0116	0,0000	10,0116	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 28** Comportamiento del PC virgen en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0956	9,9103	10,0059	0,96	99,04
0,0621	10,0317	10,0938	0,62	99,38
0,1971	10,0381	10,2352	1,93	98,07
0,0000	10,0293	10,0293	0,00	100,00
Promedio			0,87	99,13
Desviación estándar			0,80	0,80

**Tabla A 29** Comportamiento del PET virgen en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0281	10,0402	10,0683	0,28	99,72
0,0185	9,9863	10,0048	0,18	99,82
0,0742	9,9755	10,0497	0,74	99,26
0,0181	9,9947	10,0128	0,18	99,82
Promedio			0,35	99,65
Desviación estándar			0,27	0,27

**Tabla A 30** Comportamiento del PVC virgen en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0247	9,9975	10,0222	0,25	99,75
0,0786	10,0546	10,1332	0,78	99,22
0,0000	10,0845	10,0845	0,00	100,00
0,0000	10,1139	10,1139	0,00	100,00
Promedio			0,26	99,74
Desviación estándar			0,37	0,37

**Tabla A 31** Comportamiento del PC virgen en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,2309	10,2309	0,00	100,00
0,0000	10,4211	10,4211	0,00	100,00
0,0000	10,0143	10,0143	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 32** Comportamiento del PET virgen en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,0000	10,2358	10,2358	0,00	100,00
0,0000	10,1413	10,1413	0,00	100,00
0,0000	10,0123	10,0123	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 33** Comportamiento del PVC virgen en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,0000	10,2179	10,2179	0,00	100,00
0,0000	10,1504	10,1504	0,00	100,00
0,0000	10,0052	10,0052	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 34** Comportamiento del PC virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0058	0,0000	10,0058	100,00	0,00
10,0518	0,0000	10,0518	100,00	0,00
10,0217	0,0000	10,0217	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 35** Comportamiento del PET virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,7444	9,2872	10,0316	7,42	92,58
0,5722	9,7803	10,3525	5,53	94,47
0,0584	9,9663	10,0247	0,58	99,42
0,0791	9,9644	10,0435	0,79	99,21
0,0997	9,9014	10,0011	1,00	99,00
0,4374	9,6191	10,0565	4,35	95,65
0,4367	9,6653	10,1020	4,32	95,68
0,1100	9,9008	10,0108	1,10	98,90
Promedio			3,14	96,86
Desviación estándar			2,61	2,61

**Tabla A 36** Comportamiento del PVC virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,4585	9,5591	10,0176	4,58	95,42
0,6575	9,3598	10,0173	6,56	93,44
0,0968	9,9612	10,0580	0,96	99,04
Promedio			4,03	95,97
Desviación estándar			2,84	2,84

**Tabla A 37** Comportamiento del PC virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
10,1078	0,0000	10,1078	100,00	0,00
10,0239	0,0000	10,0239	100,00	0,00
10,3511	0,0000	10,3511	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 38** Comportamiento del PET virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,0000	10,2306	10,2306	0,00	100,00
0,0000	10,0283	10,0283	0,00	100,00
0,0000	10,0353	10,0353	0,00	100,00
0,0000	10,0124	10,0124	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 39** Comportamiento del PVC virgen en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	G	%	%
0,0000	10,0575	10,0575	0,00	100,00
0,0000	10,0105	10,0105	0,00	100,00
0,0000	10,0129	10,0129	0,00	100,00
Promedio			0,00	100

**Tabla A 40** Comportamiento del PEAD reciclado en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0096	0,0000	10,0096	100,00	0,00
10,0073	0,0000	10,0073	100,00	0,00
10,0051	0,0000	10,0051	100,00	0,00
10,0048	0,0000	10,0048	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 41** Comportamiento del PP reciclado en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0024	0,0000	10,0024	100,00	0,00
10,0197	0,0000	10,0197	100,00	0,00
10,0112	0,0000	10,0112	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 42** Comportamiento del PC reciclado en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,1185	9,9041	10,0226	1,18	98,82
0,2688	9,7374	10,0062	2,69	97,31
0,1185	9,8722	9,9907	1,19	98,81
0,4479	9,5851	10,0330	4,46	95,54
0,2336	9,7971	10,0307	2,33	97,67
Promedio			2,37	97,63
Desviación estándar			1,35	1,35

**Tabla A 43** Comportamiento del PET reciclado en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,6323	9,3800	10,0123	6,32	93,68
0,5166	9,4785	9,9951	5,17	94,83
0,4565	9,5731	10,0296	4,55	95,45
0,7056	9,2980	10,0036	7,05	92,95
Promedio			5,77	94,23
Desviación estándar			1,12	1,12

**Tabla A 44** Comportamiento del PVC reciclado en agua potable en reposo

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,0069	10,0069	0,00	100,00
0,0000	10,0046	10,0046	0,00	100,00
0,0000	10,0160	10,0160	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 45** Comportamiento del PEAD reciclado en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0071	0,0000	10,0071	100,00	0,00
10,1296	0,0000	10,1296	100,00	0,00
10,1095	0,0000	10,1095	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 46** Comportamiento del PP reciclado en agua potable a 417 rpm

Cantidad	Cantidad	Cantidad	Recuperación	Recuperación
Flotada	Sedimentada	Total	Flotado	Sedimentado
g	g	g	%	%
10,6103	0,0000	10,6103	100,00	0,00
10,0778	0,0000	10,0778	100,00	0,00
10,1044	0,0000	10,1044	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 47** Comportamiento del PC reciclado en agua potable a 417 rpm

Cantidad	Cantidad	Cantidad	Recuperación	Recuperación
Flotada	Sedimentada	Total	Flotado	Sedimentado
g	g	g	%	%
1,8190	8,2269	10,0459	18,11	81,89
3,1939	6,8544	10,0483	31,79	68,21
2,4226	7,6656	10,0882	24,01	75,99
1,7864	8,2420	10,0284	17,81	82,19
2,6570	7,3698	10,0268	26,50	73,50
2,3081	7,7275	10,0356	23,00	77,00
Promedio			23,54	76,46
Desviación estándar			5,28	5,28

**Tabla A 48** Comportamiento del PET reciclado en agua potable a 417 rpm

Cantidad	Cantidad	Cantidad	Recuperación	Recuperación
Flotada	Sedimentada	Total	Flotado	Sedimentado
g	g	g	%	%
0,8103	9,2151	10,0254	8,08	91,92
0,8002	9,2054	10,0056	8,00	92,00
0,6538	9,3751	10,0289	6,52	93,48
0,6322	9,5107	10,1429	6,23	93,77
0,8338	9,6698	10,5036	7,94	92,06
Promedio			7,35	92,65
Desviación estándar			0,90	0,90

**Tabla A 49** Comportamiento del PVC reciclado en agua potable a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0869	9,9541	10,0410	0,87	99,13
0,1221	10,0270	10,1491	1,20	98,80
0,1656	9,8462	10,0118	1,65	98,35
Promedio			1,24	98,76
Desviación estándar			0,40	0,40

**Tabla A 50** Comportamiento del PC reciclado en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0239	10,0609	10,0848	0,24	99,76
0,0170	10,0535	10,0705	0,17	99,83
0,0372	10,6761	10,7133	0,35	99,65
0,0287	9,9929	10,0216	0,29	99,71
0,0476	9,9726	10,0202	0,48	99,52
0,0182	9,9967	10,0149	0,18	99,82
Promedio			0,28	99,72
Desviación estándar			0,12	0,12

**Tabla A 51** Comportamiento del PET reciclado en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,1726	9,8406	10,0132	1,72	98,28
0,0968	9,9046	10,0014	0,97	99,03
0,0908	9,9113	10,0021	0,91	99,09
0,1337	9,8755	10,0092	1,34	98,66
Promedio			1,23	98,77
Desviación estándar			0,38	0,38

**Tabla A 52** Comportamiento del PVC reciclado en agua potable a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Total</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0000	10,2179	10,2179	0,00	100,00
0,0000	10,0865	10,0865	0,00	100,00
0,0000	10,0514	10,0514	0,00	100,00
Promedio			0,00	100,00

**Tabla A 53** Comportamiento del PC reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,0613	0,0000	10,0613	100,00	0,00
9,9960	0,0000	9,9960	100,00	0,00
9,9920	0,0000	9,9920	100,00	0,00
9,9921	0,0000	9,9921	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 54** Comportamiento del PET reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
6,4474	3,7031	10,1505	63,52	36,48
6,5843	3,5924	10,1767	64,70	35,30
5,4556	4,7221	10,1777	53,60	46,40
Promedio			60,61	39,39
Desviación estándar			6,09	6,09

**Tabla A 55** Comportamiento del PVC reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 417 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,6923	9,3140	10,0063	6,92	93,08
0,295	9,7102	10,0052	2,95	97,05
0,7417	9,2631	10,0048	7,41	92,59
Promedio			5,76	94,24
Desviación estándar			2,45	2,45

**Tabla A 56** Comportamiento del PC reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
10,1210	0,0000	10,1210	100,00	0,00
10,0023	0,0000	10,0023	100,00	0,00
10,1226	0,0000	10,1226	100,00	0,00
Promedio			100,00	0,00

**Tabla A 57** Comportamiento del PET reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,7144	9,3002	10,0146	7,13	92,87
0,4382	9,5775	10,0157	4,38	95,62
0,5027	9,5163	10,0190	5,02	94,98
Promedio			5,51	94,49
Desviación estándar			1,44	1,44

**Tabla A 58** Comportamiento del PVC reciclado en solución de cloruro de sodio 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm

<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Recuperación</b>
<b>Flotada</b>	<b>Sedimentada</b>	<b>Final</b>	<b>Flotado</b>	<b>Sedimentado</b>
g	g	g	%	%
0,0239	10,0022	10,0261	0,24	99,76
0,0257	10,0185	10,0442	0,26	99,74
0,0000	10,0336	10,0336	0,00	100,00
Promedio			0,16	99,84
Desviación estándar			0,14	0,14

## Anexo X

### Separación del PC del PET y PVC reciclados

**Tabla A 59** Separación de PC del PET y PVC reciclados (-4,75 + 3,32 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 5min

Preparación de la solución	352,5 g de sal y 850 ml agua destilada, barra de agitación (10*52) (diámetro*ancho)						
# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	Flotado	9,8898	3,5231	0,0000	98,84	35,22	0,00
	Sedimentado	0,1158	6,4795	10,0048	1,16	64,78	100
	Total	10,0056	10,0026	10,0048	100	100	100
2	Flotado	9,8918	4,1438	0,0226	98,92	41,37	0,23
	Sedimentado	0,1081	5,8720	9,9606	1,08	58,63	99,77
	Total	9,9999	10,0158	9,9832	100	100	100
3	Flotado	9,9691	3,8305	0,0000	99,63	38,25	0,00
	Sedimentado	0,0371	6,1828	9,9663	0,37	61,75	100
	Total	10,0062	10,0133	9,9663	100	100	100
4	Flotado	10,0064	3,9487	0,0000	99,76	39,53	0,00
	Sedimentado	0,0240	6,0414	9,9734	0,24	60,47	100
	Total	10,0304	9,9901	9,9734	100	100	100
5	Flotado	9,9960	3,0122	0,0000	100	30,1	0,00
	Sedimentado	0,0000	6,9957	9,9845	0,00	69,9	100
	Total	9,9960	10,0079	9,9845	100	100	100
6	Flotado	10,0058	2,9186	0,0000	100	28,92	0,00
	Sedimentado	0,0000	7,1734	10,0095	0,00	71,08	100
	Total	10,0058	10,092	10,0095	100	100	100
	Flotado	Recuperación promedio (%)			99,53	35,57	0,04
	Sedimentado				0,47	64,43	99,96
	Flotado	Desviación estándar (%)			0,52	5,11	0,09
	Sedimentado				0,52	5,11	0,09

**Tabla A 60** Separación de PC del PET y PVC reciclados (-4,75+3,32 mm) con solución de cloruro de sodio densidad 1,197 g/cm<sup>3</sup> a 750 rpm, tiempo de agitación 3 a 5min

Preparación de la solución	320,5 g sal y 850 ml de agua destilada, barra de agitación (10*52)(diámetro*ancho)						
# pruebas	Producto	Contenido, g			Recuperación, %		
		PC	PET	PVC	PC	PET	PVC
1	<b>Flotado</b>	10,1278	3,5561	0,0000	<b>100,00</b>	<b>35,48</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0000	6,4677	10,0548	<b>0,00</b>	<b>64,52</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,1278	10,0238	10,0548	100,00	100,00	100,00
2	<b>Flotado</b>	10,3117	2,1651	0,0000	<b>99,73</b>	<b>21,56</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0274	7,8778	9,9775	<b>0,27</b>	<b>78,44</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,3391	10,0429	9,9775	100,00	100,00	100,00
3	<b>Flotado</b>	10,0276	1,7148	0,0000	<b>99,77</b>	<b>16,94</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>	0,0231	8,4091	10,1988	<b>0,23</b>	<b>83,06</b>	<b>100,00</b>
	Total	10,0507	10,1239	10,1988	100,00	100,00	100,00
	<b>Flotado</b>	Recuperación promedio (%)			<b>99,84</b>	<b>24,66</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,16</b>	<b>75,34</b>	<b>100,00</b>
	<b>Flotado</b>	Desviación estándar (%)			<b>0,14</b>	<b>9,65</b>	<b>0,00</b>
	<b>Sedimentado</b>				<b>0,14</b>	<b>9,65</b>	<b>0,00</b>