



# Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

**EDITOR**  
Teresa Perez

**PUBLICADO POR**



**ANCEFN**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

# **Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío**

---

**EDITOR**

Teresa Pérez

---

**PUBLICADO POR**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales [ANCEFN]

SERIE: PUBLICACIONES CIENTIFICAS N° 14 (2019)

Pérez, Teresa

Los residuos que generamos : su manejo sustentable, un gran desafío / Teresa Pérez. - 1a edición especial - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : ANCEFN - Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ; Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2019.

Libro digital, PDF/A - (Publicaciones científicas ; 14)

Archivo Digital: descarga y online

Edición para Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ISBN 978-987-4111-24-1

1. Cuidado del Medio Ambiente. 2. Desarrollo Sustentable. 3. Cambio Climático. I. Título.  
CDD 363.7

Fecha de catalogación: junio 2019

Esta publicación es propiedad de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ISBN 978-987-4111-24-1

Primera edición, Buenos Aires,

Copyright © by Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Toda la correspondencia referida a esta publicación debe dirigirse a:

*All enquires regarding this publication should be addressed to:*

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Av. Alvear 1711, 4° piso, (1014) Buenos Aires.

E-mail: [biblio@ancefn.org.ar](mailto:biblio@ancefn.org.ar)

Sitio web: [www.ancefn.org.ar](http://www.ancefn.org.ar)

Queda hecho el depósito previsto por la Ley 11.723

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta obra puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio electrónico o mecánico, incluyendo fotocopiado, grabación o cualquier otro sistema de archivo y recuperación de información, sin el previo permiso por escrito de la Academia.

## ÍNDICE

PREFACIO.....	1
LISTADO DE AUTORES.....	4
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>Carlos Alberto Fontán: Gestión de los residuos en el área metropolitana de Buenos Aires .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>José Luis Picone &amp; Giada Seraffini: Reciclado de Plásticos y Economía Circular.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 3</b>	
<b>Yamila V. Vazquez &amp; Silvia E. Barbosa: Reciclado de plásticos provenientes de artículos eléctricos y electrónicos. Situación actual y perspectiva .....</b>	<b>45</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>Rosana Gaggino, Jerónimo Kreiker, Lucas Peisino, María Paz Sanchez Amono, Julián Gonzalez Laría &amp; Melina Gómez: Elementos constructivos para viviendas sociales y ecológicas elaborados con plásticos reciclados. ....</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>Jimena Bernadette Dima &amp; Noemi E Zaritzky: Quitosano btenido de desechos de la industria pesquera y su aplicación como adsorbente de metales pesados .....</b>	<b>83</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>Natalia Cruz, Nadia Mazzeo, Ana Muzlera &amp; Adriana Rosso: Gestión integral de pilas y baterías .....</b>	<b>109</b>

## PREFACIO

El control del impacto que las actividades del ser humano tienen en el medio ambiente es, sin duda, un desafío para la sociedad moderna. El tema ha sido y es una preocupación de las Academias a nivel mundial; así lo remarca la declaración de la Conferencia de las Academias, llevada a cabo en Tokio, en el año 2000. Dicha declaración, se tituló "Transición a la Sustentabilidad en el Siglo 21: La Contribución de la Ciencia y la Tecnología" y fue suscripta por nuestra Academia. Allí se destaca que durante el siglo 21, la sociedad humana enfrenta la tarea atemorizante pero inspiradora de forjar una nueva relación con el mundo natural. Esta nueva relación se expresa por "la sustentabilidad", un concepto que ha surgido de varias conferencias internacionales dedicadas a las tendencias regionales y globales en población, desarrollo y medio ambiente. La sustentabilidad implica satisfacer las necesidades humanas actuales mientras se conserva el medio ambiente y los recursos naturales requeridos por generaciones futuras.

Consustanciada con esas premisas la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ha desarrollado y desarrolla numerosas actividades vinculadas al análisis y difusión de los aportes que la Ciencia y la Tecnología pueden hacer a esta problemática. Así, en el 2018, se co presidió con el Instituto de Biología Molecular y Celular de Rosario (IBR, CONICET-UNR), la reunión del S20 (grupo de afinidad conformado por las Academias de Ciencias de los países del G20), donde se desarrolló la temática de seguridad y nutrición alimentaria y agricultura. En la última reunión del S20, que tuvo lugar en Japón en el corriente año, nuestro representante abordó el tema de las amenazas al ecosistema marino y la conservación del medio ambiente marino.

El cambio climático es otro tema que recibe particular atención por parte de la Academia. En noviembre del 2018, el Presidente de nuestra Academia participó de la reunión de preparación del COP 24 UN Climate Summit, que se desarrolló en Polonia. Allí presentó un trabajo sobre el rol de las Academias de Ciencias como soporte a los objetivos de las Naciones Unidas en la temática de cambio climático. La Academia participa, también, en programas de Educación que apuntan a concientizar a los niños y jóvenes con esta problemática.

La generación y el manejo de residuos, tanto los urbanos como los resultantes de distintas actividades productivas, tienen relevante impacto en la sustentabilidad. En el siglo XX tuvo lugar un notable proceso de urbanización, que hizo que a la fecha más del 54 % de la población mundial resida en grandes ciudades. Otro aspecto social condicionante de la problemática de los residuos fue el cambio de concepción respecto a la vida útil de los productos. La filosofía de consumismo sumada a que, en muchos casos, los bienes se vuelven obsoletos en pocos años debido a cambios tecnológicos, provocó un enorme aumento de la cantidad de residuos e importantes desafíos para su manejo. El desarrollo industrial, trae aparejado enormes progresos y la posibilidad de disponer de productos cada vez

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío más sofisticados y accesibles, fomentado en parte, el incremento de residuos urbanos arriba mencionado. Además de ese efecto, el propio ciclo de producción puede tener asociada la generación de residuos, que también representan un problema por su cantidad y/o peligrosidad.

Teniendo en cuenta la importancia del tema del manejo los residuos, es que se encaró esta publicación. Se hace en el marco de un programa de publicaciones de interés general que desarrolla la Academia. Dicho programa tiene por objetivo promover la difusión de temáticas en las que la Ciencia y la Tecnología pueden aportar al desarrollo económico y social del país. El presente volumen está enfocado en remarcar la problemática del manejo de los residuos y mostrar, a través de algunos ejemplos, el aporte que la Ciencia y la Tecnología pueden hacer al respecto.

Hemos contado con la colaboración de profesionales involucrados en manejo de residuos urbanos, especialistas en residuos plásticos e investigadores enfocados en el desarrollo de opciones de reciclado para distintos tipos de residuos. Desde distintos ángulos y actividades todos remarcan la necesidad de apuntar al concepto de *Economía Circular*, que implica que los productos ya utilizados deben ser mayoritariamente reciclados y empleados en la fabricación de nuevos productos. Esto reduce el consumo de materias primas vírgenes, en muchos casos no renovables y, además, contribuye a que el manejo de los residuos sea sustentable.

Contamos con el aporte de la Coordinación Ecológica del Área Metropolitana S.E. (CEAMSE) que plantea la evolución de los residuos urbanos en su área de influencia y las alternativas que se han implementado para considerar al residuo como recurso para otras aplicaciones. Las comparaciones con la problemática en el mundo, dan dimensión de la situación. La Cámara de la industria Plástica aborda el caso de uno de los residuos más abundantes y da pie a otros trabajos que se enfocan en posibles usos de los residuos plásticos reciclados. Se trata de artículos desarrollados por investigadoras de la Planta Piloto de Ingeniería Química y el Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur y por profesionales del Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE, respectivamente. El primero de ellos analiza la problemática de los residuos plásticos provenientes de artículos de eléctrica y electrónica (RAEE) y el segundo presenta desarrollos para el uso de distintos materiales en la industria de la construcción. Otro de los capítulos estuvo a cargo de investigadoras del Instituto de Biología de Organismos Marinos, el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA -CONICET- UNLP) y del Departamento de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata. En este caso se muestra como la Ciencia y la Tecnología pueden hacer que residuos de la industria pesquera sean, en vez de una fuente de contaminación, una materia prima con valor económico. Se presenta como puede obtenerse un biopolímero a partir de desechos de la industria pesquera y el desarrollo de técnicas para su uso en la remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas.

En el capítulo 6, desarrollado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) se analiza la situación mundial y local respecto a la gestión integral de pilas y baterías.

Tal como expresan las Academias en su declaración de la reunión de Tokio: “A fin de conservar el bienestar humano a través del término, las personas necesitan acercarse a las nuevas maneras de satisfacer las necesidades humanas y adoptar modelos de consumo y de producción que mantengan los sistemas de apoyo a la vida de la tierra y salvaguardar los recursos requeridos por generaciones futuras”. El manejo de los residuos urbanos e industriales representa un aspecto fundamental a tener en cuenta al momento de buscar esas “nuevas maneras de satisfacer las necesidades humanas”. Deben aplicarse los principios de la economía circular, considerando al residuo como un recurso a ser incluido dentro del ciclo de vida del producto. La problemática originada por el destino de los residuos generados, tanto al fin de la vida útil de los productos, como durante su proceso de fabricación, debe ser considerada durante la etapa de investigación y desarrollo de un producto, así como en la implementación de su fabricación. En todo ese proceso, el aporte que la Ciencia y la Tecnología son fundamentales.

Por otra parte, tal como en todos los aspectos vinculados a la protección del medio ambiente y a la implementación de una economía sustentable, en el caso del manejo de los residuos urbanos e industriales, se requiere de una decisión política y económica. Es la sociedad en su conjunto la que, a través de una concientización en el tema, debe exigir políticas acordes con lo que se denomina economía circular. Esa concientización se lograr fundamentalmente a través de la educación.

Los artículos presentados muestran, con algunos ejemplos particulares, avances logrados, pero también revelan que mucho más queda por hacer. Deseamos que este documento sea un aporte a la difusión de la problemática. Vaya a los autores, que brindaron su conocimiento y dedicaron su tiempo para hacer posible esta publicación, el profundo agradecimiento de la Academia.

Buenos Aires, junio de 2019

Acad. Ing . Teresa Perez  
 Editora

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

## LISTADO DE AUTORES

### **Silvia E. Barbosa**

Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (UNS-CONICET) y  
Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur

### **Natalia Cruz**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

### **Jimena Bernadette Dima**

Instituto de Biología de Organismos Marinos (CCT IBIOMAR-CENPAT-  
CONICET) y Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de  
Alimentos (CIDCA -CONICET- UNLP).

### **Carlos Alberto Fontán**

Coordinación Ecológica del Área Metropolitana S.E. (CEAMSE)

### **Rosana Gaggino**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y  
Asociación Vivienda Económica – AVE)

### **Melina Gómez**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y  
Asociación Vivienda Económica – AVE)

### **Jerónimo Kreiker**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y  
Asociación Vivienda Económica – AVE)

### **Julián Gonzalez Laría**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y  
Asociación Vivienda Económica – AVE)

### **Nadia Mazzeo**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

**Ana Muzlera**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

**Lucas Peisino**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y Asociación Vivienda Económica – AVE)

**José Luis Picone**

Cámara Argentina de la Industria de Reciclados Plásticos (CAIRPLAS)

**Adriana Rosso**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

.

**María Paz Sánchez Amono**

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE (CONICET y Asociación Vivienda Económica – AVE)

**Giada Seraffini**

Cámara Argentina de la Industria de Reciclados Plásticos (CAIRPLAS)

**Yamila V. Vazquez**

Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (UNS-CONICET) y Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur

**Noemi E Zaritzky**

Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA - CONICET- UNLP).y Depto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. UNLP.

## **GESTIÓN DE LOS RESIDUOS EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES**

*Ing. Carlos Alberto Fontán*

Coordinación Ecológica del Área Metropolitana S.E. (CEAMSE)  
[cfontan@ceamse.gov.ar](mailto:cfontan@ceamse.gov.ar)

### **Resumen**

El Área Metropolitana de Buenos Aires presenta una complejidad enorme desde el punto de vista urbanístico, particularmente en lo referido a la prestación de servicios públicos. En una superficie menor al 0,2% de la continental del País, se concentran más de 16 millones de personas, casi el 40% del total de la Nación, en forma desordenada, con nula o escasa planificación y separadas en numerosas jurisdicciones (a veces superpuestas). Esto origina importantes inconvenientes en su funcionamiento y desarrollo como región. Uno de esos problemas son los Residuos Sólidos Urbanos (RSU); se producen más de 20 mil toneladas diarias, que deben ser recolectadas, transportadas, tratadas y dispuestas en forma ambiental y económicamente sustentable. En este capítulo se analiza la situación de la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU) en el Área Metropolitana de Buenos Aires, la segunda mayor megalópolis de Sudamérica, desde la fundación de la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE). El CEAMSE gestiona el sistema desde el año 1978 hasta la actualidad. Se presenta la evolución que tuvo lugar, en el mundo y en Argentina, referida a la disposición final de los residuos. El cambio implicó dejar la exclusividad del modelo de gestión fundado en la disposición final mediante relleno sanitario, para afirmar el concepto de la economía circular, que considera al residuo como recurso. Esto implica la implementación en forma progresiva de nuevas tecnologías de tratamiento, para maximizar el recupero y reciclaje de materiales y minimizar la cantidad de residuos destinados a rellenos sanitarios.

*Palabras clave:* Área Metropolitana de Buenos Aires – Residuos – Tratamientos – Reciclado - Evolución histórica

### **Abstract**

**Waste Management in the Metropolitan Area of Buenos Aires.** The Metropolitan Area of Buenos Aires presents an enormous complexity from the urban point of view, mainly with regard to the provision of public services. In an area less than 0.2% of the country's mainland, more than 16 million people (almost 40% of the National population) live. In this region, several jurisdictions coexist and the planning is almost non-existent.

These characteristics make its operation and the development as a region really complicated. One key public service problem is the Urban Solid Waste (USW); more than 20 thousand tons are daily produced and they need to be collected, transported, treated and disposed in an environmentally and economically sustainable way. In this chapter, the situation of the Integral Urban Solid Waste Management in the Metropolitan Area of Buenos Aires, the second largest megalopolis in South America, is analyzed. The CEAMSE (Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado) is the company that manages the system since its foundation in 1978.

The evolution referred to the final disposal of waste that took place in the world and in Argentina, is presented. The change implied leaving the management model exclusively based on the final disposal through sanitary landfill, to affirm the concept of circular economy, which considers waste as a resource. This implies the progressive implementation of new treatment technologies to maximize the recovery and recycling of materials and minimize the amount of waste destined for sanitary landfills.

*Key Words:* Metropolitan Area of Buenos Aires – Waste – Treatment – Recycling - Historical Evolution

## INTRODUCCION

El siglo XX presentó como una de sus características, especialmente después de la Segunda Guerra Mundial, un marcado proceso de urbanización. A principios del siglo sólo el 10% de la población mundial residía en las grandes ciudades, porcentaje que se elevó al 54,8% en 2017 [1]. Asimismo, se multiplicaron en el planeta las grandes metrópolis, de varios millones de habitante. Existen más de 500 aglomeraciones urbanas en las que se supera el millón de habitantes, unas 70 ciudades sobrepasan los cinco millones de personas, 50 se encuentran por encima de los 10 millones y 1 ciudad roza ya los 40 millones [2]. Este fenómeno demográfico trajo aparejado importantes problemas desde el punto de vista logístico, en cuanto a la prestación de servicios necesarios para mantener esa población y cambios culturales en cuanto a la forma de vida. Las personas ya no producen su alimento, necesitan adquirirlos y para ello deben realizar alguna tarea que les proporcione elementos de cambio para poder hacerlo. Esto implicó el desarrollo de trabajos de producción y servicios, ya que todo debe comprarse, desde los alimentos hasta la vestimenta, pasando por la vivienda y, con el paso del tiempo y el avance de la tecnología, innumerables artículos y artefactos que a hace menos de 100 años eran impensables. Se generó un importante crecimiento de los envases que, con el paso del tiempo y el aumento la población, se hicieron descartables para bajar los costos logísticos. Asimismo, se pasó del consumo al hiperconsumismo, sin considerar la importancia del uso de los recursos. Los residuos generados, aumentaron en forma desproporcionada y se desatendió la gestión de los mismos, generando innumerables problemas ambientales. Argentina

no fue ajena a esta realidad mundial, siguiendo las mismas tendencias; además la población urbana era del 53% en 1914 y del 91% en 2010 [3].

## 1. Antecedentes

Hasta el año 1978 la Ciudad de Buenos Aires y cada municipio del Conurbano Bonaerense encaraban la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) por separado. Cada uno se encargaba de la recolección, transporte y destino de los residuos según sus valoraciones y posibilidades económicas. Las consecuencias resultaban ambientalmente insostenibles. La “disposición final” de residuos se realizaba, generalmente, en enormes basurales a cielo abierto, en incineradores de edificios de propiedad horizontal y en hornos municipales sin ningún tipo de control ambiental, ni de temperatura ni de calidad de humos. La creciente polución generada por los basurales era usual vehículo de enfermedades, que propagaban sin respetar los límites territoriales de las jurisdicciones. El smog era evidente y existía un grave problema social de cirujeo, practicado por gran cantidad de personas de todas las edades (Fig.1.) Estas personas, que vivían en los basurales y sus adyacencias, con grandes riesgos para la salud y la seguridad, representaban un aspecto de difícil solución, que no siempre era tenido en cuenta en las decisiones tomadas por las autoridades.



Fig.1. Basural del Bajo Flores, la “quema” (AGN)

El problema ambiental que genera el destino de los residuos sólidos, no puede ser compartimentado: la interrelación existente en la región, implica que una inadecuada solución adoptada por uno de sus componentes, generará consecuencias perjudiciales para los vecinos. En base a esta realidad, en 1978, se fundó el Cinturón Ecológico Área Metropolitana Sociedad del Estado, actualmente la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado, CEAMSE, generando un sistema de Gestión Integral de Residuos para el Área Metropolitana (Ciudad Autónoma de Buenos Aires y Municipios del Conurbano Bonaerense). Dentro del objeto social consagrado por su Estatuto (art. 4º) encontramos —en cuanto aquí interesa— una disposición genérica “... La Sociedad tendrá como

objetivo contribuir a materializar el equilibrio y la preservación ecológica del área metropolitana, la eliminación de la polución ambiental y el saneamiento de los acuíferos y los suelos, abarcando dentro de su objeto las siguientes acciones...”, luego de lo cual enumera las actividades comprendidas en el mismo. En el inciso a) contempla la “planificación, proyección y ejecución de la disposición final de residuos sólidos de toda el Área Metropolitana de Buenos Aires, directamente o previa recuperación y/o transformación de la basura”. En cuanto al denominado “saneamiento de acuíferos y cuencas”, el inciso f) admite la participación, planificación, proyecto y ejecución por sí o mediante contratación con terceros de las tareas de saneamiento de tierras o ríos, trabajos de parquización, defensas contra las inundaciones y cualquier clase de acción de esa naturaleza respecto de las cuencas hídricas que surcan el área metropolitana. La intervención de CEAMSE en estas actividades depende de la existencia de encomiendas específicas que efectúen las autoridades competentes en esa materia.[4]

CEAMSE sirve al Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), región que se fue ampliando con el tiempo, tal como muestran las Figs. 2 y 3. En esta región cohabitan aproximadamente dieciséis millones de personas que generan diariamente aproximadamente 20 mil toneladas de residuos.

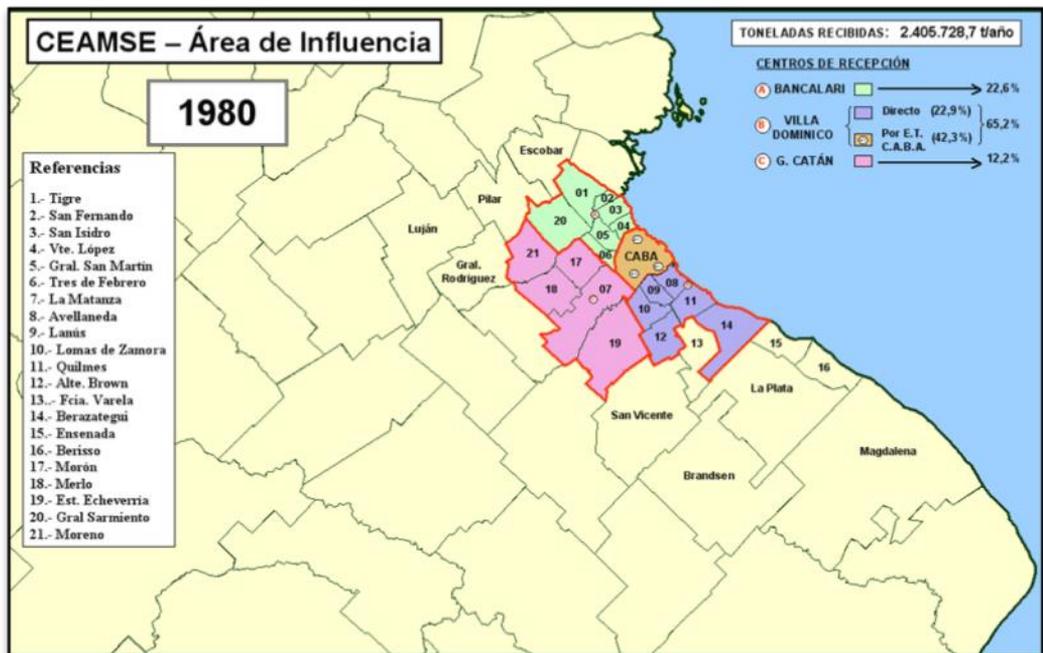


Fig. 2. Área de Influencia de CEAMSE – 1980 (fuente CEAMSE)

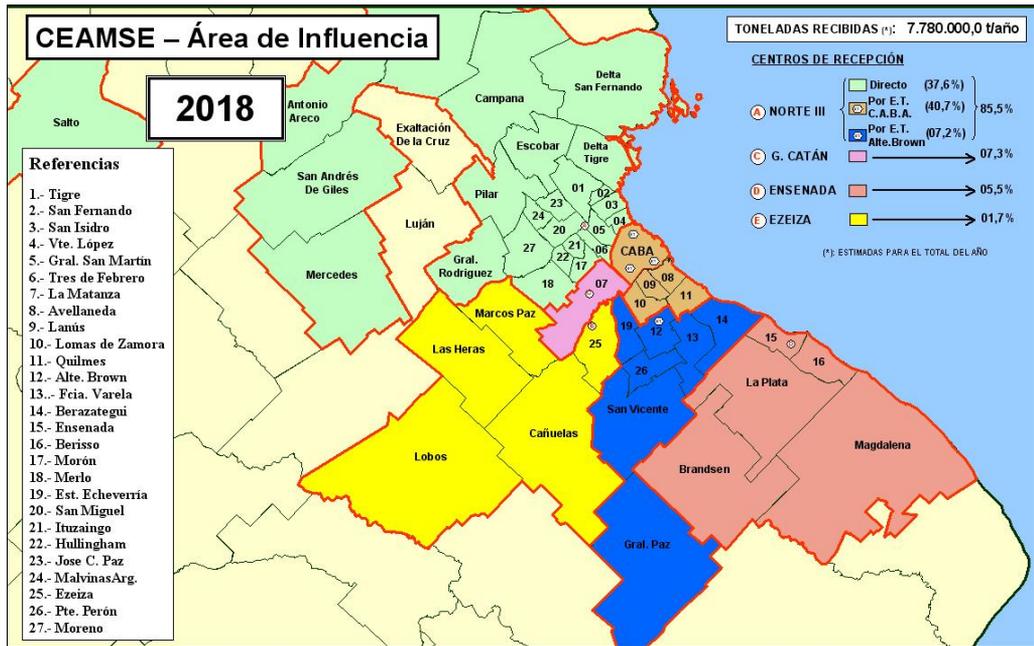


Fig.3. Área de Influencia de CEAMSE – 2018 (fuente CEAMSE)

## 2. Desarrollo y evolución

La creación de CEAMSE llevó a la implementación de un sistema de disposición final de RSU para toda el área metropolitana de Buenos Aires, que alberga la tercera parte de la población de la Argentina. Al momento de la creación de CEAMSE, no había en el país legislación ambiental; nuestra empresa superó esta carencia encuadrando sus acciones y su política de prevención y control en las normas de la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA).

De acuerdo a las posibilidades técnico-económicas de la época, los rellenos sanitarios surgieron como el método más apropiado. La expresión “relleno sanitario” (sanitary landfill) comenzó a utilizarse en la ciudad de Fresno, California, en 1930, para designar un nuevo método de tratamiento de la basura. Este consistía en la cubierta diaria de los residuos y la supresión de su quema. Con el transcurso de las décadas, el método del relleno sanitario tuvo gran desarrollo en los EE. UU.

La Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles, ASCE, define: "Relleno sanitario es una técnica para la disposición de los residuos en el suelo sin causar perjuicios al ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriéndolos con una capa de tierra en la frecuencia necesaria o por lo menos al fin de cada jornada" [5].

Existe consenso, a nivel mundial, respecto de las dos condiciones básicas que debe cumplir un sistema de tratamiento integral de residuos: sustentabilidad ambiental y viabilidad económica. El relleno sanitario, desde hace décadas, es el método más utilizado en el mundo para disponer de la basura que no es posible reciclar. Ningún sistema de gestión de residuos puede prescindir de la existencia de rellenos sanitarios. Dependerá del grado de avance tecnológico y económico, qué cantidad de residuos se disponen en los mismos. El último de los residuos, el que no puede ser tratado o reciclado de alguna manera, tiene que ir indefectiblemente a un relleno sanitario. Es un método que no causa perjuicio al medio ambiente y no origina molestias o peligros para la salud humana. Emplea principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie, reduciendo su volumen al mínimo posible.

Con dicho sistema funcionando se logró la eliminación de gran parte de los basurales a cielo abierto. Desde el inicio de las operaciones de CEAMSE se dispusieron en rellenos sanitarios más de 167 millones de toneladas de residuos. De haber ido a basurales sin tratamiento, formarían un basural del tamaño de toda la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (más de 200 km<sup>2</sup>), con una altura de más de tres metros de altura de residuos. Actualmente se reciben más de siete millones de toneladas anuales, las cuales son procesadas en los complejos ambientales de Norte III, González Catán, Ensenada y Ezeiza.

Cuando los residuos del Área Metropolitana no son enviados a los Complejos Ambientales para su tratamiento integral, dan lugar a basurales ilegales. Estos basurales constituyen peligrosos focos de infección y de propagación de enfermedades y epidemias. Los basurales no sólo contaminan el medio ambiente, sino que tienen efecto nocivo para los habitantes de las zonas aledañas.

La evolución del ingreso de residuos a CEAMSE (Fig.4) sigue el importante aumento de la producción de residuos por habitante que se produjo en los últimos treinta años a nivel mundial. Esto es debido a los cambios de hábitos de consumo y a que muchos productos que anteriormente eran considerados como semi-permanentes por su concepción y por su costo, pasaron a ser “descartables”, especialmente en el rubro de tecnología. Además, se observa una relación directa con las etapas de crecimiento y recesión de la economía y un impacto del significativo del incremento de la cantidad de habitantes en el Conurbano Bonaerense, especialmente en los últimos diez años (por ejemplo, el partido La Matanza aumentó su población de un millón según Censo 2001 a un millón setecientos mil conforme Censo 2010).

Como consecuencia de todos estos factores en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, se pasó de 0,930 kg/hab.día (340 kg por habitante año) en 1980 a poco más de 2 kg/hab.día (730 kg por habitante año) en 2017, implicando un aumento de 115 % [6]. Este porcentaje es similar al registrados en Suiza (Fig. 5) [7], donde la producción por habitante pasó de 300 kg por año en 1980 a más de 750 kg por año en 2012. Otro aspecto importante mostrado en la Fig. 5 es que el reciclaje atenuó el impacto del crecimiento de generación, y la cantidad de residuos destinados a disposición final permaneciera casi constante.

Este incremento en la cantidad de residuos a disponer en lugares cada vez más escasos, sumado al avance de las tecnologías para el tratamiento de los residuos llevó a un cambio de visión en la operaciones de CEAMSE.

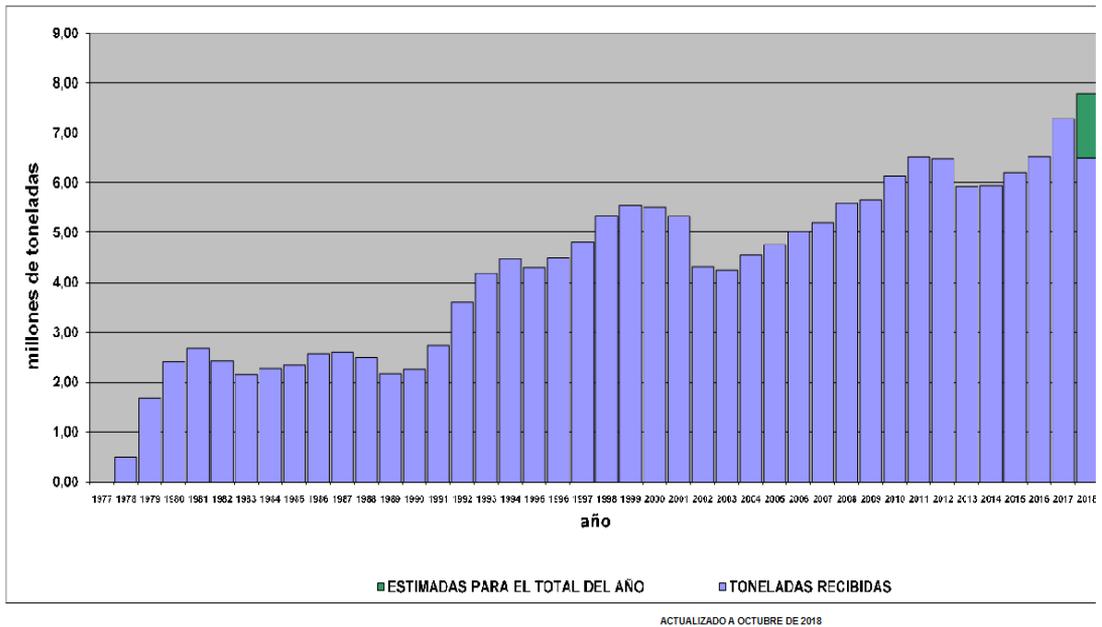


Fig.4. Evolución de ingreso de residuos a CEAMSE (fuente CEAMSE)

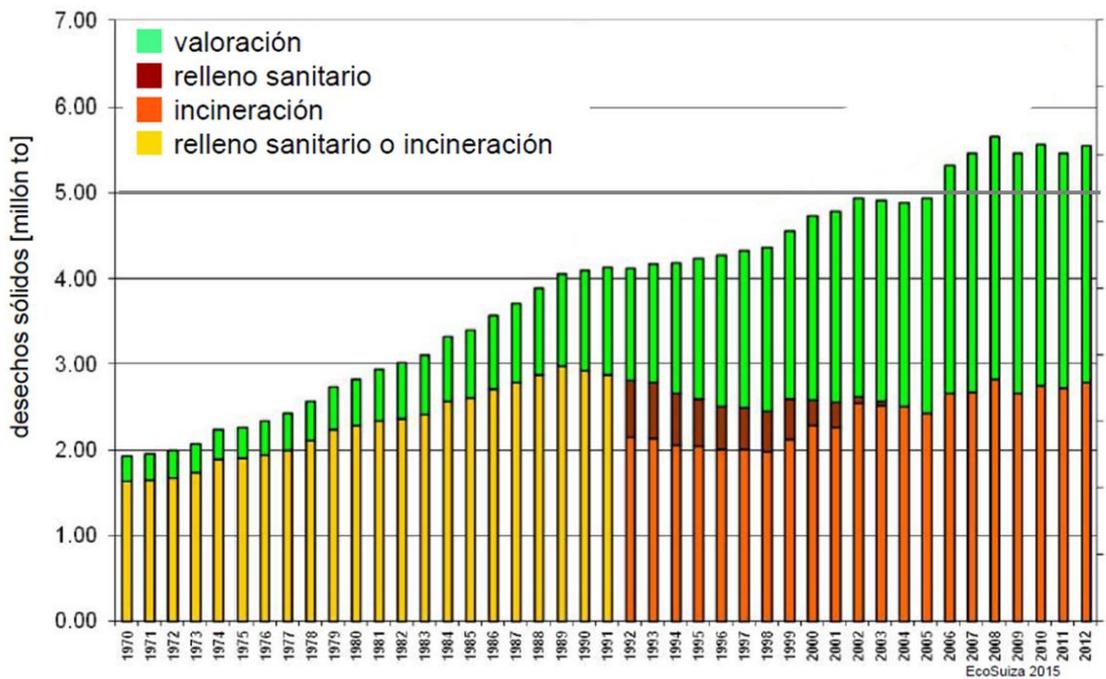


Fig.5. Evolución de generación de RSU en Suiza

### 3. El cambio de paradigma

El cambio de paradigma, implicó dejar la exclusividad del modelo de gestión fundado en la disposición final mediante relleno sanitario, para afirmar el concepto de la economía circular, que considera al residuo como recurso. Esto implica la ejecución e implementación en forma progresiva de nuevas tecnologías de tratamiento, con el objetivo de maximizar el recupero y reciclaje de materiales y minimizar la cantidad de residuos destinados a rellenos sanitarios.

En lo que respecta a CEAMSE, en la Fig. 6 se muestra el crecimiento en materia de reciclaje y reutilización de materiales a través del creciente uso de distintas tecnologías que permiten la disminución de los residuos dispuestos en los rellenos. Esto se combina con las acciones de los municipios, que encararon proyectos para la reducción de la generación, incluyendo sistemas de recolección de residuos diferenciados, que permiten la recuperación de parte de los mismos. Por ejemplo, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) en noviembre del año 2005 se sancionó la ley N° 1.854 Basura Cero, que regula la gestión integral de RSU. En dicha ley se establece un conjunto de pautas, principios, obligaciones y responsabilidades para la gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Tras la sanción, la CABA adoptó el principio de reducción progresiva de la disposición final de RSU con plazos y metas concretas, por medio de la aplicación de un conjunto de acciones para la separación selectiva, la recuperación y el reciclado.

Se implementó un sistema de recolección domiciliaria, utilizando distintos contenedores que permitieron separar la fracción reciclable del resto. Se construyó y puso en marcha una planta de tratamiento de residuos provenientes de la construcción (“áridos”), que permitió recuperar tierra y escombros. Además, se construyeron una planta de tratamiento para residuos verdes provenientes de mantenimiento de jardines y de poda y una planta de procesamiento de polietileno tereftalato (PET – plástico utilizado para la fabricación de envases).

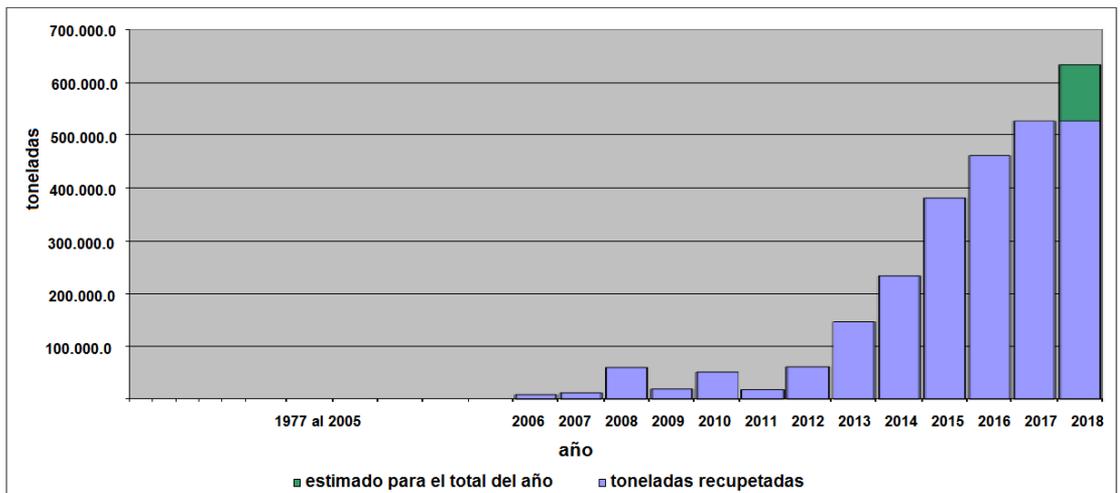


Fig.6. Residuos recuperados por CEAMSE [8]

#### 4. Reciclaje y recuperación de materiales

Después de realizar numerosas pruebas piloto sobre el tema de la recuperación de materiales, a partir del año 2000, CEAMSE ha puesto en marcha sistemas que permiten para disminuir cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios. A la fecha la reducción llegó a 600.000 toneladas anuales (equivalentes a la producción conjunta de los municipios de Vicente López, San Isidro, San Fernando y Tigre). Están en curso proyectos complementarios que permitirán aumentar aún más estas cantidades que no se destinan a rellenos sanitarios.

La Fig.7 muestra la línea de tiempo de la implementación de estos proyectos:

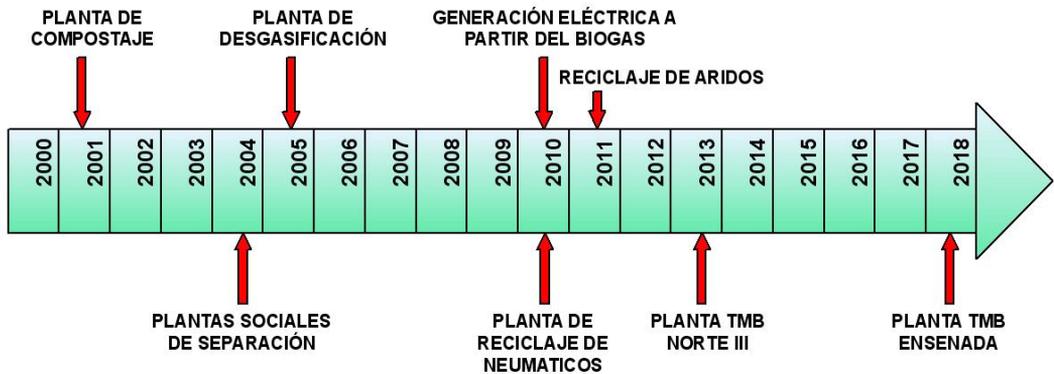


Fig.7. Línea de tiempo de implementación de sistemas de recuperación de materiales

Describiremos brevemente cada proyecto:

##### 4.1. Planta de compostaje

El compost se define como “humus” artificial, siendo a su vez la definición de humus: “capa superficial del suelo, constituida por la descomposición de materiales animales y vegetales”[9]. Una definición más precisa sería que es un producto obtenido a partir de materiales orgánicos de distinto origen, sometidos a un proceso biológico controlado de fermentación aeróbica o “compostaje”. Se trata de un producto de aspecto terroso, ausente de olores y libre de microorganismos patógenos que puede emplearse como abono o “mejorador” de suelos. [10]

La planta de compostaje de CEAMSE, que funciona en el Complejo Ambiental Norte III, tiene una capacidad de tratamiento de 800 a 1.100 toneladas por mes de residuos verdes (residuos de jardín, poda y ramas). Estos residuos son triturados y luego son almacenados en silobolsas donde se insufla aire, para producir la fermentación aeróbica (Figs.8 y 9).

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío



Fig.8. Esquema de la producción de compost

En 2010, compost producido obtuvo la inscripción ante el SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria) para ser utilizado como “mejorador de suelos”. El producto final de la planta de compostaje fue aprobado como enmienda orgánica. Por lo tanto, CEAMSE es actualmente elaborador, fraccionador y distribuidor de compost, que se usa en su vivero y en la parquización de sus Complejos. Se realizan, además, donaciones a municipios, entidades educativas, hospitales y organizaciones no gubernamentales que lo soliciten.



Fig.9. Planta de Compost de Norte III

#### 4.2. Plantas sociales de separación

El colapso económico del 2001 provocó un agravamiento de la marginalidad social; una de las consecuencias fue la irrupción del “fenómeno cartonero”. CEAMSE se encontró ante el desafío de conjugar la ecología urbana y la inclusión social y así surgieron las Plantas Sociales de Separación y Clasificación de Residuos. Estas plantas son construidas y equipadas por CEAMSE y operadas por Asociaciones Civiles. Se les entregan residuos seleccionados (de origen privado,

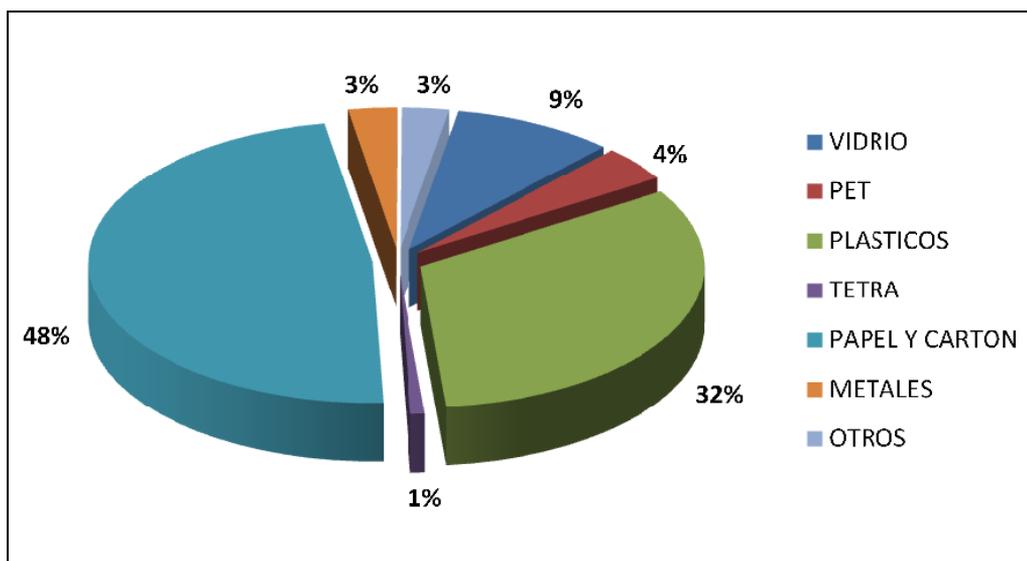
de recolecciones diferenciadas de municipios o de barrios privados, etc.) a fin de mejorar el rendimiento de lo recuperado.

A la fecha funcionan 16 plantas de este tipo, que ocupan a más de 700 personas y procesan alrededor de 10 mil toneladas mensuales, recuperando aproximadamente 1500 toneladas mensuales [11]. Lo recuperado es comercializado por las Asociaciones que, además, reciben un canon por tonelada de residuo que no va al relleno. Las Asociaciones son un eslabón más en la reducción de los residuos que se envían a disposición final; el porcentaje de lo recuperado pasó del 5 % en el inicio de las operaciones a un 15 % en la actualidad. En este tipo de plantas se separan vidrios, plásticos, tetra, papeles y cartón, metales y otros. En la Tabla 1 y la Fig.10 se detalla lo recuperado durante el año 2017.

**Tabla 1. Materiales recuperados para su reciclaje en las Plantas Sociales de Separación de CEAMSE durante 2017 (fuente CEAMSE)**

AÑO 2017	MATERIALES RECUPERADOS							TOTAL
	VIDRIO	PET	PLASTICOS	TETRA	PAPEL Y CARTON	METALES	OTROS	
enero	140,68	63,06	476,58	7,30	462,50	41,84	3,66	1.195,62
febrero	62,94	25,24	534,60	1,68	521,76	20,66	50,36	1.217,24
marzo	123,98	41,00	661,00	-	646,84	59,30	34,24	1.566,36
abril	87,52	35,18	533,06	15,64	629,24	67,52	39,54	1.407,70
mayo	119,80	63,42	503,10	17,60	684,76	80,32	40,44	1.509,44
junio	114,86	80,88	468,56	1,30	875,18	45,46	86,78	1.673,02
julio	217,00	85,80	476,28	3,14	837,50	44,38	12,78	1.676,88
agosto	224,92	94,52	542,80	14,24	859,46	27,70	78,12	1.841,76
septiembre	212,98	42,40	511,54	44,90	914,88	9,00	22,62	1.758,32
octubre	126,86	111,80	414,16	13,78	947,02	43,50	39,44	1.696,56
noviembre	115,50	43,32	429,72	1,72	873,36	56,36	67,46	1.587,44
diciembre	168,10	69,56	492,88	31,42	658,98	17,06	29,52	1.467,52
<b>TOTALES</b>	<b>1.715,14</b>	<b>756,18</b>	<b>6.044,28</b>	<b>152,72</b>	<b>8.911,48</b>	<b>513,10</b>	<b>504,96</b>	<b>18.597,86</b>

Valores expresados en toneladas



**Fig.10.** Porcentajes de materiales seleccionados para su reciclaje en las Plantas Sociales de Separación de CEAMSE durante 2017(fuente CEAMSE)

#### 4.3. Planta de recuperación de áridos

Gran parte de los RSU de las grandes ciudades está constituida por residuos inertes, secos, como ser los que resultan de la construcción de edificios, escombros de demoliciones y tierra de excavaciones. El auge de este tipo de trabajos hizo necesario tratar a estos residuos de forma distinta y diferenciada, especialmente dentro de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, donde en un momento dado, implicaba el 30% del total del RSU generado. En el año 2004 se habilitó la Estación de Transferencia de Zavaleta, ubicada en Pompeya (CABA) y destinada a recibir este tipo de residuos en particular. El sistema implementado para la recuperación consiste en la simple operatoria de controlar el ingreso, identificar el tipo de residuo y derivarlos a distintos sectores, permitiendo el recupero de materiales como escombros limpios, tierra limpia, etc. Así se logra recuperar y reciclar, evitando su transporte al Complejo Ambiental y disposición final; durante el año 2017 se recuperaron 21.244,72 toneladas, que fueron reutilizadas.

A partir del año 2013, se dispone, además, de otra planta especial para el tratamiento de residuos áridos, habilitada por CABA.

#### 4.4. Plantas de desgasificación y producción de energía

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático estableció en Kioto, Japón, en 1997, un Protocolo y un Acuerdo Internacional con el objetivo de reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Los gases incluidos son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y otros tres gases industriales fluorados:

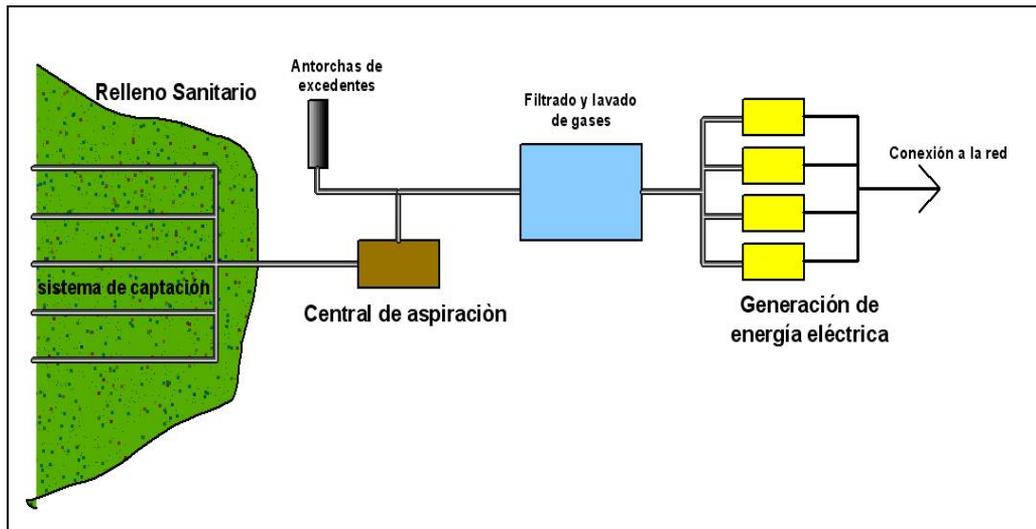
los hidrofluorocarbonos (HFC), os perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). No todos estos gases impactan de manera similar, el metano, por ejemplo, produce 23 veces más efecto invernadero que el dióxido de carbono. La descomposición anaeróbica de materia orgánica que se produce en la disposición final de residuos en rellenos sanitarios, genera metano, que, en un principio, se venteaba a la atmosfera. Este gas no es tóxico, pero resulta inflamable en combinación con el oxígeno en espacios cerrados y tiene enorme influencia en el efecto invernadero. Atento a estos antecedentes CEAMSE comenzó un plan para desgasificar los rellenos, en el 2005, incluso antes de que el Protocolo de Kioto fuera ratificado por la mayoría de los países del planeta. Consiste en la instalación de un sistema de extracción y chimeneas para quemar el gas con llama oculta y temperatura y emisiones controladas (Fig.11), que permite reducir en forma importante el impacto de efecto invernadero del metano. Se comenzó en Villa Domínico y actualmente todos los Complejos Ambientales tienen instalaciones de este tipo.



**Fig.11.** Antorchas de quema de metano en Norte III (fuente CEAMSE)

En un avance tecnológico respecto de la opción de quemado, CEAMSE decidió implementar un sistema para el aprovechamiento del gas y su conversión en energía. Se contó con el soporte económico de un programa de ENARSA (Genren 1/2010), que tiene por objetivo desarrollar la generación de electricidad a partir de energías renovables.

Se utiliza el biogás producido por la descomposición de los residuos, que contiene un 50 a 60 % de metano. El gas se extrae del relleno utilizando pozos verticales conectados en red por medio de una central de succión que funciona con la energía que el sistema produce. Luego de operaciones de deshumidificado, filtrado, lavado y enfriado, el gas se utiliza para el funcionamiento de motogeneradores especialmente diseñados, controlados desde una sala de operación y control (Fig.12). La energía eléctrica obtenida es transportada a subestaciones de las empresas distribuidoras de electricidad.



**Fig.12.** Esquema del sistema de generación eléctrica a partir del biogás del relleno sanitario (fuente CEAMSE)

Desde 2013, están en funcionamiento dos plantas de este tipo, la Central San Miguel (Buen Ayre) (Fig.13) y la San Martín (J.F.Secco). En conjunto producen unos 15 MWh sostenidos, capaces de proveer energía eléctrica a unos 32 mil hogares (considerando un promedio de 470 KWh/hogar) o sea más de 100.000 personas. El excedente de gas, en caso de existir, se trata mediante la incineración controlada en antorchas de llama oculta, siguiendo estándares internacionales de “desarrollo limpio”.

Complementando lo anterior, en los Complejos Ambientales de González Catán y Ensenada están en avanzado grado de construcción sendas Centrales de 5MWh cada una. Su pronta entrada en servicio permitirá que la producción total de energía de CEAMSE a partir del biogás llegue a 25 MWh.



**Fig.13.** Central Buen Ayre en Norte III (fuente CEAMSE)

#### **4.5. Plantas de tratamiento mecánico biológico**

Con el objetivo de disminuir la cantidad de residuos que la Ciudad Autónoma de Buenos Aires dispone en los rellenos sanitarios, CEAMSE inauguró en enero de 2013 una planta de tratamiento Mecánico-Biológico (TMB). Esta planta está ubicada en el Complejo Ambiental de Norte III (partidos de 3 de Febrero y Gral San Martín) y tiene una superficie cubierta de 20 mil metros cuadrados. Recibe aproximadamente 1.100 toneladas diarias de residuos y tiene capacidad de recuperar un 65% del volumen que procesa.

El funcionamiento de la Planta consta de dos etapas básicas, la primera consiste en un sistema mecánico que, mediante trituradoras, aspiradores, separadores y selección de materiales, separa los residuos orgánicos de los inorgánicos.

Los residuos orgánicos son sometidos a un proceso biológico en naves especialmente diseñadas (Fig.14), donde se los encapsula herméticamente durante 21 días con inyección de aire, con temperatura, humedad y relación carbono-nitrógeno controlada. El resultado es la bioestabilización de ese material que se reutiliza como cobertura de relleno sanitario, disminuyendo la cantidad de suelo necesario para su operatoria.

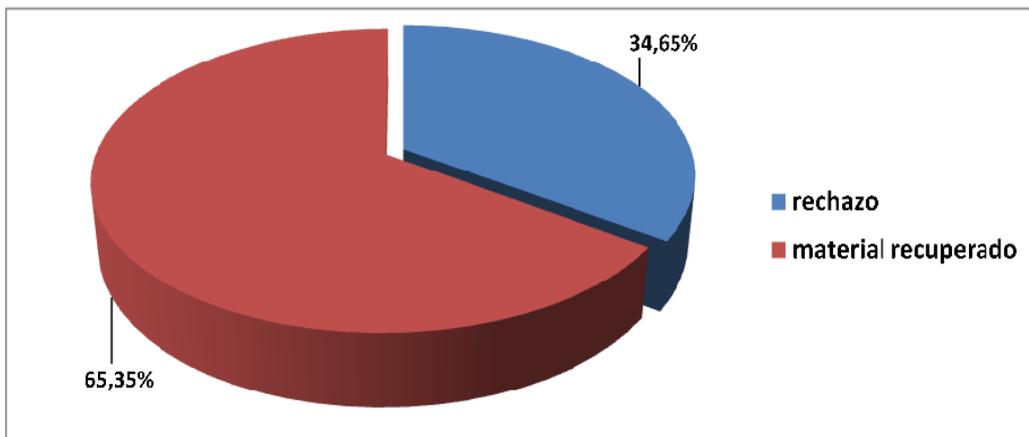


**Fig.14.** Planta TMB Norte III – Camas de Bioestabilización (fuente CEAMSE)

Por otra parte, los residuos inorgánicos son separados mecánicamente por operarios entrenados en la clasificación de materiales para ser reciclados. Se recuperan de esta manera papel, cartón, vidrios y plásticos. Los metales ferrosos son atraídos por un sistema de imanes y los no ferrosos por un separador de Foucault. Todos los materiales se acopian para su posterior enfardado.

Para una mayor eficiencia del proceso, se derivan a la planta residuos que provienen de barrios donde la recolección se realiza utilizando contenedores diferenciados (reciclables y no reciclables), o de zonas con concentración de actividades económicas, comerciales y residenciales de alta capacidad de consumo, donde el potencial de recuperación de materiales es mayor que en el resto de la ciudad. La eficiencia de esta planta es del 63% (Fig.15).

Durante 2018 la planta procesó 373 mil toneladas de residuos de las cuales recuperó 243,7 mil. (65,35%).



**Fig.15.** Planta TMB Norte III – Eficiencia (fuente CEAMSE)

Durante el año 2018 comenzó a funcionar una segunda Planta de TMB, en Ensenada. Esta planta, que actualmente está en periodo de puesta a punto, procesará 1000 toneladas diarias, lo que equivale a la totalidad de los residuos que actualmente ingresan a ese Complejo Ambiental.

#### **4.6. Plantas de tratamiento y reciclaje de neumáticos**

Los neumáticos fuera de uso (NFU) por estar compuestos principalmente de caucho y otros materiales difícilmente biodegradables y dado su tamaño, son residuos complicados para disponer. Es, por lo tanto, importante fomentar su reciclaje y por ello CEAMSE, a partir del año 2006, comenzó a buscar alternativas para el tratamiento de este tipo de residuos. Con la colaboración de los profesionales del Centro de Investigación y Desarrollo de Caucho del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), se analizaron diferentes técnicas de tratamiento; también se interactuó con empresas que ofrecían diferentes tipos de tratamientos. Se concluyó que lo más conveniente era el tratamiento del neumático por medios mecánicos, para permitir recuperar los elementos básicos de su composición, tal lo propuesto por la empresa REGOMAX SA. En Octubre del 2007 se firmó un contrato entre CEAMSE y REGOMAX SA para efectuar el reciclaje de neumáticos fuera de uso.

El tratamiento mecánico consiste básicamente en la trituración, separación y tamizado de distintas granulometrías del neumático, por lo que puede ser considerado un proceso amigable para el medio ambiente.

Dado que un neumático para automóviles, al final de su vida útil, contiene aproximadamente 80% de caucho, 15% de metal, y 5% de fibras, el esquema de negocio y operación de la planta se basó en la reutilización del caucho, obteniendo una granulometría específica para ser utilizado como insumo para la producción de canchas de césped sintético de fútbol, jockey etc., sustituyendo al mismo tiempo la importación de caucho molido.

Además del caucho granulado, principal producto obtenido del proceso de reciclado, el metal es reaprovechado por las empresas siderúrgicas y las fibras se usan como combustible alternativo en hornos cementeros, por lo cual el proceso de recuperación es 100% efectivo.

La planta, ubicada dentro del Complejo Ambiental Norte ocupa una superficie de 1,8 Ha y procesa aproximadamente 750 toneladas mensuales (equivalente a 135.000 neumáticos mensuales) (Fig.16. y 17.).



**Fig.16.** Planta de reciclaje de neumáticos – C.A.Norte (fuente CEAMSE)



**Fig.17.** Planta de reciclaje de neumáticos – C.A.Norte (fuente CEAMSE)

## CONCLUSIONES

La cantidad de RSU producidos en las ciudades está aumentando en el mundo, más allá del crecimiento demográfico de la población. Actualmente se producen alrededor de 6 millones de toneladas de residuos urbanos diarios (este valor no considera los residuos industriales), lo que representa un volumen

equivalente a 10 pirámides de Guiza diarios. Es necesario tomar medidas para que este aumento no se vuelva incontrolable y dado el carácter interdisciplinario del tema, queda claro que el problema no es sólo técnico y va mucho más allá de cómo mejorar el tratamiento de los residuos.

Deben realizarse estudios desde el punto de vista de la producción de bienes y consumos, para diseñarlos de manera tal de reducir su incidencia en la generación de residuos, buscar mejorar la logística de transporte. Son necesarios estudios desde las ciencias biológicas para mejorar los tratamientos de compostaje y análisis sociológicos para buscar soluciones o alternativas que permitan revertir o por lo menos frenar este sistema de consumo desenfrenado, sin que ello implique afectar calidad de vida o fuentes de trabajo.

Casi todas las ramas de la Ciencia y la Tecnología tienen el desafío de aportar soluciones para, por lo menos, aminorar este problema. Esto no es simple, ya que estos estudios deben realizarse desde un punto de vista amplio y considerando muchas variables, pero es necesario encararlos. Dentro de sus incumbencias, CEAMSE buscó y seguirá buscando nuevas tecnologías que permitan tratar de solucionar este grave problema y encontrar innovaciones tecnológicas que hagan posible reducir la cantidad de residuos destinados a la disposición final, valorizar nuestra basura como fuente de energía y aprovechar materiales para su reinserción en el circuito productivo.

## REFERENCIAS

- [1] Datos Banco Mundial  
<https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS>
- [2] <https://www.worldatlas.com/>
- [3] <http://www.ign.gob.ar> – Fuente Indec
- [4] Residuos Sólidos en el Área Metropolitana de Buenos Aires, Argentina: el proyecto interjurisdiccional y metropolitano - CEAMSE 1978 -2016 – Dr.A.Marino- Ing. M.Rosso
- [5] <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd61/tecnadmvo/cap3.pdf>
- [6] Datos CEAMSE – Fuente propia
- [7] Exposición ECO-Suiza en Argentina – UCA 2015
- [8] Datos CEAMSE – Fuente propia
- [9] Diccionario panhispánico de dudas ©2005 - Real Academia Española © Todos los derechos reservados
- [10] [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/Calidad\\_Ambiental/Gestion\\_De\\_Los\\_Residuos\\_Solidos/compost/dipticoID98\\_00.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Calidad_Ambiental/Gestion_De_Los_Residuos_Solidos/compost/dipticoID98_00.pdf)
- [11] Datos CEAMSE – Fuente propia

Todos los gráficos e ilustraciones fueron hechos por el autor con datos fuente CEAMSE.

## RECICLADO DE PLÁSTICOS Y ECONOMÍA CIRCULAR

*Ing. José Luis Picone\**  
*Lic. Giada Seraffini*

*Cámara Argentina de la Industria de Reciclados Plásticos (CAIRPLAS)*  
*[ilpicone@cairplas.org.ar](mailto:ilpicone@cairplas.org.ar)*

### Resumen

La evolución de la economía global ha estado dominada por un modelo lineal de producción y consumo, en el cual se fabrican productos a partir de materias primas, que luego se venden, se utilizan y se desechan como residuos.

En el caso de los plásticos, que están en todas las áreas de nuestra vida debido a sus variadas y excelentes propiedades, se fabrican fundamentalmente a partir de materia prima fósil (petróleo y gas natural), por supuesto un recurso no renovable. La gran cantidad de residuos plásticos generados terminan así en rellenos sanitarios en el mejor de los casos, o arrojados en basurales o en la vía pública, terminando muchos de ellos en cursos de agua y finalmente en los mares. A partir de esta situación se están buscando distintas vías de solución.

La recolección de esos residuos plásticos y su posterior reciclado aportan actualmente la solución más desarrollada al doble problema del agotamiento de recursos naturales y generación de residuos, así como otros beneficios ambientales, económicos y sociales.

Otras alternativas suponen el desarrollo de plásticos biobasados (polímeros no fabricados con recursos fósiles) o de materiales biodegradables o compostables.

En este artículo, se pretende mostrar esa situación dando especial énfasis al reciclado mecánico, dado que es la tecnología más difundida en el mundo y que sigue mejorando día a día su tecnología.

*Palabras clave: Plásticos, Economía Circular, Reciclaje, Reciclabilidad*

### Abstract

**Plastics Recycling and Circular Economy.** The evolution of the global economy has been dominated by a linear model of production and consumption. The products are manufactured from raw materials, sold, used and disposed of as waste.

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

The plastics, which are in all areas of our life due to their varied and excellent properties, are manufactured mainly from fossil raw material (oil and natural gas), of course non-renewable resource.

The large amount of plastic waste generated ends up in landfills in the best of cases, or thrown into landfills or in the public road, ending many of them in water courses and finally in the seas. From this situation, different solutions are being sought. The collection of this plastic waste and its subsequent recycling provide the most developed solution currently, to the double problem of depletion of natural resources and generation of waste. Additionally, as well as other environmental, economic and social benefits are obtained.

Other alternatives involve the development of bio based plastics (polymers that are not made with fossil resources) or of biodegradable or compostable materials.

In this article, we intend to show that situation, giving special emphasis to mechanical recycling, given that it is the most widespread technology in the world and that it continues to improve its technology day by day.

*Keywords: Plastics, Circular Economy, Recycling, Recyclability*

## INTRODUCCION

El crecimiento poblacional y el aumento de la demanda de todo tipo de productos, ha llevado a la sobreexplotación de los recursos naturales y a poner a la industria plástica ante el desafío de buscar nuevos modelos de desarrollo sostenible.

Los plásticos y los residuos secos no deben ser pensados como basura, sino como bienes con un valor económico. Su recolección, separación, valorización y reinserción en el circuito productivo promueven el desarrollo económico y una economía circular.

Ante éste escenario, resulta imprescindible alargar la vida útil de este recurso, utilizando la base de las "4R": reducir, reutilizar, reciclar y recuperar, evitando así la creciente generación de basura. De esta manera, se generarán mejores procesos industriales, mejores prácticas, menor huella de carbono y un ambiente saludable, apuntando siempre al cuidado de nuestro planeta.

## Hacia una Economía Circular

La *Economía Lineal* es el modelo más conocido donde las materias primas se utilizan para fabricar productos que luego de ser usados se desechan, creando así una necesidad interminable de materias primas en la cadena productiva.

En contraposición, en una ***Economía Circular***, los materiales de los productos ya utilizados se recuperan y se emplean en la fabricación de nuevos productos, lo que reduce la necesidad de usar únicamente materias primas vírgenes.

La rápida aceleración de las economías de consumo y extractivas desde mediados del siglo XX provocó un crecimiento exponencial de factores externos negativos: el modelo lineal era cada vez más cuestionado y por ello era necesario un cambio profundo del sistema operativo económico. [1]

El modelo circular, en cambio, fue evolucionando a partir del concepto de sostenibilidad y su aplicación en la economía, la sociedad y el cuidado del ambiente. Los múltiples beneficios que ofrece, aportan la visión de una economía regenerativa y restaurativa para el futuro.

Superar el tradicional esquema de “usar y tirar” de la economía lineal requiere de un **cambio paradigmático hacia una economía circular**, enfocada en reproducir el mecanismo biológico de la naturaleza. Esto se basa en pensar y diseñar los productos para que sean reutilizados, o para obtener una materia prima secundaria, o para generar energía alternativa desplazando los combustibles fósiles. Con la creatividad, la innovación y el crecimiento como elementos centrales, los entornos urbanos se convertirían en focos de actividad económica circular, lo que posibilitará la recirculación de materiales duraderos.

## Problemas y soluciones

Sabemos que el tema del aumento en la generación de residuos es un grave problema en todo el mundo. Para tener una información de base de nuestra región, podemos basarnos en el reciente informe de **ONU Ambiente** llamado ***“Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe”*** [2]. A continuación citamos datos interesantes del mismo:

- 1- *1 kg/día de residuos genera en promedio cada habitante en la región.*
- 2- *541.000 t/día de residuos urbanos se generan en América Latina y el Caribe, cifra que al menos aumentará un 25% para el año 2050.*
- 3- *50% de los residuos urbanos generados son orgánicos.*
- 4- *40 millones de personas carecen de acceso a la recolección de residuos.*
- 5- *145.000 t/día de residuos se destinan todavía a basurales, incluyendo 17.000 t/día de desechos plásticos.*

En América Latina y el Caribe las tasas de reciclaje son todavía bajas (entre el 1-20%), de manera que aproximadamente el **90% de los residuos municipales se destina a disposición final**. Esta realidad contrasta con los principios ampliamente reconocidos de la jerarquía de las opciones de gestión de los residuos, donde prima la prevención y el aprovechamiento de cada material.

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

La **fundación Ellen MacArthur**, por otro lado, describe el importante papel que tiene América Latina en la transición global a una economía circular. Los elementos regionales únicos, su biodiversidad, sus ricas reservas naturales y una cultura generalizada de innovación social, sugieren que América Latina podría beneficiarse enormemente de un camino de desarrollo circular. El cambio hacia un enfoque regenerativo podría ayudar a la región a aprovechar estas fortalezas y aplicar su notable potencial económico. Al tiempo promover un crecimiento distribuido e inclusivo en una región con tasas de urbanización sin precedentes y desigualdades críticas. [3]

## **1. Materiales plásticos**

### **1.1. Características generales**

Los materiales plásticos son sustancias poliméricas fabricadas fundamentalmente a base de productos fósiles no renovables (petróleo y gas natural). El término «plástico» proviene del griego «plastikos» que se refiere a la maleabilidad o plasticidad del material.

En los últimos años, también se han comenzado a utilizar materias primas renovables (cereales) que dieron origen a los plásticos biobasados, y que luego veremos más en detalle.

### **1.2. Clasificación**

En un principio, podemos decir que existen dos familias de plásticos y una manera de clasificarlos es según su comportamiento ante el calor:

- **Termoplásticos:** se deforman y funden a temperaturas altas, y se endurecen cuando se enfrían. No sufren cambios en su estructura química durante el calentamiento, se pueden calentar y volver a moldear cuantas veces se desee. Son ejemplos: el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el poliestireno expandido (EPS), el policloruro de vinilo (PVC), el tereftalato de polietileno (PET), etc.
- **Termorrígidos o termoestables:** no se funden con el calor y son insolubles. En general el proceso de polimerización se suele dar en dos etapas: en la primera se produce la polimerización parcial, formando cadenas lineales, y en la segunda el proceso se completa entrelazando las moléculas. Sufren un cambio químico cuando se moldean y, una vez transformados por la acción del calor, no pueden ya modificar su forma. Son ejemplos: las resinas epoxídicas, las resinas fenólicas y amídicas y los poliuretanos.

En segundo lugar, podemos clasificar a los plásticos de acuerdo a la identificación de la **Norma IRAM 13700** (Fig.1). Esta norma adopta la clasificación internacional más difundida donde se toman los 6 plásticos más comunes y el tipo 7 agrupa a todas las demás resinas o mezclas.



**Fig. 1.** Identificación de los plásticos. FUENTE: Norma IRAM 13700

Esta clasificación es importante, ya que no saber de qué tipo de plástico se trata, dificulta e incluso imposibilita el reciclaje. Para facilitar tal tarea, se convino que los productos plásticos elaborados tengan una leyenda que indique de qué tipo de material se trata. Los números son una simple numeración y las letras son las siglas del tipo de plástico. Como existe una gran diversidad de resinas plásticas, la tipología para identificarlos puede variar.

## 2. Residuos plásticos

Es importante remarcar que los residuos plásticos pertenecen únicamente a los **RESIDUOS SÓLIDOS** y pueden clasificarse según su origen en:

- **Residuos domiciliarios (RSU):** en general son envases como botellas, paquetes, etc.
- **Residuos industriales:** existe una gran diversidad dependiendo el tipo de industria.
- **Residuos agrícolas:** los reciclables son los silo bolsa, film de invernadero y bidones vacíos de fitosanitarios.

### 2.1. Cadena de recuperación de residuos

El gran problema a resolver para que los residuos sean efectivamente reciclados, es que puedan llegar a la planta industrial donde son **valorizados**. Esta trayectoria conocida habitualmente como **logística inversa**, incluye

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío distintos tramos, comenzando por el punto de generación (domicilio, industria, etc.). Aquí los principales actores involucrados son:

- Generadores
- Recuperadores urbanos o municipio – primera etapa de recolección
- Plantas de separación y clasificación de los distintos residuos y materiales
- Galponeros o acopiadores – galpones en los que se preparan fardos de los distintos residuos para un transporte eficiente
- Industria recicladora

La incidencia del **costo de transporte** de los residuos plásticos en la cadena de recuperación y reciclado es muy alta, debido a que los mismos tienen una baja “densidad aparente”. Esto se debe a dos factores: los plásticos tienen una densidad relativamente baja (del orden de la del agua) y los residuos, aun compactados, contienen aire en los espacios entre ellos, generando un mayor volumen para su transporte.

## 2.2. Jerarquía en la gestión de los residuos

La gestión de residuos reconoce una jerarquía, que es reconocida generalmente como las “4R”, antes de llegar a disposición final:

### **PRODUCTO MATERIAL ENERGIA**

<b>REUTILIZAR</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>RECICLAR</b>	<b>NO</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
<b>RECUPERAR ENERGIA</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>X</b>
<b>ENTERRAMIENTO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>

#### 1) **REDUCIR** la generación de residuos.

En este caso, no se genera el residuo.

#### 2) **REUTILIZAR** los productos para el mismo o distinto uso.

#### 3) **RECICLAR** residuos secos no reutilizados.

En este caso, se está recuperando el valor del material con que está hecho el producto.

#### 4) **RECUPERAR energía de los residuos secos no reciclables.**

En este caso, se está recuperando el valor de la energía contenida en el producto.

#### 5) **DISPOSICIÓN FINAL.**

La última alternativa es la disposición final de los residuos, de la que no se recupera ningún valor.

### 3. **Reciclado de los plásticos**

El reciclado consiste en la recuperación del material con que están fabricados los productos. Los mayores compradores de plásticos reciclados son las empresas transformadoras, ya que pueden fabricar sus productos mezclando materias primas vírgenes y recuperadas. Algunas características y condiciones de los plásticos a reciclar pueden hacer variar su valor:

- **Transparencia y color:** los plásticos de colores sólo podrán reciclarse para obtener productos de colores oscuros (grises, pardos, etc.). Por tanto, esto limita su utilidad y es conveniente separarlos.
- **Limpieza:** mientras más limpio esté el plástico, más valor adquiere en el mercado. Si los materiales vienen impresos se reduce su precio, ya que hay que eliminar las tintas o utilizarlos para hacer piezas oscuras.
- **Resistencia:** los recicladores tienen en cuenta la resistencia de los materiales a diferentes exposiciones. Por ejemplo a la degradación térmica durante el procesado de piezas o, una vez que ya se han fabricado, la resistencia a los agentes externos (humedad, luz solar, etc.)
- **Clasificación:** si los materiales plásticos recuperados han sido separados por colores, o rígidos y flexibles, o por botellas y films, etc., alcanzan mayor valor que si van mezclados ya que ahorran tiempo y gastos a las empresas recicladoras.
- **Acondicionamiento:** para minimizar los costos de transporte es importante que los residuos plásticos estén compactados y enfardados.
- **Materiales extraños:** los fardos de residuos plásticos deben estar libres de otros materiales como insertos metálicos y/o etiquetas de papel.

#### 3.1. **Tipos de reciclado**

Existen fundamentalmente 2 tipos de reciclado de plásticos: **el reciclado químico y el reciclado mecánico.**

- El **reciclado químico** consiste en un proceso químico por el cual se vuelven a obtener los monómeros iniciales. Es una “despolimerización” y actualmente se encuentra en pleno desarrollo.
- El **reciclado mecánico** sólo es aplicable a los termoplásticos. Es un proceso físico-mecánico mediante el cual el plástico es lavado, fundido, filtrado y

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío extrudado, obteniéndose pellets del material original, que pueden ser usados como nueva materia prima.

### 3.2. El reciclado mecánico

El reciclado mecánico es el más difundido en la opinión pública en Argentina.

En nuestro país, la tecnología para reciclado mecánico es de primer nivel mundial, lo que permite fabricar un material reciclado de muy alta calidad. Los plásticos que son reciclados mecánicamente provienen principalmente de dos grandes fuentes:

**A) Residuos plásticos provenientes de los procesos de fabricación.** Es decir, los residuos que quedan al pie de máquina, tanto en la industria petroquímica como en la transformadora. A esta clase de residuos se la denomina scrap. El scrap, en general, es más fácil de reciclar porque está limpio y es homogéneo en su composición. Algunos procesos de transformación (como el termoformado y soplado) generan scrap, que normalmente se recicla automáticamente en la misma fábrica y en forma automática, de lo contrario el proceso no sería económico.

**B) Residuos plásticos provenientes de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).** Estos se dividen a su vez en tres clases:

- Residuos plásticos de tipo simple: han sido clasificados y separados.
- Residuos mixtos: los diferentes tipos de plásticos se hallan mezclados.
- Residuos plásticos mixtos combinados con otros residuos: papel, cartón, metales, etcétera.

Las etapas del proceso de reciclado mecánico una vez que los residuos llegan a la planta se presentan en la Fig. 2:



Fig. 2: Principales etapas para producir plástico granulado. FUENTE: Plastivida

1. **Molienda.** Los plásticos separados son molidos y tamizados. Es importante verificar que los plásticos no se encuentren contaminados con objetos metálicos, ya que esto dañaría las cuchillas del molino.
2. **Separación por densidad.** Aprovechando las distintas densidades de los plásticos, esta técnica permite separarlos y obtener una mayor purificación. Se separan las trazas remanentes de otros plásticos, pequeños objetos metálicos u otras partículas. Este proceso consiste en una decantación con agua, y sus productos principales son las poliolefinas (PET, PVC y PS).
3. **Lavado.** En el caso de que los plásticos se encuentren sucios, el lavado se efectúa con agua y detergentes de baja espuma.
4. **Secado.** Para eliminar los restos de humedad.
5. **Extrusión-granulación.** Se realiza para uniformizar el tamaño de las partículas del material. El mismo alimenta al tornillo de un extrusor, se funde por calor, se lo fuerza por una matriz, luego es enfriado por agua y finalmente es cortado en forma de pequeños cilindros (de aproximadamente 3 mm x 3 mm), denominados pellets. En este proceso al material se le aportan aditivos para mejorar su performance en su reutilización. También puede ser coloreado con pigmentos.
6. **Embolsado y almacenado.** El material ya está listo para su reutilización.

Si bien el procedimiento presentado es un modelo estándar de reciclado mecánico, existen otras tecnologías más simplificadas para el mismo fin. El proceso descrito es el que se utiliza en muchos países para la elaboración de pellets plásticos para soplado, inyección, extrusión de caños.

### 3.3. Alternativas al reciclado mecánico

Existen otras alternativas al reciclado mecánico que también son eficaces para dar una nueva vida a los plásticos:

- **Recuperación de los componentes iniciales:** Se somete el residuo plástico a diversos procesos químicos para descomponerlo en componentes más sencillos, que serán usados nuevamente como materia prima en plantas petroquímicas. Actualmente, se encuentra en pleno desarrollo a nivel mundial pero en Argentina no se utiliza.
- **Valorización energética:** El plástico es un excelente combustible ya que posee un poder calorífico similar al del gas natural o fueloil. Este proceso es adecuado para plásticos no reciclables, degradados o sucios. El reciclado

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío mecánico y la recuperación energética se complementan para la gestión de los residuos plásticos en una economía circular.

#### 4. Beneficios del reciclado

El reciclado de plásticos brinda innumerables beneficios y se pueden citar los siguientes más relevantes:

##### - Ambientales

- Preservación de productos fósiles no renovables. Cada tonelada de plástico fabricada a través del reciclado evita el consumo de más de una tonelada de gas y o petróleo.
- Recuperación del valor existente en los residuos así como evitar su disposición final correcta (relleno sanitario) o incorrecta (basural).
- Disminución de la emisión de gases efecto invernadero
- Reducción del consumo de energía

##### - Económicos

- Transformación de residuos en productos con valor económico.
- Reducción de terrenos destinados a la disposición final de residuos.
- Reducción de importaciones de polímeros virgen. Dado que Argentina no es autosuficiente en polímeros, puede reemplazarse la importación por la materia prima generada localmente por la industria recicladora.
- Posibilidad de exportar polímeros reciclados. Los polímeros reciclados son exportados a varios países del mundo: Brasil, Estados Unidos, China.

##### - Sociales

- Generación de actividades demandantes de mano de obra:
  - Mano de obra directa empleada en la industria recicladora: trabajadores industriales capacitados.
  - Mano de obra indirecta: transporte, limpieza y otros servicios.
  - Mano de obra ocupada en la recuperación de residuos: recuperadores urbanos, cooperativas y empresas.
- Generación de un ambiente con menos desechos, por consiguiente un aumento de la calidad de vida.

En la Tabla 1 se muestran cuantificados algunos de los beneficios citados, tomando como base el volumen de plásticos reciclados en 2014 en Argentina y la duplicación de ese volumen:

Tabla 1. Beneficios del reciclado de plásticos. FUENTES: Elaboración propia. \*Energía y emisiones de efecto invernadero es de elaboración propia en base a estudios de ACC [4].\*

**Cuantificación de beneficios generados por el reciclado**

<b>Consumo aparente de plásticos</b>	<b>1.700.000</b>	<b>tn/año</b>	
	<b>2014</b>	<b>Objetivo</b>	
<b><u>VOLUMEN RECICLADO</u></b>	<b>235.000</b>	<b>500.000</b>	<b>t/año</b>
<b>Tasa de reciclaje sobre consumo aparente</b>	<b>13,8%</b>	<b>29,4%</b>	
<b><u>Ahorros por la producción de materia prima a partir de residuos vs. material plástico virgen</u></b>			
<b>Ahorro de energía de proceso</b>	<b>987.000.000</b>	<b>2.100.000.000</b>	<b>kWh</b>
<b>Ahorro de materia prima fósil</b>	<b>305.500.000</b>	<b>650.000.000</b>	<b>m<sup>3</sup> gas natural</b>
<b><u>Impacto ambiental</u></b>			
<b>Reducción emisiones GEI</b>	<b>29.610.000</b>	<b>63.000.000</b>	<b>t eq.CO<sub>2</sub></b>
<b>Reducción vol. de residuos</b>	<b>1.339.500</b>	<b>2.850.000</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b><u>Generación de divisas</u></b>			
<b>Reducción de importaciones</b>	<b>423.000.000</b>	<b>900.000.000</b>	<b>us\$</b>
<b>Aumento de exportaciones (PET)</b>	<b>169.905.000</b>	<b>361.500.000</b>	<b>us\$</b>
<b><u>Demanda de mano de obra</u></b>			
<b>Directa</b>	<b>2.350</b>	<b>5.000</b>	<b>personas</b>
<b>Indirecta (3 indir. / 1 directa)</b>	<b>7.050</b>	<b>15.000</b>	<b>personas</b>
<b>Recuperadores (estimado 500kg / mes / persona)</b>	<b>47.000</b>	<b>100.000</b>	<b>personas</b>
<b>TOTAL</b>	<b>56.400</b>	<b>120.000</b>	<b>personas</b>

## 5. Situación del reciclado en Argentina

### 5.1. Reciclado por polímeros

En la Tabla 2 se pueden ver los valores estimados para el año 2017, de las tasas de reciclado subdividido por tipo de polímero: PEAD, PEBD, PEBDL, PP, PET, PSC y PSAI, PVC.

**Tabla 2. Consumo aparente y reciclado por tipo de polímero. FUENTE: Elaboración propia con datos de IPA**

POLIMERO	CONSUMO APARENTE	RECICLADO	
	(t)	%	t
PEAD	244.968	14%	34.300
PEBD	170.802	13%	22.200
PEBDL	232.951	13%	30.300
PP	340.642	14%	47.700
PET	196.396	25%	49.100
PS CyAI	61.896	10%	6.200
PVC	151.777	5%	7.600
<b>Total</b>	<b>1.399.432</b>	<b>14%</b>	<b>197.400</b>

### 5.2. Evolución en Argentina

En términos generales, el reciclado de plásticos ha venido creciendo en los últimos 15 años, con alguna meseta, y se estima que seguirá incrementándose. En la Tabla 3 se puede ver la evolución del reciclado desde el año 2003 hasta el 2017:

**Tabla 3. Evolución del reciclado plástico en Argentina (2003-2017)**

	2003	2006	2009	2011	2013	2017
Reciclado total plásticos (Doméstico + Industrial + Comercial + Agrícola) (Tns)	57.100	97.000	150.000	200.000	223.000	228.000
Reciclado de Plásticos Post Consumo Doméstico Tns (Tns)	35.900	61.100	94.500	140.000	154.000	160.000
Reciclado Post Consumo Industrial, Comercial, Agro (Tns)	21.200	35.900	55.500	60.000	69.000	73.000

FUENTE: Elaboración propia

### 5.3 Factores que afectan la tasa de reciclado

Son varios los factores que coadyuvan a que la tasa de reciclado no crezca como es esperado, para solucionar la situación de los residuos. A saber:

- **Baja reciclabilidad de algunos productos**

Un factor fundamental es el eco-diseño de los productos, para que los mismos sean fácil y económicamente reciclables, por ejemplo siendo fabricados de un solo material. De esta manera, las empresas deberían adoptar el principio de responsabilidad extendida del productor.

- **Gestión inadecuada de residuos**

Si los residuos no son separados en origen y recolectados en forma diferenciada, se complica y se encarece mucho el proceso de separación, clasificación y lavado, haciéndolo económicamente inviable.

- **Precios internacionales**

Los polímeros vírgenes son productos petroquímicos (commodities), cuyo precio se mueve con el precio del petróleo crudo. El precio de los polímeros vírgenes es un techo para el de los plásticos reciclados, cuya estructura de costo está totalmente desacoplada de los precios internacionales.

- **Legislación**

La falta de legislación es un factor muy importante que afecta el crecimiento del reciclado. Solo algunos ejemplos son la tan demorada ley de envases, la falta leyes que incentiven el uso de material reciclado y las leyes que faciliten la comercialización de residuos reciclables.

### 5.4. Reciclado de polímeros y sus residuos

Actualmente en Argentina se reciclan, entre otros, los siguientes polímeros plásticos y sus residuos:

- **PE – Polietileno de alta (PEAD) y baja densidad:** en general son envases de PEAD soplado (lavandina, champú), film de distintos usos (bolsa camiseta, silo bolsa, termocontraible, streech), etc.
- **PET – Poletilen tereftalato:** fundamentalmente proviene de botellas de gaseosas, aguas y aceites. Los mismos pueden ser reciclados con tecnologías aprobadas para estar nuevamente en contacto con alimentos.
- **PP - Polipropileno:** utilizado en films de envases de galletitas, snacks, muebles plásticos, etc.
- **EPS - Poliestireno expandido (conocido por la marca comercial Telgopor):** proveniente del empaque de artículos eléctricos y electrónicos.
- **PC - Policarbonato:** cuyo uso más difundido son los botellones de agua de los dispenser.

## **5.5. Usos del material reciclado**

Los productos que fabrica la industria transformadora con polímeros reciclados son principalmente:

**PET** - Envases / Fibras textiles / Flejes / Cuerdas

**PEAD** - Bolsas / Envases / Cañerías / Madera plástica / Baldes

**PP** – Cajones / Cañerías – Muebels

**PVC** – Caños / Suelas para calzado

**PS** – Artículos de librería / Perfiles / Bandejas

## **6. Desarrollos actuales en el mundo**

La innovación tecnológica y el ingenio son dos claves primordiales para conseguir pequeños grandes avances. Los negocios y empresas que se preocupan por cuidar el planeta también pueden tener un poderoso impacto en las personas, mejorando su modo de vida o cuidando su entorno.

Al diseñar un objeto a base de materiales plásticos, el diseñador atenderá a los requisitos de la aplicación que se le quiere dar al objeto, como pueden ser la temperatura de aplicación, rigidez, resistencia al impacto, exposición a agentes químicos, ambiente.

Los materiales plásticos presentan gran versatilidad de transformación y, por tanto, de diseño. Elegido el material según la funcionalidad deseada para el objeto, especialistas determinan aspectos técnicos en relación a la procesabilidad y condiciones de conformado de la pieza. También deberían considerarse los aspectos ambientales como diseño conteniendo reciclados con fines de mejorar el comportamiento ambiental y obtener distintivos ecológicos o con menor huella de carbono-CO<sub>2</sub>, durante su ciclo de vida.

Por último, el diseño orientado al reciclado se realiza con el objetivo de que el producto, al final de su vida útil, se pueda reciclar para obtener materiales de calidad. Los diseñadores deben tener muy presente que al final del ciclo de vida del producto, éste debe ser fácilmente reciclable y pensar que los mercados mayoritarios de los reciclados plásticos, son los propios plásticos.

### **6.1. Procesos de reciclado novedosos**

Actualmente, las tecnologías a nivel mundial han avanzado enormemente, y con ellas los diferentes procesos de reciclados innovadores.

- **Procesos químicos**

Según muchos de los expertos, la tecnología del reciclado ayudará a la industria de los plásticos a optimizar el uso de recursos naturales y maximizar la valorización. Desde luego, no es una solución que permita solucionar el problema de los residuos por sí sola, como no lo es ninguna de las posibilidades de tratamiento de los plásticos desechados.

Los procesos químicos eliminan algunas de las limitaciones del reciclado mecánico, que requiere disponer de grandes cantidades de residuos plásticos limpios y homogéneos. Se reducen así los costos de recogida y selección y se fabrican productos finales de calidad.

Ejemplo de proceso es el **proyecto ChemCycling**, desarrollado por BASF. A través de un proceso de pirólisis la materia prima se introduce en el sistema de producción para crear nuevos productos químicos [5]. Se puede ver esquemáticamente el proceso en la Fig. 3:

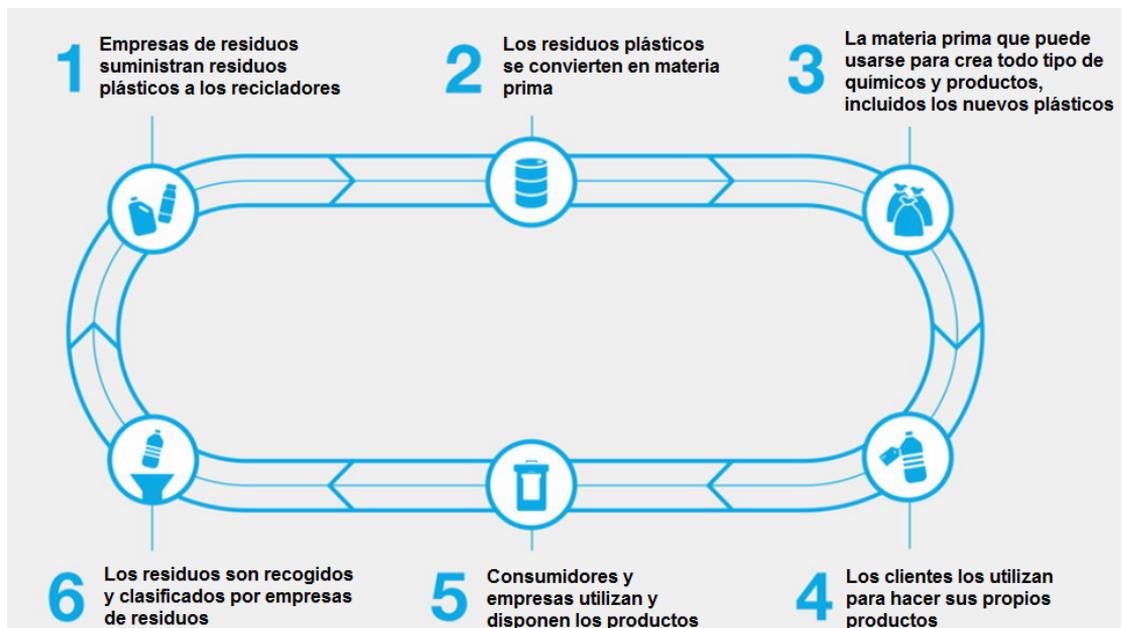


Fig. 3. Esquema del proceso ChemCycling. FUENTE: BASF

De esta manera, se pueden reciclar materiales que hasta ahora no se podían reciclar, por ejemplo plásticos de capas múltiples o con residuos. Por otro lado, el reciclaje termoquímico como tecnología, aún necesita aceptación tanto del mercado como de los reguladores. Hay muchas preguntas abiertas con respecto a la tecnología, la economía y la regulación.

- **Procesos por disolución**

Los procedimientos de disolución de los plásticos permiten recuperar los polímeros purificados eliminando los materiales contaminantes contenidos en

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío los desechos. Estos no implica la modificación química de las moléculas de polímeros, y no corresponden ni a un reciclaje mecánico ni a una valorización energética de los residuos.

Ejemplo de este procedimiento es la tecnología de disolución química del PVC a través de solventes, desarrollada por Solvay: **proceso Vinyloop** (Fig.4). El proceso se basa en una disolución del compuesto a reciclar con disolvente, seguido de un filtrado para separar el PVC de otros materiales y la eliminación del disolvente mediante el evaporado por ebullición. Otros pasos adicionales permiten añadir a los materiales a reciclar, compuestos blancos o de colores así como de propiedades ignífugas [6].

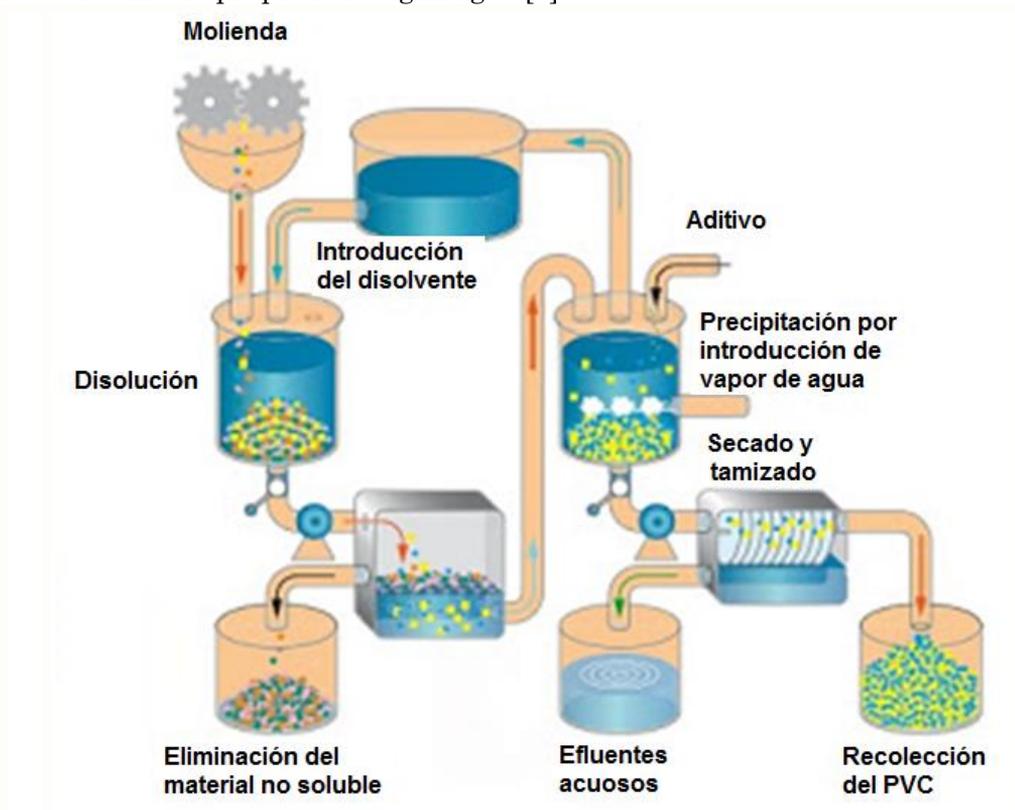


Fig. 4. Esquema del proceso Vinyloop. FUENTE: Solvay

Este es un proceso que demanda alta inversión y gran control de la unidad productiva. Permite aislar el compuesto de PVC de otros materiales y hoy en día es el único método de reciclaje que permite regenerar el PVC contenido en estructuras compuestas, hasta ahora imposibles de recuperar mediante métodos tradicionales.

Una característica interesante del PVC es su completa y rápida solubilidad en determinados disolventes. El disolvente se recicla y el proceso, que funciona en circuito cerrado, no produce efluentes. La resina regenerada del PVC

(según anuncia el fabricante) es de una calidad comparable a la del producto de origen.

En la actualidad, los materiales reciclados son residuos de cables, marcos y persianas, films agrícolas, además de las lonas recubiertas de PVC. En el futuro se espera poder reciclar papeles pintados, revestimientos de suelo, membranas aislantes, blísteres, etc.

## **6.2. Materiales obtenidos de recursos renovables**

Dado que el reciclado no resuelve todos los problemas de los residuos, es que se está trabajando en el desarrollo de materiales alternativos:

### **- Plásticos biobasados**

Los plásticos biobasados son fabricados a partir de materiales renovables: generalmente cereales como el maíz o cultivos como la caña de azúcar. A través de un proceso de fermentación usado por la industria alcoholera, se obtiene, por ejemplo, el etanol. El etanol luego es transformado (en una biorefinería) en monómeros como el etileno, que puede polimerizarse para la obtención de polietileno.

Unas de las ventajas a destacar frente a los plásticos fabricados a partir de fósiles es que no consumen recursos no renovables y que la huella de carbono que generan en su producción es sensiblemente menor, dado que hay una gran captación de CO<sub>2</sub> durante el la etapa de crecimiento de los vegetales.

Los plásticos biobasados, al igual que los fabricados a partir de recursos fósiles, son reciclables.

### **- Materiales biodegradables y compostables**

Estos materiales, a veces erróneamente llamados plásticos, son polímeros naturales, también fabricados a partir de recursos vegetales renovables, obteniéndose materiales como, por ejemplo, el ácido poliláctico (PLA), a partir del maíz. Este material está siendo muy estudiado pero aún es pobre en propiedades mecánicas, su costo es mucho mayor, comparado con los plásticos de origen fósil y no puede ser reciclado.

Otros son producidos directamente por bacterias que desarrollan gránulos de un plástico llamado Polyhydroxyalkanoate (PHA) dentro de la célula misma. La bacteria se desarrolla y reproduce en un cultivo y el material plástico luego se separa y purifica. Estos materiales hoy se fabrican en pequeña escala y no existe producción nacional. Por lo tanto, son muy caros, no son de uso masivo y

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío sus aplicaciones están limitadas a usos de muy alto valor, como productos medicinales (suturas, material para taponajes quirúrgicos, etc.).

## CONCLUSIONES

- ***Los residuos plásticos son RECURSOS***

De acuerdo a la economía circular, los desechos de una industria se convierten en recursos para otra y, por tanto, cierran el ciclo, disminuyendo los residuos industriales. Si bien antes los residuos eran considerados materiales no aprovechables, hoy en día ha ido cambiando ese concepto gracias a la industria recicladora que les ha dado una nueva vida.

- ***Los plásticos en su mayoría son RECICLABLES***

Podemos decir que en su mayoría todos los plásticos son reciclables por diferentes tipos de mecanismos de transformación. Sin embargo, es importante que las empresas diseñen productos más reciclables, para facilitar las tareas posteriores de recolección, clasificación y reciclado.

- ***El reciclado presenta muchos BENEFICIOS***

Son innumerables los beneficios que aporta el reciclado a nuestro entorno en cuanto a lo social, ambiental o económico. Además, el desarrollo de la actividad económica del reciclaje es un beneficio para todos; crea de puestos de trabajo, ahorra recursos y reduce residuos.

El fin del reciclado es buscar una solución al problema de la acumulación de residuos y al aprovechamiento de los mismos, ya sea que se recuperen de manera directa o indirecta. Más allá de que exista legislación o no, debemos ser conscientes y concientizar a todas las personas sobre los beneficios que aporta el reciclado.

- ***Cada uno de nosotros es un ESLABÓN de la cadena***

El reciclado es un tema que nos afecta a todos por igual. El medio ambiente, los recursos naturales y el ser humano con todas sus actividades están estrechamente relacionados; si alguno de estos componentes influye de manera positiva o negativa sobre otro, todo el sistema va a notar ese cambio.

Los **ciudadanos** deben colaborar en la separación en origen de los residuos.

Los **municipios** deben incentivar y aplicar la recolección diferenciada.

Las **cooperativas** deben volver más eficientes los procesos de recuperación, clasificación y acopio.

La **industria recicladora** se debe esforzar en la generación de materia prima de calidad.

La **industria plástica** debe innovar en la fabricación de nuevos productos que sean: **RECICLABLES** y contengan **MATERIA PRIMA RECICLADA**.

El **Estado** debe legislar e implementar leyes que aumenten el flujo de materiales reciclables y además brindar apoyo a los actores de la cadena.

Por último, los **ciudadanos** deben tener el privilegio de utilizar productos que contengan **MATERIAL RECICLADO** y a la vez sean **RECICLABLES**.

- ***Los plásticos NO SON EL PROBLEMA***

La percepción de que los residuos plásticos son un problema ambiental, ha sido causada no por el material en sí, sino por la **falta de buenas prácticas de consumo y una inadecuada disposición de los residuos**. Es el resultado de una falta de cultura ambiental por parte de la sociedad y de una deficiente infraestructura del país para el acopio y correcto manejo de los residuos.

Es por ello, que se requieren acciones concretas y la participación conjunta de todos los involucrados en la problemática ambiental; es decir, la acción comprometida de gobiernos, asociaciones nacionales e internacionales, ambientalistas, institutos de investigación, involucrados en la cadena productiva de los diversos plásticos y por supuesto de toda la sociedad.

## **AGRADECIMIENTOS**

El contenido es de elaboración propia con la consulta de los siguientes organismos:

- **CAIP**

Cámara Argentina de la Industria Plástica

caip@caip.org.ar

[www.caip.org.ar](http://www.caip.org.ar)

- **CAIRPLAS**

Cámara Argentina de la Industria de Reciclados Plásticos

info@cairplas.org.ar

[www.cairplas.org.ar](http://www.cairplas.org.ar)

- **ECOPLAS**

ecoplas@ecoplas.org.ar

[www.ecoplas.org.ar](http://www.ecoplas.org.ar)

- **IPA**

Instituto Petroquímico Argentino

[ipainfo@ipa.org.ar](mailto:ipainfo@ipa.org.ar)

[www.ipa.org.ar](http://www.ipa.org.ar)

- **ACC**

American Chemistry Council

[www.americanchemistry.com](http://www.americanchemistry.com)

## REFERENCIAS

- [1] Fundación Ellen Macarthur, *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada* **3, 9** (2015)
- [2] ONU Ambiente, *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*, **3, 13** (2018)
- [3] Fundación Ellen Macarthur, *Latin America*, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/regions/latin-america>
- [4] The Plastics Division Of The American Chemistry Council, Inc., The Association Of Postconsumer Plastic Recyclers (Apr), The National Association For Pet Container Resources (Napor), And The Pet Resin Association (Petra), *Life cycle inventory of 100% postconsumer hdpe and pet recycled resin from postconsumer containers and packaging*, **230, 245** (2010)
- [5] BASF, *Proyecto ChemCycling*, <https://www.basf.com/ar/es/who-we-are/sustainability/management-and-instruments/chemcycling.html>
- [6] Solvay, *The Vinyloop Process*, <http://www.vinyloop.com/en/the-vinyloop-process-en.html>

# RECICLADO DE PLÁSTICOS PROVENIENTES DE ARTÍCULOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS. SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVA

*Yamila V. Vazquez y Silvia E. Barbosa\**

Planta Piloto de Ingeniería Química, PLAPIQUI (UNS-CONICET),  
Bahía Blanca 8000, Cno. "La Carrindanga" km 7, Argentina.  
Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur,  
Bahía Blanca 8000, Av. Alem 1253, Argentina.  
[\\*sbarbosa@plapiqui.edu.ar](mailto:*sbarbosa@plapiqui.edu.ar)

## Resumen

En este capítulo se analiza la situación actual de los Residuos de Artículos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), particularmente los plásticos. Se presenta un panorama general de la situación a nivel mundial y en Argentina respecto de cómo se los gestiona actualmente y cuáles son las tendencias en generación y gestión de plásticos RAEE. Además, se muestran las distintas legislaciones y regulaciones vigentes, analizando sus características, campos de aplicación e innovaciones para la mejora continua en la gestión de estos residuos. Actualmente, la Unión Europea, China y Estados Unidos, entre otros, son los lugares con más avances en cuanto al marco legal de estos residuos. Particularmente, Argentina no posee leyes específicas al respecto por lo que, de ser necesario, se toman como referencia las normativas internacionales para la gestión de los RAEE. Es importante destacar que los plásticos presentes en estos residuos constituyen en sí mismos una mezcla de varios componentes inmiscibles que, al ser fundidos y enfriados segregan en fases, generando una compleja morfología con baja adhesión interfacial y por ende malas propiedades finales. A su vez, dada la similitud química entre ellos, su separación es difícil y acarrea grandes costos, por lo que el reciclado de estos materiales mezclados es una alternativa ecológica y económicamente viable para su reutilización como tales, siempre que se compatibilicen las fases poliméricas y se mejoren las propiedades finales. En tal sentido, se analizan comparativamente distintas opciones de reciclado de plásticos RAEE, y de sistemas de compatibilización de los mismos.

*Palabras clave:* RAEE, reciclado de plásticos, gestión de residuos sólidos

## Abstract

**Recycling of Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. Current Situation and Perspective.** This chapter presents the current situation of Waste from Electrical and Electronic

Equipment (WEEE), particularly plastics, providing a general overview along the worldwide and specifically in Argentina. What are the exiting options, what is currently done, what is expected, what is being targeted? Additionally, legislations and / or regulations and trends of this kind of waste for the continuous management improvement are detailed. Now a days, European Union, China and United States, among others, are the places with major developments in terms of legal framework for this specific waste. Particularly, Argentina does not present specific laws in this respect. In this way, if necessary, international regulations for the management of WEEE are taken as a reference. It is important to highlight that plastics present in electronic waste constitute a mixture of several immiscible components by themselves and when they are melted and cooled, segregate in phases generating a complex morphology with low interfacial adhesion and therefore poor final properties. Additionally, their separation is difficult and entails large costs because of their chemical similarity. Then, recycling of these mixed materials is an ecologically and economically viable alternative for their reuse as such, as long as the polymer phases are compatibilized and final properties improved. In this sense, different plastic WEEE recycling options are comparatively analyzed and also, compatibilization systems.

*Keywords:* WEEE, plastic recycling, solid waste management

## INTRODUCCIÓN

La cantidad y calidad de los residuos que genera el hombre ha variado a lo largo del tiempo y está íntimamente relacionada con los cambios sociales. Particularmente, en las últimas décadas la corriente de residuos provenientes de artículos de eléctrica y electrónica, comúnmente denominados RAEE, crece de manera exponencial y continua debido al incremento del consumo masivo de productos de alta tecnología que, por los constantes avances tecnológicos tienen corta vida útil [1,2]. Los teléfonos móviles son actualmente los mayores contribuyentes al aumento de volumen de los RAEE debido al corto periodo de tiempo de recambio de las nuevas generaciones de celulares (no más de dos años).

Esto significa que en dos años una cantidad equivalente se convierte en residuo electrónico. Para ayudar a dimensionar la magnitud del problema actual y cómo se incrementará, es válido analizar las estadísticas mundiales que estiman que para para fines del año 2018, el número de usuarios de celulares sea de 4,57 billones [3]. Particularmente en Argentina existen alrededor de 21,7 millones de usuarios y aprox. 54 millones de celulares, lo que equivale a más de un teléfono por habitante mayor de 5 años [4,5]. Respecto de su gestión, en el mundo, de la totalidad de celulares, el 49 % es reutilizado como tal, el 48 % se descarta y sólo el 3 % se recicla [6,7]. Por otra parte, el mercado de computadoras se incrementa cada vez más y un gran porcentaje de la población mundial dispone de más de una, por ej., una en su casa y otra en el trabajo. Además, aunque la vida útil de estos equipos se estima en diez años, al cabo de tres o cuatro ya se vuelven obsoletos

debido a los requerimientos de los nuevos programas y las nuevas versiones de los sistemas operativos. En consecuencia, el problema de crecimiento y acumulación de este tipo de residuos se incrementa junto con el de los celulares [2].

Los RAEE, comúnmente denominados chatarra electrónica (e-waste o e-scrap indistintamente en inglés), están constituidos por un conjunto de múltiples y diversos materiales que incluyen desde metales pesados hasta plásticos, desde cerámicos hasta metales preciosos, desde materiales compuestos hasta laminados (láminas de diferentes materiales intercalados y unidas entre sí con adhesivos). Este conjunto heterogéneo de materiales hace que sus residuos mezclados sean considerados como peligrosos, aunque mayoritariamente no lo sean. Es por ello que la mayoría de las normas obligan a tratarlos como peligrosos con los consecuentes altos costos asociados. De esta manera no sólo se genera un perjuicio económico, sino que se incrementa notablemente el pasivo ambiental tratando como residuo peligroso aquellos materiales que pueden ser recuperados de manera sostenible, con beneficio económico y ecológico. Los componentes valiosos no tóxicos como oro, plata, platino, paladio, silicio y plásticos son mayoritarios respecto de metales pesados y pueden ser completamente recuperados, reusados y/o reciclados. La adecuada gestión de los mismos es lo que se denomina minería urbana y constituye un desafío sustentable para este siglo [8]. Particularmente, dentro de los RAEE, los plásticos no son considerados los más importantes porque no son de alta peligrosidad y su costo es relativamente bajo frente a los metales preciosos. Sin embargo, están presentes en gran cantidad. Aproximadamente el 18 % en peso (más del 30 % en volumen) de la totalidad de los RAEE está constituido por plásticos que pueden ser reciclados por reprocesamiento, lo que hace que en su conjunto tengan un alto valor intrínseco [9]. En el 2018 se estima que en el mundo se generaron aprox. 13 millones de toneladas (Mt) de plásticos RAEE, de las cuales Argentina aportaría alrededor de 75000 t [10,11].

De lo antes expuesto surge claramente que el problema del incremento constante y creciente de los RAEE es muy serio y conlleva perjuicios económicos y ecológicos. Esto ha llevado a que se hayan focalizado esfuerzos en el desarrollo de métodos sostenibles de gestión integral de este tipo de residuos para reducir la cantidad enviada a disposición final como peligrosos o por enterramiento en rellenos sanitarios o basurales a cielo abierto. Las metodologías más adecuadas se centran en la valorización intermedia de los residuos, es decir la recuperación y reutilización del residuo previa a la disposición final, permitiendo un avance sostenible incrementando los beneficios ecológicos, económicos y sociales. Estas metodologías están completamente alineadas con el concepto de economía circular, que engloba en un sistema cerrado a las interacciones entre economía y medio ambiente. Particularmente para los plásticos, incluidos los provenientes de RAEE, la economía circular asume que los residuos son un recurso que debe ser considerado dentro del ciclo de vida de los mismos, es decir, los residuos deberían constituir la materia prima de otro proceso [12,13].

En tal sentido, con el fin de reducir la magnitud de desechos enviados a disposición final, en diferentes lugares del mundo se están implementando distintos sistemas de gestión de residuos para los que se han elaborado

regulaciones y normativas. Estas regulaciones tienden, en todos los casos, a minimizar la cantidad de RAEE a disponer como peligrosos, promoviendo la separación inicial de los no tóxicos e incentivando su reutilización de distintas formas. El propósito de estas regulaciones es prevenir el aumento en la generación de RAEE y promover el reúso, reciclado u otras formas de recuperación. Se busca, además, disminuir el impacto medioambiental de todas las partes involucradas en la generación de RAEE: productores, distribuidores, consumidores y, en especial, recicladores, recolectores y/o aquellos que se involucran directamente en el manejo del residuo [1,14]. Por otra parte, estándares estadounidenses exigen a los productores de carcasas de artículos de eléctrica y electrónica (AEE) incorporar al menos un 25 % de material post consumo en los nuevos equipos [15]. Esto llevó a que los principales países productores como China, Taiwán y Vietnam, incrementen la importación de plásticos RAEE certificados y acondicionados [2].

A pesar de los esfuerzos que se están llevando a cabo en distintos lugares del mundo para la gestión de RAEE, en el caso de los plásticos que los componen, la gestión no es sostenible. La principal razón es que los plásticos RAEE son complejos copolímeros relativamente inmiscibles y muy similares entre sí. Esto dificulta su separación por tipo, generando que las resinas post consumo recuperadas tengan propiedades finales deterioradas y consecuentemente, bajo valor económico.

En tal sentido surge la necesidad de encontrar metodologías que garanticen la conservación de las propiedades finales de plásticos RAEE a partir de mezclas de las resinas que los componen, generando una buena performance mecánica y consecuentemente, mayor beneficio económico. Los factores que afectan las propiedades finales son: compleja morfología de las resinas, presencia de aditivos y cargas, posible degradación de los materiales bases y/o aditivos, proceso, miscibilidad y/o compatibilidad entre las resinas, etc. Es importante entonces, llevar a cabo estudios sistemáticos de dichos factores y su efecto en las propiedades. En este capítulo, se presenta un análisis de este tipo de residuos, comenzando por una descripción básica del marco legal en general y en Argentina en particular. Se incluye un análisis del estado actual de la gestión de los plásticos RAEE, finalizando con propuestas para incrementar su reciclado con agregado de valor.

## **1. Marco legal**

El continuo y exponencial incremento en la acumulación de RAEE ha hecho que en varios lugares del mundo se implementen distintas normativas y regulaciones referidas a la gestión de estos desechos. En la Unión Europea (UE) se desarrollaron directivas relacionadas con la responsabilidad de los fabricantes y comerciantes respecto del diseño y evaluación del impacto medioambiental de sus productos a lo largo de su vida útil [16] Particularmente, la directiva *EU Directive 2012/19/EC*, apela a la responsabilidad social empresarial de los productores mediante requerimientos específicos. Tiene por objetivo prevenir la generación y acumulación de RAEE mediante la promoción de metodologías de disposición

intermedia como reuso, reciclado y otras formas de recuperación para reducir el envío a disposición final [1,17].

Es importante resaltar que, a pesar de las directivas y la prioridad dada a la gestión de RAEE, oficialmente sólo un tercio de los mismos se recupera y trata como tal. Genera gran preocupación la gran incidencia del comercio ilegal de estos residuos hacia países subdesarrollados. Se reportan exportaciones ilegales de equipos en desuso incentivados por el bajo costo de mano de obra (debido a las malas condiciones de trabajo) para su reprocesado en los países subdesarrollados.

La directiva contempla el problema de la exportación ilegal tratando de generar acciones tendientes a solucionarlo, como por ejemplo la implementación de regulaciones de exportación más específicas para los RAEE, principalmente relacionadas con la certificación de los materiales recuperados [14,18]. Otra problemática que consideran las directivas es el manejo de las sustancias peligrosas presentes en los AEE y, consecuentemente, en sus residuos. En la fabricación de los AEE, la *RoHS Directive 2011/65/EC* restringe el uso de plomo, cadmio, mercurio y cromo hexavalente, además de retardantes de llama (sólo presentes en los plásticos) como Bifenilos polibrominados y Éteres difenilos polibrominados. Se estipulan los contenidos máximos, prohibiendo tanto la venta como el reciclado de los aparatos que no cumplan con esos límites. Cuando las concentraciones superan el máximo, los RAEE se consideran peligrosos y deben ser tratados de forma especial o enviados a disposición final como tales. [16,19]. A su vez, como consecuencia de las directivas europeas, en 2005, China estableció una serie de leyes específicas para mejorar la gestión de RAEE. Las mismas contemplan tres aspectos fundamentales: la responsabilidad extendida al productor, el control de sustancias peligrosas presentes en los RAEE y el impacto medioambiental generado por los tratamientos de estos residuos [8,20].

EEUU es uno de los países con mayor consumo de AEE y generación de RAEE. Sin embargo, no existen regulaciones federales para su manejo y gestión, quedando esto como responsabilidad de cada estado y/o municipio, dado que no son considerados peligrosos [21,22]. Las principales regulaciones vigentes tienen en cuenta la ley de protección al consumidor y la ley federal de reciclado de computadoras, cuyo objetivo es fomentar el reciclado de la basura electrónica [22]. Por ejemplo, 11 estados (California, Connecticut, Delaware, Hawai, Iowa, Maine, Massachusetts, Michigan, Nueva York, Oregón y Vermont) emplean un sistema de depósito (en la compra) reembolsable al momento de desechar correctamente (por canales habilitados para tal fin) el artículo eléctrico o electrónico posconsumo [23]. En cuanto a la Responsabilidad Extendida al Productor para el reciclado de RAEE, Maine fue el primer estado en implementarla, logrando una reducción considerable en la disposición final de RAEE y el consecuente incremento de las actividades relacionadas con el reciclado de este tipo de productos [21]. En la actualidad, al menos 20 estados y un municipio (Nueva York), poseen legislación referida a los RAEE [24].

Particularmente para disminuir el pasivo medioambiental desde la fabricación hasta el final de la vida útil de los AEE, la Asociación de

Estandarización perteneciente al Instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos de EEUU (IEEE-SA), elaboró normas (IEEE Standards). Las mismas están basadas en las directivas europeas para reducir la generación de RAEE y tienen como objetivo fomentar el reciclado, reúso y recupero de las partes. En particular el *IEEE Standard 1680 - 4* establece criterios de performance medioambiental e indica que para poder comercializar nuevos AEE en EEUU, sus partes plásticas deben contener al menos un 25 % en peso de material post-consumo [15,25].

En los países de Latinoamérica (LATAM), existe un marco legal básico para el manejo y reciclado de RAEE que considera principalmente las partes metálicas. Cabe destacar que la mayoría de los países latinoamericanos ratificaron el convenio de Basilea en 1990 y tienen legislaciones de manejo de residuos en general, pero no particulares para RAEE. En la mayoría de los casos se los considera como peligrosos y su manejo se regula como tal. Sólo algunos países tienen leyes o regulaciones específicas para este tipo de residuos. Por otra parte, en estos países la infraestructura de gestión de residuos existente es pobre y muchos de ellos no poseen las tecnologías necesarias para el procesado o disposición final de partes críticas de los RAEE. Es por ello que se los exportan luego de un simple tratamiento (como por ej. separación y molienda) o se disponen como residuos sólidos urbanos [14,26].

A su vez, desde 2013 y en conjunto con varias iniciativas nacionales y ocasionalmente internacionales, como por ejemplo las emitidas por la Plataforma Regional de Residuos Electrónicos en Latinoamérica y el Caribe (RELAC), el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) logró consensuar un proyecto coordinado por la Organización de Desarrollo Industrial de las Naciones Unidas (UNIDO) que involucra a la mayoría de los países de LATAM, Argentina entre ellos. El proyecto titulado “*Strengthening of National Initiatives and Enhancement of Regional Cooperation for the Environmentally Sound Management of POPs in Waste of Electronic or Electrical Equipment (WEEE) in Latin American Countries*”, fue puesto en consideración en 2013 y aprobado en marzo de 2017. Actualmente se encuentra en ejecución la primera fase del mismo, que consiste en el relevamiento del estado actual sobre los RAEE y capacitaciones del personal involucrado. El objetivo de este proyecto es brindar asesoramiento técnico sobre políticas, operaciones, legislación, tecnología y conciencia sobre el manejo de los desechos eléctricos y electrónicos en general. Esto ayudará a fortalecer las políticas medioambientales y la capacitación de personal calificado para el manejo de RAEE, así como también concientizar a nivel nacional en cada uno de los países involucrados [25,27].

En Argentina no existe una regulación nacional específica que rija el manejo de los RAEE, sólo hay algunas leyes provinciales que no tienen una completa coincidencia entre sí. En algunas provincias se los considera residuos peligrosos y en otras no, dificultando el tránsito, gestión y manejo de los RAEE en el país. La ley provincial más abarcativa es la N° 14321 de la Provincia de Buenos Aires. Esta ley aún está en proceso de implementación, debido a la baja prioridad relativa dada, por la falta de concientización del impacto de los RAEE sobre el medio ambiente [29]. La misma trata de incorporar regulaciones acordes a las

existentes en la Unión Europea, en concordancia con el Convenio de Basilea y leyes nacionales de manejo de residuos sólidos urbanos y peligrosos. Por otra parte, en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, está vigente la Ley N° 2807 que establece medidas para posibilitar una gestión sostenible de los aparatos electrónicos en desuso pertenecientes a organismos públicos y que hayan sido objeto de baja patrimonial. Sin embargo, no establece regulaciones respecto de los RAEE. Claramente en Argentina los marcos regulatorios cambian según el ámbito de aplicación, lo que genera dificultades en el manejo sostenible de los RAEE en general y de sus componentes plásticos en particular. Esta heterogeneidad en las regulaciones impide la generación de programas institucionales que tengan el claro objetivo de fomentar una correcta y masiva gestión de los RAEE con su consecuente acumulación y/o envío a una costosa y no sostenible disposición final [30].

## **2. Gestión de los Plásticos RAEE**

### **2.1. Estado actual y perspectivas**

La creciente y continua acumulación de los RAEE ha generado un desafío para su gestión que aún no ha sido resuelto ni siquiera en los países desarrollados. En el mundo, el total de RAEE generado en 2016 fue de 44,7 Mt lo que equivale, en promedio, a 6,1 kg por habitante. Por otra parte, en el 2018, el total la cantidad alcanzó las 49,8 Mt. Asia es el principal productor (38 % del total), seguido por América y Europa, con aproximadamente el 28 % cada uno. Es claro que la contribución más importante está directamente relacionada con el consumo y la cantidad de población, en ese orden. Asia es el mayor contribuyente en la generación de RAEE, en 2016 generó 18,2 Mt. El segundo lugar lo ocupa América con 11,7 Mt generadas en 2016, de las cuales 7,1 corresponden a Estados Unidos, con una cantidad relativa de 22,1 kg por habitante. Particularmente, Argentina produjo 0,37 Mt de e-waste con una tasa de 8,3 kg por habitante en 2016, y para el 2018 alcanzó las 0,41 Mt con 9,0 kg por habitante, aprox. [8,9,26]. Es importante destacar que la cantidad de e-scrap que se encuentra cuantificada corresponde sólo a un porcentaje del total generado, por falta de relevamiento. Esto se debe a que las medidas regulatorias existentes aún no son masivas, por lo que muchos países no tienen buenas estadísticas de lo que generan. Además, el mercado informal e ilegal de manejo de estos residuos también contribuye a la falta de información cuantitativa y estadística.

Los RAEE, por su composición, si se gestionasen adecuadamente podrían ser considerados como una *mina urbana*. La basura electrónica puede proveer gran cantidad de recursos a partir de su reciclado y/o reutilización para remanufacturación. A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se presenta una estimación mundial de la cantidad y tipo de materiales contenidos en los RAEE generados en 2016. El concepto de mina urbana queda ilustrado con estos datos y cuando se estima el *valor presunto* de cada material contenido en los RAEE, queda claro la importancia económica del recurso, si se gestionase adecuadamente. El valor presunto se calcula como el valor de cada material si pudiese ser usado como tal y estuviese completamente separado del resto de los residuos. Según esta estimación, el aprovechamiento adecuado de los materiales que componen los RAEE en 2016,

hubiese podido generar hasta un total de 55000 millones de euros. Cabe destacar que sobre el total de RAEE el 6 % son potencialmente peligrosos y deben disponerse como tal; la cantidad mundial en el 2016 se estima que fue 2,5 Kt [8,18].

**Tabla 1 Materiales reutilizables de los RAEE, cantidades y valor asociado estimados en base a lo generado mundialmente en 2016 [8].**

Componente	Cantidad (Kt)	Valor Asociado (Millones de €)
<b>METALES</b>		
Acero, Hierro	16283	3582
Cobre	2164	9524
Aluminio	2472	3585
<b>METALES PRECIOSOS</b>		
Oro	0,5	18840
Plata	1.6	884
Paladio	0,2	3369
<b>PLASTICOS</b>		
ABS, HIPS, PC, otros	12230	15043

Con el fin de poder aprovechar al máximo los recursos de esta *mina urbana* se plantea el concepto de economía circular que engloba en un sistema cerrado a las interacciones entre economía y medio ambiente. La economía circular asume que los residuos son un recurso que debe ser considerado dentro del ciclo de vida de los AEE, cerrando el círculo de las interacciones antes mencionadas. En tal sentido, acciones como las que genera el *IEEE Standard 1608* están completamente alineadas con esta tendencia. A su vez, las normativas europeas que promueven el reúso, reparación, redistribución, reacondicionamiento y remanufactura de los AEE, previo al reciclado de los materiales que componen los RAEE, contribuyen al mismo objetivo [1,19].

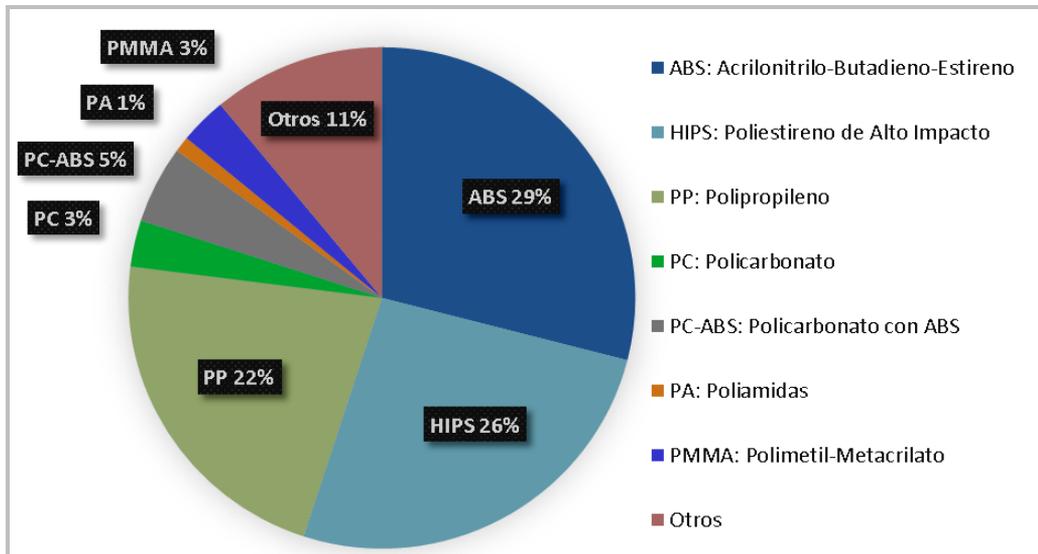
Claramente es necesario incrementar esta tendencia tanto en normativas internacionales como en el diseño integral de los AEE, para facilitar la separación de sus partes (pantalla, carcasa, componentes electrónicos, baterías, etc.) y, a su vez, promover el diseño de componentes electrónicos de sencillo desamblaje. De esta manera se contribuiría a la economía circular y consecuentemente a la reducción del pasivo ambiental, mediante el aprovechamiento y agregado de valor de los materiales provenientes de RAEE, dado que bajarían los costos de separación y desamblaje.

Es importante destacar que, dentro de los RAEE, considerando las cantidades relativas, los plásticos son los materiales que poseen el mayor valor luego del oro (Tabla 1.). Esto los hace muy atractivos para su aprovechamiento. A su vez, los plásticos, debido tanto a su baja densidad, como a su forma y cantidad

relativa usada en los AEE producen gran volumen de residuo, lo que hace que encontrar alternativas para su gestión sostenibles sea indispensable. Diversos estudios muestran que la opción más sostenible es el reciclado por reprocesado, considerando la recuperación de energía como una opción complementaria. En cualquier caso, es necesario minimizar la cantidad de plásticos RAEE a disponer en relleno sanitario [12].

## 2.2. Gestión sostenible de plásticos RAEE

Los RAEE contienen aproximadamente un 18 % en peso de plásticos lo que, en 2016, representó 8,1 Mt y se prevé que se haya incrementado a 8,9 Mt al finalizar 2018 [8]. Esto representa un 30% en volumen, siendo el tipo de residuo más inocuo dentro de los RAEE y con más posibilidades de ser gestionado en forma sostenible. Las resinas que forman parte de los plásticos RAEE son mayoritariamente complejos copolímeros termoplásticos completamente reciclables por reprocesado. En la Fig. 1. se presenta la composición media de los plásticos RAEE [31,32]. El proceso de separación de estas resinas es complejo porque son químicamente muy similares. Por esta razón los sistemas automatizados tienen gran error [33-36]. Consecuentemente, el proceso de separación de los plásticos provenientes de RAEE se realiza en forma manual.



**Fig. 1.** Composición media de los plásticos RAEE [31,32].

Para ello es necesario contar con personal muy entrenado y, aun así, no es posible garantizar una completa separación, dado que se hace principalmente por colores y proveniencia, con la consecuente fluctuación de calidad. Esto implica, además, mayor riesgo laboral para el personal y mayores costos para los recicladores. Se plantea así que, desde el punto de vista de la separación, la alternativa más viable y sostenible es reciclar las resinas mezcladas. Sin embargo, el reciclado de estas resinas mezcladas implica un gran desafío científico y tecnológico, dado que las mismas son complejas e inmiscibles por lo que, si se

mezclan en fundido, al enfriarse separan en fases generando un material con pobres propiedades mecánicas y por ende bajo valor [37].

El desafío es conseguir una adecuada compatibilización de estas mezclas, es decir incrementar la adhesión entre fases, estabilizando la morfología y bajando la tensión interfacial. Eso puede conseguirse por acción de un tercer componente que actúe como compatibilizante, ya sea agregándolo a la mezcla (compatibilización por adición) o generándolo por reacción in-situ (compatibilización reactiva). En cualquier caso, el compatibilizante debe ser afín a las resinas que componen la mezcla, es decir debe actuar como nexo o unión entre ellas (efecto surfactante). La compatibilización reactiva es mucho más eficiente dado que el compatibilizante se genera directamente en la interface. Sin embargo, este tipo de proceso involucra reacciones químicas en fundido que pueden ser interferidas por impurezas y/o suciedad. Esto limita su aplicación en el reciclado de resinas mezcladas provenientes de residuos, dónde la pureza de los reactivos y su limpieza no necesariamente son buenas. La adición de un tercer componente durante el mezclado en fundido, si bien es relativamente más ineficiente por problemas difusionales, es la más usada en reciclado, por la sencillez operativa [38]. A su vez, si los componentes de la mezcla poseen segmentos comunes, estos podrían actuar como pseudo-compatibilizantes en un determinado rango de concentraciones relativas. En estos casos, con un proceso adecuado puede conseguirse la *auto-compatibilización* [37].

La complejidad de los plásticos RAEE llevó a que los primeros estudios de compatibilización de sus mezclas se hicieran sobre materiales vírgenes, de modo tal de acotar las variables y extrapolar esos resultados a residuos reales [39,40]. Sin embargo, como se discute más adelante, estos resultados no son directamente extrapolables a resinas RAEE reales. Este tipo de acercamiento al problema asume que los plásticos utilizados en la industria son sólo las resinas vírgenes aditivadas para el proceso de fabricación de los AEE. La mayoría de los trabajos se llevaron a cabo sobre mezclas de ABS y HIPS dado que son mayoritarios dentro de los plásticos RAEE y además son los que normalmente se confunden durante la separación por tipo [39]. Cabe destacar que el ABS es un copolímero que contiene bloques de acrilonitrilo (AN), butadieno (Bu) y estireno (St), en tanto que el HIPS es un copolímero que contiene St y Bu. El mezclado en fundido de estos copolímeros ha sido analizado mostrando que la morfología de la mezcla se vuelve aún más compleja con segregación de fases y generación de burbujas durante el reprocesado [42-44]. Particularmente, Arnold et al. [45] postularon que la segregación de fases depende de la cantidad relativa de AN, St y Bu para cada copolímero, más allá de la proporción relativa de HIPS/ABS en la mezcla. A su vez se ha reportado que las propiedades mecánicas de dichas mezclas son altamente dependientes de la cantidad de fase Bu [39]. Este análisis induce a pensar que la fase Bu, podría actuar como agente de unión generando una mezcla auto-compatibilizada [38]. Respecto de la compatibilización por adición, existen relativamente pocos estudios aplicados a mezclas de HIPS/ABS.

Rasero et al. [46] utilizan Estireno-Etileno-Butileno-Estireno (SEBS) como posible compatibilizante de mezclas de HIPS/ABS vírgenes, obteniendo

mezclas con mayor ductilidad y menor resistencia mecánica a la tracción, respecto de las mezclas físicas. Es importante aclarar que se considera a una mezcla física, al mezclado directo de los materiales sin el agregado de un agente compatibilizante.

Brennan et al. [47] trabajaron con plásticos RAEE provenientes de computadoras y postularon que, en las mezclas de HIPS/ABS donde uno de los dos materiales es mayoritario, se genera una mejora en las propiedades finales de la misma, coincidiendo con la posibilidad de que se genere auto-compatibilización. Sin embargo, este estudio está limitado a residuos de un sólo tipo de AEE, las computadoras. La auto-compatibilización de estas resinas también fue estudiada como paliativo a la dificultad de separación en concentraciones de hasta 90/10 y 10/90 de HIPS/ABS. Los resultados preliminares obtenidos son muy buenos, sugiriendo que debe estudiarse este comportamiento en detalle para determinar hasta qué cantidades de ABS puede tolerar el HIPS (y viceversa) sin sufrir deterioro en sus propiedades [41].

Los resultados obtenidos sobre resinas vírgenes no son directamente aplicables a los plásticos RAEE ya que los mismos contienen cargas minerales y aditivos, a medida de los requerimientos de cada AEE [46]. La cantidad de cargas y aditivos varía llegando a valores de hasta el 15 % en peso, dependiendo del uso para el que fueron diseñados los AEE. Las cargas típicas que adicionan para aumentar la rigidez son carbonato de calcio, talco y sílice, en tanto que el negro de humo se adiciona como colorante, el óxido de titanio como antioxidante y/o para brindar el color blanco grisáceo. Además, se incluyen otros aditivos como retardantes de llama [32,42,49,50]. Por lo tanto, las mezclas de HIPS/ABS deben ser consideradas un *material compuesto* con cada uno de los copolímeros como matriz y distintas cargas como relleno. Esto determina que el comportamiento durante el mezclado sea mucho más complejo, dado que las cargas y aditivos interaccionan entre sí. A su vez, esta interacción afecta la morfología final de la mezcla respecto de la separación y/o aglomeración de las fases que resultan claramente distintas a las de las resinas vírgenes.

Las variaciones en el comportamiento mecánico ABS virgen por la adición de un 7,5 % en peso de grafito fue puesta de manifiesto por Ben Difallah et al. [51]. Estudios de HIPS y ABS provenientes de residuos reales muestran que la cantidad de cargas en los mismo llega hasta un 9 % [49]. Estos estudios muestran también que la variación en el comportamiento mecánico se hace mucho más crítica cuando se trabaja con mezclas de ABS y HIPS provenientes de RAEE.

Por otra parte, se determinó que la auto-compatibilización de residuos reales es posible dado que el ABS RAEE puede admitir hasta un 50 % en peso de HIPS RAEE, conservando sus propiedades mecánicas de flexión y hasta en algún caso mejorándolas. En tanto que el HIPS RAEE admite hasta un 20 % de ABS RAEE sin sufrir deterioro mecánico [52-53]. Este resultado es directamente extrapolable al reciclado de residuos, permitiendo un mayor margen de error en la separación por tipo y, consecuentemente, el reemplazo directo del ABS RAEE y HIPS RAEE por mezclas de ellos.

A su vez, los trabajos que analizan el uso del agregado de compatibilizantes sobre mezclas de HIPS y ABS reales muestran que los resultados dependen tanto de la cantidad relativa de HIPS y ABS en la mezcla como del tipo y cantidad de compatibilizante agregado. En mezclas donde el HIPS RAEE es mayoritario, el uso de copolímeros de Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) como compatibilizante es adecuado sólo a concentraciones del orden del 20 % en peso, lo que lo inhabilita para ser usado en sistemas de reciclado real, dado que usar 20 % de material virgen sobre residuos no es económicamente viable [46]. Por otra parte, con el agregado de sólo un 2 % en peso de copolímeros de Estireno-Butadieno (SBR) a mezclas con mayor contenido de ABS RAEE se consiguieron excelentes resultados de compatibilización, la resistencia mecánica se duplica respecto de la mezcla física [50]. El resultado es altamente promisorio porque permite obtener un material con propiedades muy mejoradas usando una muy pequeña cantidad de compatibilizante.

Actualmente, los plásticos RAEE recuperados se emplean en la fabricación de distintos objetos tales como: cajas para derivaciones eléctricas, toma corrientes y sus correspondientes tapas, carcasas traseras de ópticas automovilísticas, luminarias para equipamiento urbano, entre otras [54]. Sin embargo, su uso más sostenible (y el que más se incentiva en todo el mundo) es la producción de carcasas para nuevos artículos electrónicos, principalmente los de consumo masivo como los celulares y computadoras [55]. En todos los casos, el comportamiento mecánico es la clave. Por esta razón, la obtención de materiales reciclados con propiedades análogas, o mejores, a los plásticos RAEE por separado resulta una solución sostenible adecuada a los requerimientos de la economía circular.

## CONCLUSIONES

Los sistemas de gestión integral y sostenible para los RAEE en general y los plásticos RAEE en particular están en pleno desarrollo. A pesar de las regulaciones existentes y las que se encuentran en proceso, todavía existen problemáticas asociadas al manejo de este tipo de residuos. Estas problemáticas implican aspectos sociales, económicos, políticos, técnicos y ambientales. Optimizar la separación de los materiales que componen un AEE es clave para poder mejorar y/o encontrar metodologías de reúso y/o reciclado de las partes, contribuyendo a la economía circular y, consecuentemente fomentar la gestión sostenible de RAEE.

Para el caso particular de los plásticos, la gestión se dificulta por la complejidad de la separación de estos materiales por tipo. El reciclado de las resinas RAEE mezcladas es la forma de gestión sostenible más conveniente no sólo desde el punto de vista económico sino también desde la sencillez operativa y seguridad laboral. Los avances en el desarrollo de nuevos materiales a partir de plásticos RAEE mezclados son altamente promisorios, ya que los resultados indican la posibilidad de reemplazo directo de las resinas RAEE por sus mezclas con bajo costo de compatibilización. En algunos casos las propiedades finales de las mezclas son mejoradas, pudiendo ampliarse el rango de aplicación de estos materiales, que

actualmente se prioriza en la fabricación de carcasas de equipos electrónicos masivos. Sin embargo, queda aún mucho camino por recorrer en pos de incrementar el valor agregado de las mezclas de plásticos RAEE reales, lo que hace que el desafío por obtener sistemas de compatibilización aplicables a múltiples resinas continúe.

## REFERENCIAS

- [1] European Union. Directive 2012/19/EC of the European Parliament and of The Council of 27 January 2013 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast). *Off. J. Eur. Union*, **197**, 38 (2012)
- [2] J. Namias, *The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions*, Department of Earth and Environmental Engineering, Columbia University, USA, 2013.
- [3] Statista 2018 <https://www.statista.com/statistics/274774/forecast-of-mobile-phone-users-worldwide/>. Último acceso: Abril 2018.
- [4] Statista 2018 <https://www.statista.com/statistics/244980/number-of-mobile-phone-user-in-argentina-since-2010/>. Último acceso: Abril 2018.
- [5] eMarketer 2017 <http://www.emarketer.com/Chart/Smartphone-Users-Penetration-Argentina-2016-2021-millions-of-population/206639>. Último acceso: Junio 2018.
- [6] Statista 2016 <http://www.statista.com/statistics/270793/disposal-of-used-mobile-phones/>. Último acceso: Diciembre 2016.
- [7] Statista 2016 <http://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>. Último acceso: Diciembre 2016.
- [8] C.P. Baldé, V. Forti, V. Grat, R. Kuehr & P. Stegmann, *The global e-waste monitor – 2016*, United Nations University. IAS-SCYCLE, Alemania, 2017.
- [9] T. Banerjee, R.K. Srivastava & Y. Hung, *Handbook of Environmental and Waste Management*, Vol. 2, Cap. 17, 2014.
- [10] J. Baxter, M. Wahlstrom, M.Z. Castell-Rüdenhausen, A. Frâne, M. Stare, S. Løkke & M. Pizzo, *Plastic Value Chains – Case: WEEE (Waste Electric and Electronic Equipment) in the Nordic Region*, Nordic Council of Ministers, TemaNord, Dinamarca, 2014.
- [11] J. Baxter, M. Wahlstrom, M.Z. Castell-Rüdenhausen & A. Frâne, *Plastic Value Chains – Case: WEEE (Waste Electric and Electronic Equipment) in the Nordic Region, Part II*, Nordic Council of Ministers, TemaNord, Dinamarca, 2015.
- [12] PlasticEurope – Association of Plastics Manufacturers *An analysis of European plastics production, demand and waste data*, 2018.
- [13] D.W. Pearce & R.K. Turner, *Economics of natural resources and the environment*, JHU Press, 1990.
- [14] F.O. Ongondo, I.D. Williams & T.J. Cherrett, *Waste Manag.* **31**, 714 (2011).
- [15] IEEE Standard 1608 Section 4, *Environmental performance criteria for desktop personal computers, notebook personal computers and personal computer monitors*, USA, 2006.
- [16] M. Goosey, *Circuit World*, **30**(2), 41 (2004).
- [17] R. Widmer, H. Oswald-Krapf, D. Sinha-Khetriwal, M. Schnellmann &

- H.Böni, *Environ. Impact Asses.* **25**(5), 436 (2005).
- [18] C.P. Baldé, F. Wang, R. Kuehr & J. Huisman, *The global e-waste monitor – 2014*, United Nations University. IAS-SCYCLE, Alemania, 2015.
- [19] European Union. Directive 2011/65/EC of the European Parliament and of the Council of 8 June 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (recast), RoHS 2. *Off. J. Eur. Union*, **174**, 88 (2011).
- [20] C. Hicks, R. Dietmar & M. Eugster, *Environ. Impact Asses.* **25**(5), 459 (2005).
- [21] GAO, United States Government Accountability Office, 2005. ELECTRONIC WASTE Strengthening the Role of the Federal Government in Encouraging Recycling and Reuse. <https://www.gao.gov/assets/250/248752.pdf>
- [22] T. Wagner, *Waste Manage.* **29**(12), 3014 (2009).
- [23] P. Bohr, *J. Empir. Res. Hum. Res.* **2**(4) (2007).
- [24] Electronics Takeback Coalition (2010).  
<http://www.electronicstakeback.com/promote-good-laws/state-legislation/>.  
Último acceso: Junio 2018.
- [25] IEEE Standards, <https://standards.ieee.org>, Último acceso: Junio 2018.
- [26] F. Magalini, R. Kuehr & C.P. Baldé, *eWaste in Latin America*, United Nations University, ONU-IAS, Japón, 2015.
- [27] UNIDO <https://open.unido.org/projects/M4/projects/140297>. Último acceso: Diciembre 2018.
- [28] UNIDO <https://www.unido.org/news/scaling-unidos-e-waste-management-cooperation-latin-america-enhancing-proper-disposal-pops>. Último acceso: Agosto 2018.
- [29] Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, *Ley Provincial N° 14321: Gestión Sustentable de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*, (2011).
- [30] S. Guzmán, D. Torres, R. Kuehr, F. Magalini, L. Devia, A. Cueva, E. Herbeck, M- Kern, S. Rovira, M.N. Bruné Drisse, A.S. da Silva, A. Pascale, A. Laborde, I. Kitsara, G.C. De Souza Godoi & I. Rivero Basiniani, *Gestión sostenible de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en América Latina*, Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2016.
- [31] G. Martinho, A. Pires, L. Saraiva & R. Ribeiro, *Waste Manage.* **32**, 1213 (2012).
- [32] E. Maris, P. Botané, P. Wavrer, & D. Froelich, *Mineral Eng.* **76**, 28 (2015).
- [33] D. Ceballos, L. Chen, E. Page, A. Echt, A. Oza & J. Ramsey, *Health Hazard Evaluation Report: Evaluation of Occupational Exposures at an Electronic Scrap Recycling Facility*. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, Ohio, NIOSH, USA, 2014.
- [34] D. Arends, M. Schlummer, A. Mäurer, J. Markowski & U. Wagenknecht, *Waste Manage. Res.* **33**(9), 775 (2015).
- [35] WRAP, *Separation of mixed WEEE plastics final report (WRAP Project MDD018 and MDD023)*, Report prepared by Axion Consulting, 2009.
- [36] S. Tall. *Recycling of mixed plastic waste*, Doctoral dissertation, Department of Polymer Technology, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2000.
- [37] L.A. Utracki & B.D. Favis, *Polymer alloys and blends*, Hanser, Munich, 1989.
- [38] L.A. Utracki, *Can. J. Chem. Eng.* **80**, 1008 (2002).

- [39] C.B. Bucknall, F.P. Frederic, F.F.P. Cote & I.K. Partridge, *J. Mat. Sci.* **21**, 301 (1986).
- [40] P.A. Tarantili, A.N. Mitsakaki & M.A Petoussi, *Polym. Deg. Stabil.* **95**, 405 (2010).
- [41] D. Perrin, O. Mantaux, P. Ienny, R. Léger, M. Dumon & J.M. Lopez-Cuesta, *Waste Manage.* **56**, 438 (2016).
- [42] J.C. Arnold, S. Alston & A. Holder, *Polym. Degrad. Stabil.* **94**(4), 693 (2009).
- [43] J. Brandrup, M. Bittner, W. Michaeli & G. Menges, *Recycling and recovery of plastics*, Hanser, Munich, 1998.
- [44] W. Hoyle & D.R. Karsa, *Chemical aspects of plastics recycling*, American Chemical Society, 1997.
- [45] J.C. Arnold, T. Watson, S. Alston, M. Carnie & C. Glover, *Polym. Test.* **29**, 459 (2010).
- [46] M.A. Peydro Rasero, D. Juárez Varón, S. Sánchez Caballero & F. Parres, *Ann. Oradea Univ.* **22**, 269 (2013).
- [47] L.B. Brennan, D.H. Isaac & J.C. Arnold, *J. Appl. Polym. Sci.* **86**, 572 (2002).
- [48] Y.V. Vazquez & S.E. Barbosa, *J. Polym. Environ.* **25**(3), 903 (2017).
- [49] Y.V. Vazquez & S.E. Barbosa, *Waste Manage.* **53**, 196 (2016)
- [50] Y.V. Vazquez & S.E. Barbosa, *J. Environ. Manage.* **217**, 381 (2018).
- [51] B. Ben Difallah, M. Kharrat, M. Dammak & G. Monteil, *Mater. Des.* **34**, 782 (2012).
- [52] Y.V. Vazquez & S.E. Barbosa, *Waste Manage.* **59**, 403 (2017).
- [53] Y.V. Vazquez & S.E. Barbosa, *Detritus*, **2**, 105 (2018).
- [54] W. Mills & R.A. Tatara, *Challenges*, **7**(1), 13, (2016).
- [55] K. Maummer, Current WEEE recycling solutions, en *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, F. Vegliò & I. Birloaga (Eds.), Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Elsevier, 2018, pp. 33-93.

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS PARA VIVIENDAS SOCIALES Y ECOLÓGICAS ELABORADOS CON PLÁSTICOS RECICLADOS

*Rosana Gaggino\*, Jerónimo Kreiker, Lucas Peisino,  
María Paz Sanchez Amono, Julián Gonzalez Laría, Melina Gómez*

Centro Experimental de la Vivienda Económica – CEVE, dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET, y de la Asociación Vivienda Económica – AVE  
E-mail: rgaggino@ceve.org.ar

### Resumen

En la industria de la construcción se utilizan sistemas o componentes constructivos elaborados con materiales no renovables (por ejemplo: arena, piedra, metales, cemento) o de difícil renovación (por ejemplo: suelo y madera). Esta industria continúa en crecimiento y a pesar de los esfuerzos por frenar el consumo desmedido de material virgen, sigue consumiendo los recursos naturales del planeta, junto con otras actividades humanas extractivas.

Con la premisa de reducir el consumo de recursos naturales no renovables, en el Centro Experimental de la Vivienda Económica -CEVE- se han desarrollado diferentes investigaciones que proponen el reciclado de residuos urbanos e industriales para la elaboración de componentes constructivos ecológicos destinados a la construcción de viviendas sociales y construcciones civiles en general.

Las tecnologías desarrolladas son especialmente aptas para emprendimientos de municipios que tienen organizada la recolección diferenciada de residuos o que están en vías de implementar sistemas de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos -GIRSU, para tratar sus desechos.

La implementación de estas tecnologías aporta ventajas económicas, ambientales, sociales y educativas que se reflejan en ahorro de recursos del estado, compromiso de la sociedad y mayor conciencia de la población.

En este capítulo se describen los principales componentes y materiales desarrollados en el CEVE. También se presentan los casos exitosos de transferencia de la tecnología a diferentes adoptantes que han podido concretar emprendimientos productivos reciclando los residuos de su entorno.

*Palabras clave:* elementos constructivos, ecología, materiales reciclados, vivienda social, sustentabilidad

## Abstract

**Building components for social and ecological houses manufactured with recycled plastics.** The construction industry uses systems or building components manufactured with non-renewable materials (for example: sand, stones, metals, cement) or difficult renewable materials (for example: soil, wood). Despite international efforts to diminish the wasteful consumption of virgin materials, the construction industry continues growing and consuming the natural resources of the planet, similarly to other extractives human activities.

With the objective of reducing the consumption of non-renewable natural resources, the Experimental Center of the Economical Housing –CEVE– has developed different research works to recycle urban and industrial wastes. These wastes were used in the production of ecological components intended for the construction of social housing and civil construction in general.

The technologies developed are especially suitable for projects of local governments that have implemented the separate collection of waste or are planning to implement systems to treat their wastes.

The local governments that start up this type of productive projects have economic, environmental, social and educational advantages that are reflected in the savings of state resources, society commitment and greater awareness of the population.

This chapter describes the main components and materials developed in the CEVE. Successful cases of technology transfer to different adopters who were able to develop productive favorable activities by recycling waste from their communities are presented here as well.

*Keywords:* building elements, ecology, recycled materials, social houses, sustainability

## INTRODUCCIÓN

La construcción de viviendas y obras civiles está catalogada como una actividad que produce impactos negativos al ambiente. En efecto, hace uso de recursos naturales, consume energía proveniente de combustibles fósiles, y genera emisiones contaminantes y residuos.

En el campo de la arquitectura y la construcción es muy reciente el uso de materiales reciclados; con ellos se han desarrollado las tecnologías que se presentan en este trabajo.

En el siglo pasado surge en el mundo el concepto de Construcción Sustentable, con la preocupación ecologista de posibilitar que las generaciones futuras no se vean perjudicadas por la actividad constructora del hábitat humano:

*“La construcción sustentable se dirige hacia una reducción de los impactos ambientales causados por los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios y por el ambiente urbanizado” [1].*

El CEVE es un instituto de investigación y desarrollo tecnológico dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Asociación de Vivienda Económica (AVE). Fue creado en 1967 para brindar soluciones tecnológicas en el campo del hábitat social y popular. En las dos últimas décadas, el CEVE ha adherido a los principios de la Construcción Sustentable y, en tal sentido, en el Área de Nuevos Materiales y Sustentabilidad se han desarrollado nuevos materiales y componentes constructivos en base a residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos industriales (RI). En el área se llevan adelante desarrollos que pretenden instalarse como una alternativa para el sector de la construcción. El objetivo planteado es obtener productos amigables con el medio ambiente, técnicamente aptos para la construcción de viviendas, y de costo competitivo respecto de productos similares en el mercado.

Las cantidades disponibles de residuos reciclables son importantes. Según datos del Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación, la Argentina produce casi 14 millones de t de basura por año, y la tasa de recuperación es del orden del 10 %, lo que propone un campo enorme de acción en temas de reciclado. El resto de estos desechos se entierran o disponen inadecuadamente en vertederos de basura, produciendo contaminación [2].

Según datos del Ministerio de Ambiente y Espacio Público del Gobierno de la ciudad de Buenos Aires, los residuos plásticos constituyen el 13 % del total del peso de residuos, que equivale al 30 % en volumen [3]. Además, son materiales de escasa o nula bio-degradabilidad, por lo que la naturaleza no puede absorberlos como a otros residuos. La Fig. 1 muestra la distribución porcentual en peso, en base a su composición. Este gráfico fue realizado por los autores, con información obtenida de publicaciones periódicas de la Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado, (CEAMSE), Argentina, año 2017.

Los residuos plásticos que se reciclan para diferentes aplicaciones, proceden de la recolección diferenciada de residuos urbanos, que se ha implementado en numerosos municipios de nuestro país. En estos municipios se han realizado campañas de concientización de la población y, como resultado de ellas, se separan los residuos (cartón y papeles, plásticos, botellas de vidrio, latas, etc.) en diferentes contenedores, facilitando de esta manera su reciclado. Los principales lugares de recolección son puntos limpios en escuelas, dispensarios, clubes, entidades civiles y otros emplazamientos comunes. En los municipios más avanzados en el proceso de recolección diferenciada, también se hace la separación en los hogares, utilizando bolsas de distintos colores, que son retiradas por camiones recolectores en días especialmente fijados.

## RELACION % DE RESIDUOS PLASTICOS

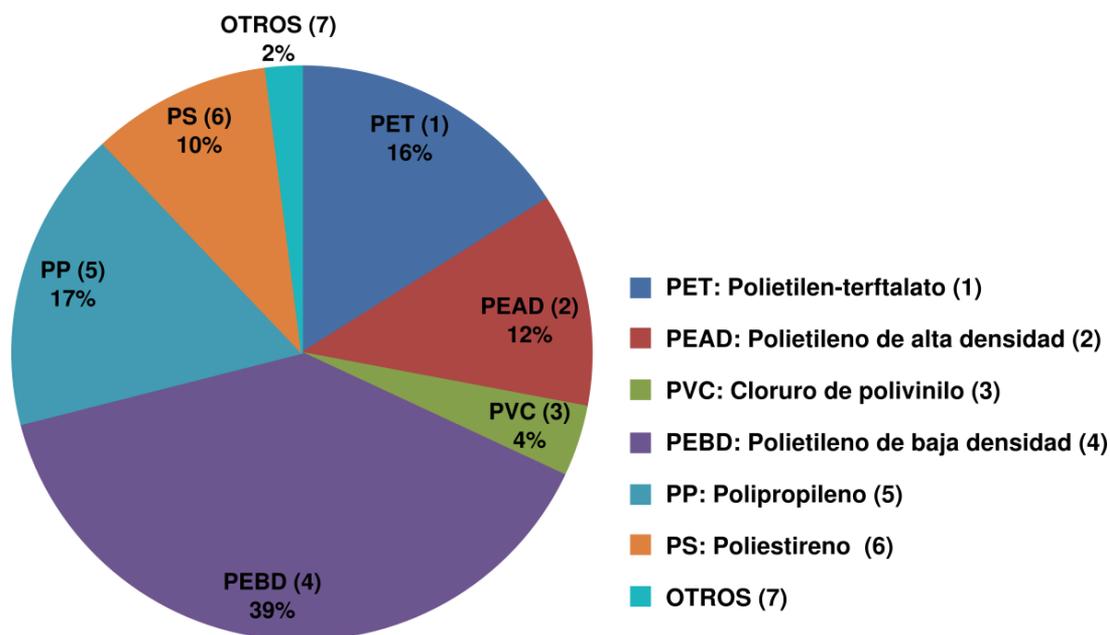


Fig. 1. Composición porcentual en peso de distintos plásticos en los residuos

Una ventaja de los materiales plásticos es que pueden ser reciclados mediante procesos tanto químicos como físicos. En los primeros, las cadenas poliméricas se rompen mediante reacciones químicas, generando así un proceso de despolimerización. Se obtienen oligómeros y monómeros constituyentes del plástico de partida, que son utilizados para elaborar nuevamente plástico o como insumos en otras áreas de la industria química [4].

Por otra parte, existen principalmente dos metodologías de reciclado físico. Una es mediante la termo-fusión y obtención del material plástico original con propiedades equivalentes o similares. La otra es mediante el triturado, mezclado con otro material, con el fin de obtener un nuevo material compuesto con propiedades y aplicaciones diferentes a las del plástico. Una de las matrices más estudiadas ha sido la de cemento [5].

En comparación, el reciclado físico es menos costoso, pero se obtiene un producto final de menor calidad.

En este trabajo se presentan ejemplos de reciclaje de diferentes tipos de plásticos empleando la última metodología descripta. Se utilizan diferentes matrices (polímeros, cemento, arcillas, etc.) con el fin de desarrollar materiales compuestos para la elaboración de nuevos componentes constructivos. Más detalles de estos desarrollos se encuentran en las publicaciones citadas [6-10].

## **1. Componentes constructivos con polietilen-tereftalato (PET) reciclado**

### **1.1. Residuo utilizado como materia prima**

Las botellas de polietilen-tereftalato (PET) tardan más de 500 años en descomponerse, y duran más si están enterradas y protegidas de los rayos ultravioletas-visibles y de las condiciones ambientales. Se estima que en la Argentina se producen y se descartan actualmente unas 200.000 t anuales de envases PET, de los cuales se recicla sólo el 10%. Los principales problemas que acarrea la disposición inadecuada del PET en enterramientos sanitarios son la barrera física que producen, la desestabilización del suelo y el volumen de enterramiento. No es en sí la contaminación química que produce este polímero, ya que ésta es mínima.

### **1.2. Proceso de fabricación**

Con este proceso de fabricación se han obtenido ladrillos, bloques para muro y bloques para losa.

Materias primas: cemento Portland común; polietilen-tereftalato (PET) procedente de envases descartables de bebidas; aditivos para mejorar la adherencia de las partículas plásticas al cemento y el fraguado; agua de red (relación agua/cemento = 0,5).

Equipamiento: molino triturador de plásticos; hormigonera, máquina para moldeo de componentes (bloquera), con molde intercambiable para ladrillos o bloques.

Procedimiento: el proceso comprende el triturado de las botellas a partículas de 2-3 mm, (Fig. 2a y 2b). Son necesarias entre 20 y 25 botellas grandes para hacer un ladrillo. El PET triturado es mezclado con el cemento, agua y aditivos, (Fig. 2c). Luego, se procede al moldeo de los componentes, mediante compactación por golpes, para ladrillos y bloques para muro y por vibración para bloques de losa, (Fig. 2d). Los componentes se ubican sobre una pista de cemento alisado, en la cual permanecen durante 24 horas, (Fig. 2e). Continúa el curado durante 28 días con agua, por rociado o sumergido en batea, para asegurar el correcto fraguado, (Fig. 2f).

Los ladrillos, bloques de losa y bloques para muro se muestran en la Fig. 3a, 3b y 3c, respectivamente.



Fig. 2. Proceso de moldeo de ladrillos de PET



Fig. 3. Componentes fabricados con PET reciclado

### 1.3. Propiedades técnicas de los componentes

En la Tabla 1 se muestran las principales propiedades técnicas.

Tabla 1. Propiedades técnicas de componentes fabricados con PET reciclado

Propiedad técnica	Ladrillo	Bloque de losa	Bloque de muro
Dimensiones (cm)	5,5x12,5x26,2	13,0x39,7x18,5	20,0x20,5x40,0
Peso (kg)	1,4	5,6	6,2
Peso específico(kg/m <sup>3</sup> )	1150	1385,6	1220
Absorción de agua (% en peso)	19,1	9	15,96
Absorción de agua en volumen (kg/m <sup>3</sup> )	214	No determinado	188,6
Resistencia a la compresión (MPa)	2,00	No determinado	1,02
Resistencia a la flexión (DaN)	No determinado	211,1	No determinado

Estos componentes cuentan con el Certificado de Aptitud Técnica (CAT) expedido por la Subsecretaría de Vivienda y Desarrollo Urbano de la Nación, el cual determina que son aptos para su uso en construcciones civiles como componentes no portantes. Cuentan con una patente nacional otorgada en el año 2008 [11].

#### 1.4. Principales ventajas técnicas

Se destaca el mejor comportamiento térmico, con respecto a una mampostería de ladrillos comunes de tierra cocida. Un muro de 15 cm de espesor con ladrillos de PET posee la misma aislación térmica que un muro de 30 cm de espesor con ladrillos de barro cocido. Si bien por sus propiedades técnicas el ladrillo de PET satisface la normativa nacional, presenta una menor resistencia a la compresión que el ladrillo tradicional (2 MPa el ladrillo de PET y 4 MPa el ladrillo tradicional). Recientemente se ha logrado una resistencia similar con el agregado de árido fino (arena/polvo de cuarzo).

#### 1.5. Transferencia de la tecnología

Esta tecnología ha sido transferida a diferentes adoptantes del sector público y privado. Algunas experiencias son actualmente muy exitosas, y se han logrado emprendimientos productivos sostenibles, involucrando gobiernos locales.

El emprendimiento más exitoso hasta el momento es el del municipio de Junín de Mendoza. Consiste en una fábrica con capacidad de producción de 10.000 ladrillos mensuales, que en el año 2017 logró certificación ISO 9001. Los ladrillos de PET se utilizan en este municipio para la construcción de viviendas para familias en situación de vulnerabilidad. Se construyó la primera vivienda con esta tecnología en el distrito de Medrano; la misma cuenta con una superficie de 56 m<sup>2</sup> y fue donada a una familia de bajos recursos económicos, (Fig. 4a y 4b). El plan contempla la construcción de más viviendas con esta tecnología.



Fig. 4. a. Vivienda construida con ladrillos de PET en Junín de Mendoza.

b. Detalle del muro con ladrillo de PET.

Otras construcciones realizadas con estos ladrillos son:

- El galpón municipal de la Planta de Recolección Diferenciada de Residuos de la localidad de Unquillo, Córdoba;
- Equipamiento comunitario en la ciudad de Bell Ville, Córdoba;
- Un dispensario municipal en barrio Marqués de Sobremonte, Córdoba Capital;
- Dos viviendas pertenecientes a particulares en Córdoba Capital.

En octubre de 2018, se ha firmado un convenio de licenciamiento de la tecnología entre CONICET y el gobierno de la provincia de Chubut para montar varias plantas de producción de ladrillos de PET, en diferentes ciudades de la provincia.

La producción será destinada a la construcción viviendas y espacios comunitarios.

En enero de 2019 se ha firmado un convenio de licenciamiento de la tecnología entre CONICET y entre la Fundación Ecoinclusión de la ciudad de Alta Gracia, provincia de Córdoba. También se ha firmado un convenio entre esta Fundación y la Municipalidad de Córdoba Capital, para fabricar ladrillos de PET reciclado. Los integrantes de esta Fundación recibieron una capacitación en esta tecnología por parte del CEVE en el año 2016 y actualmente están por construir una planta de producción en un predio donado por la Municipalidad.

## **2. Tableros aglomerados elaborados con residuos de plásticos diversos y resina, para divisorios o para mobiliario**

### **2.2. Residuo utilizado como materia prima**

Este desecho es una mezcla de diferentes tipos de plásticos provenientes de residuos de envoltorios de golosinas. Es un residuo de producción, generado por fallas en el espesor o en el entintado de las láminas. La empresa que donó el material, de la Provincia de Córdoba, tiene una disponibilidad aproximada de 200 t mensuales.

El material está conformado por una mezcla heterogénea y con composición variable de PE (polietileno), BOPP (polipropileno bi-orientado) y PVC (policloruro de vinilo), (Fig. 5).

Este material tiene la ventaja de estar limpio y de no necesitar acondicionamiento de lavado. Sus principales desventajas son la variabilidad en su composición porcentual y la presencia de tinta superficial o polvo de aluminio, que no lo hacen apto para su reutilización mediante fusión-extrusión o reciclaje

químico. La única manera de reciclarlo es mediante su incorporación como carga en una matriz ligante.



**Fig. 5.** Residuos de envoltorios de golosinas

### **2.3. Proceso de fabricación**

Materia prima: films plásticos diversos procedentes de embalajes de alimentos y perfumería, que una vez triturados se usan como agregados, una matriz de resina poliéster (náutica) -polial 340, octoato de cobalto al 2,5 % (acelerador) y peróxido de metilil cetona-perly-ox-101(catalizador).El catalizador permite la reacción de polimerización y el acelerador regula el tiempo de formación del gel en función de la temperatura ambiente. La proporción de la resina con respecto a los agregados plásticos es del 30% del total del peso.

Equipamiento: molino de trituración de plástico con un motor trifásico de 10 HP, 1400 rpm; pistola de pulverización; prensa hidráulica de pie de 40 t; molde de chapa de 46,0 cm de largo x 26,0 cm de ancho x 10,0 cm de altura.

Procedimiento: el plástico es triturado en el molino hasta obtener partículas con una longitud máxima de 3 mm. La resina y el acelerador se colocan en un recipiente de plástico y se mezclan, luego se añade el catalizador y se mezcla nuevamente. Se colocan las partículas de plástico en un mezclador horizontal y se impregnan con esta mezcla utilizando una pistola de pulverización. Luego el material impregnado es transferido al molde, se compacta la mezcla uniformemente durante 24 h con una presión de 40 t y, posteriormente, se retira el panel del molde. Las dimensiones del panel son 46,0 x 26,0 x 1,8 cm., (Fig. 6 a).

### **2.4. Propiedades técnicas del componente**

Dadas las características hidrofóbicas del material de desecho, se buscó desarrollar un material compuesto por el residuo y una resina resistente al agua,

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

para potenciar esta característica y proponer un uso en ambientes húmedos, como por ejemplo en muebles de vanitorys en baños y bajo mesadas en cocinas, (Fig. 6b).



**Fig. 6.** a. Panel de residuos de envoltorios. b. Aplicación en vanitory

Se desarrolló un panel por prensado con resina poliéster para mobiliario. Las principales propiedades técnicas se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Propiedades técnicas de paneles de plásticos reciclados**

Propiedades técnicas	Valor	Norma
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1221,30	IRAM 11561
Absorción de agua (%)	0,46	IRAM 12528
Hinchamiento del espesor (%)	0,00	DIN 68761
Resistencia a la flexión perpendicular a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	7,53	NBR 7190
Resistencia a la tracción paralela a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	25,4	NBR 7190
Resistencia a la tracción perpendicular a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	1,3	NBR 7190
Resistencia a la compresión paralela a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	50,4	NBR 7190
Resistencia a la compresión perpendicular a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	91,2	NBR 7190
Resistencia al corte paralelo a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	25,4	NBR 7190
Resistencia al corte perpendicular a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	18,7	NBR 7190
Módulo de elasticidad paralelo a las fibras (kg/cm <sup>2</sup> )	8461,8	NBR 7190
Resistencia al envejecimiento -rayos UV y humedad.	No resiste	ISO 9933
Resistencia al choque duro	Resiste	IRAM 11595
Resistencia al fuego	Clase RE 4	IRAM 11910-3
Resistencia al desgaste (mm)	0,4	IRAM 1522
Aislación acústica (dB)	33	IRAM 4063
Conductividad Térmica (W/mK)	0,19	ISO 8301

## **2.5. Principales ventajas técnicas**

Como principal ventaja se destaca la posibilidad de uso para mobiliario expuesto a condiciones de humedad, ya que, a diferencia de los aglomerados tradicionales, no sufre deterioro en estas condiciones.

## **2.6. Transferencia de la tecnología**

Esta tecnología aún no ha sido transferida y al momento se encuentra en evaluación a escala piloto.

## **3. Tejas elaboradas con plástico y caucho reciclados**

### **3.1. Residuo utilizado como materia prima**

Se utiliza caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso (NFU). Este desecho pertenece a la categoría “Residuos Especiales de Generación Universal (REGU)” y constituyen una corriente de residuos que, si bien puede considerarse menor (del orden del 1%), genera importantes problemas al momento de su disposición final en rellenos sanitarios. En Argentina se generan más de 120.000 t anuales de este desecho [12] y existe una cantidad incalculable de NFU dispersos y sin contabilizar. En nuestro país, los NFU se acumulan en basurales y enterramientos no controlados, pues resulta muy difícil y costoso su reciclado.

El problema de estos residuos es que producen contaminación visual, (Fig. 7a), son inflamables y no degradables, (Fig. 7b). Además, son el refugio ideal de insectos, roedores y reptiles, y su acumulación trae aparejada la proliferación de mosquitos que son vectores transmisores de enfermedades como el Dengue, Zika y Chikungunya, (Fig. 7c). Está demostrado que cuando este desecho se quema emite sustancias altamente tóxicas y cancerígenas, como las dioxinas, por lo cual no puede ser usado fácilmente como combustible. Por ello, sólo una fracción de los NFU es reciclada para producir energía calórica, en hornos especiales, que poseen filtros adecuados para no producir contaminación atmosférica, como los utilizados en la industria del cemento. El resto de estos residuos aún no recibe un destino adecuado.

En la elaboración de las tejas se usa, además, polietileno de baja densidad reciclado, procedente de bolsas, caños, bidones y de material utilizado para almacenar cereales en la agroindustria, comúnmente llamado “silobolsa”. En nuestro país se generan 787.296 t anuales de polietileno de baja densidad, siendo muy bajo el porcentaje de reciclado, no supera el 10 % en las distintas campañas anuales [13]. Este residuo se recicla con un proceso de fusión y moldeo en pellets, que se usan para distintas aplicaciones.



Fig. 7. El problema de contaminación que generan los NFU

### 3.2. Proceso de fabricación

Materia prima: caucho triturado proveniente de los NFU, de 1-3 mm y PE reciclado en pellets de 3 mm, adquiridos en comercios.

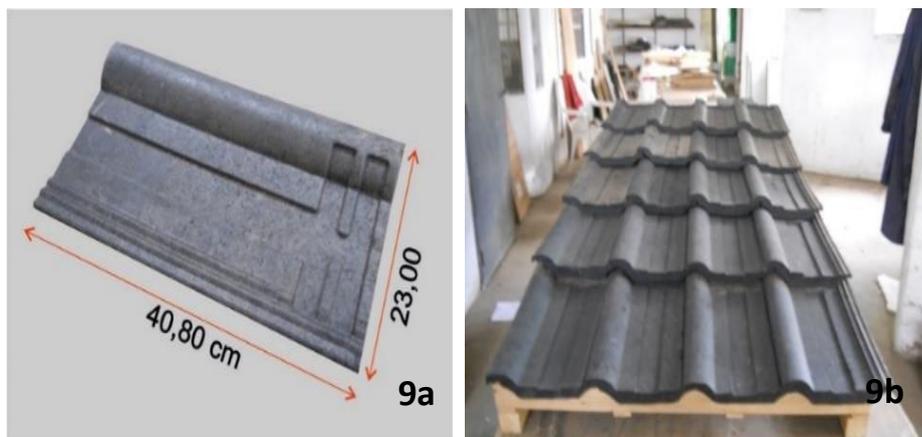
Equipamiento: se utiliza una extrusora de fabricación artesanal con tornillo de 1m de largo y 45 mm de diámetro, con tres zonas de calentamiento, acoplada una prensa neumática de 20t.

Proceso de fabricación: la mezcla de material (caucho + polietileno) se ingresa por la tolva de la extrusora con el tornillo precalentado entre 250 – 270 °C, (Fig. 8a). La velocidad de extrusión es de 50 rpm y permite un caudal de 1,5 kg/min de mezcla fundida, (Fig. 8b). Este material es colado en el molde de conformación y luego prensado a 20 t, durante 2 min, (Fig. 8c). Luego la teja es retirada del molde y enfriada en bastidor para evitar la deformación del componente por la tensión de enfriamiento, (Fig. 8d). Los bordes sobrantes se cortan con una sierra de banco y la teja está lista para su uso, (Fig. 8e).



Fig. 8. Proceso de fabricación de tejas de caucho y plástico

Las tejas elaboradas con esta tecnología se muestran en la Fig. 9a, junto con un ejemplo de ensamble entre tejas, (Fig. 9b).



**Fig. 9.** a. Tejas de caucho y polietileno reciclado. b. Tejas ensambladas

En la Fig. 10 se muestra el primer prototipo de cubierta construido con esta tecnología.



**Fig. 10.** Prototipo de cubierta construido con caucho y polietileno reciclado

### 3.3. Propiedades técnicas del componente

Las principales propiedades técnicas de las tejas de caucho y polietileno reciclados fabricadas por termo-moldeo y prensado se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3. Propiedades técnicas de las tejas de caucho y plástico reciclados**

<b>Propiedad técnica</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma</b>
Masa ( kg)	1,29	IRAM 12528-1
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	925	IRAM 12528-1
Conductividad térmica (W/m <sup>20</sup> C)	0,33	IRAM 11559
Permeabilidad al aire (10-16m <sup>2</sup> )	kt= 0,001	IRAM 11601
Permeancia al vapor de agua	Satisfactorio	IRAM 11632-1
Resistencia al impacto duro	Satisfactorio	IRAM 12528-2
Resistencia a la flexión	Satisfactorio	IRAM 12528-2
Resistencia a la heladicidad	Satisfactorio	IRAM 11632-2
Absorción de agua (%)	0,3	IRAM 12528-03
Resistencia al envejecimiento	Satisfactorio	ASTM D 4329:99
Inflamabilidad	Cumple	IEC 60695-2-11: 2013

### **3.4. Principales ventajas técnicas**

Se destaca como mayor ventaja técnica su resistencia al impacto duro, lo que lo hace un componente apropiado para las zonas con eventos frecuentes de granizo. Además, posee muy buenas propiedades de aislación térmica. También son flexibles y resistentes a la manipulación, lo que permite el montaje y desmontaje sin pérdidas por rotura.

### **3.5. Transferencia de la tecnología**

Aún no se han realizado transferencias de esta tecnología, porque todavía no se obtuvo la patente nacional, que protege la propiedad intelectual de los inventores. La patente está en trámite, fue presentada la solicitud en el Instituto Nacional de la Propiedad Industrial (INPI) en el año 2016.

Por otra parte, en el 2018 se ha obtenido el Certificado de Aptitud Técnica (CAT) de este componente constructivo [14]. Recién ahora se puede ofrecer al mercado de la construcción un producto certificado desde el punto de vista técnico.

## **4. Árido sintético (AS) con plásticos de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)**

### **4.1. Residuo utilizado como materia prima**

Se utilizan residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), que son de muy difícil tratamiento y cuya cantidad ha crecido en forma alarmante en los últimos años. Según un informe del INTI, la cantidad de RAEE generada por año en nuestro país podría ser cercana a 120.000 t, sin poder estimar la cantidad

acumulada y dispersa en hogares, empresas, basurales y otros. Se estima que sólo un 5% es tratado adecuadamente por empresas recicladoras. El resto del residuo de RAEE es desechado en enterramientos sanitarios formales e informales. A diferencia de otros plásticos residuales que no contaminan por sí solos (ej. PET de botellas post-consumo, polietileno de bolsas y envoltorios, y otros), los plásticos de los RAEE producen una gran contaminación en el suelo y las napas subterráneas, por la lixiviación de metales pesados en medios ligeramente ácidos [15].

La fracción plástica de los RAEE está compuesta mayoritariamente por la mezcla de plásticos, ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) y HIPS (poliestireno de alto impacto). Los plásticos constituyen más de un tercio de la masa total ~34% [16] y son los más difícil de insertar en los circuitos de reciclado por la heterogeneidad de su composición y la presencia de aditivos. Es un material de gran disponibilidad y muy buenas propiedades mecánicas, que requiere de una inserción inmediata en un nuevo ciclo productivo. Para ello es necesario considerar la presencia de contaminantes en el desecho, los cuales son principalmente metales en distintas concentraciones y retardantes de llama polibromados (Brominated Flame Retardant- BFRs). Cualquier tecnología que pretenda incorporar este desecho deberá tener en cuenta este factor y desarrollar alternativas de mitigación de los efectos de los contaminantes. En el caso de la tecnología desarrollada en el CEVE, fue necesario comprender la naturaleza de los contaminantes y estudiar alternativas de estabilización y/o eliminación de los agentes nocivos con el fin de fabricar materiales aptos para el uso en construcciones civiles.

El reciclaje químico, la extrusión y la combustión son poco adecuados, ya que se desprenden al ambiente sustancias altamente contaminantes, en cantidades que hacen prácticamente inviable el filtrado de gases y químicos volátiles. Esto lleva a que la única alternativa válida, hasta aquí desarrollada, sea el uso como material de carga en matrices cementicias o poliméricas, pero contemplando la estabilización de los contaminantes en el proceso.

#### **4.2. Proceso productivo**

**Materiales:** plástico triturado proveniente del RAEE, en tamaño de partículas entre 1-3 mm, cemento Portland común, carbón activado de origen vegetal, polvo de cuarzo y residuo proveniente del proceso de pulido de porcelanatos.

**Equipamiento:** mezcladora vertical sin paletas, tamices.

**Procedimiento:** se emplea la técnica de core-shell (corazón-coraza), donde la partícula del RAEE es cubierta por tres capas sucesivas de una mezcla de cemento, polvo de cuarzo, carbón activado y agua. Las partículas se pesan y se introducen en la máquina mezcladora. El cemento y los aditivos se dosifican y se mezclan previamente, luego se incorporan a la mezcladora, donde ya están las

partículas y se va agregando el agua hasta completar una relación agua/cemento 0,5. Las partículas se dejan secar 24 horas, luego de la aplicación de cada capa y se realiza un desterronado y tamizado. El AS se puede utilizar a partir de los 7 días, aunque se recomienda su uso recién después de 28 días, lapso considerado óptimo para el fraguado del cemento. Partículas de plástico de RAEE y el AS se muestran en la Fig.11a, 11b y 11c, respectivamente.

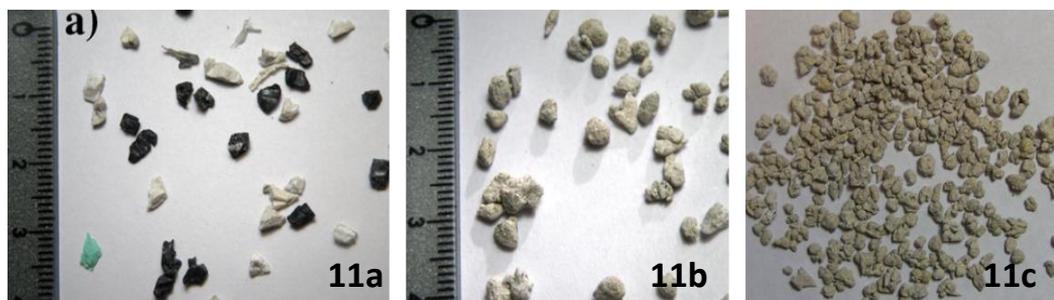


Fig. 11.a. Plástico de RAEE. b y c. AS elaborado por la técnica del Core-shell.

### 4.3. Propiedades técnicas del material

Las principales propiedades técnicas del material hasta aquí estudiadas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Características técnicas del AS

Propiedad	Valor	Norma
Dimensiones promedio (mm)	1,38±0,25	IRAM 1505
Módulo de Finura	4,72	CIRSOC 201
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	0,60	IRAM 1505
Forma	Partículas esféricas	-
Área (mm <sup>2</sup> )	8,64±2,22	CIRSOC 201
Circularidad	0,73±0,07	IRAM 1505
Redondez	0,74±0,12	IRAM 1505

El AS puede ser utilizado como reemplazo del árido tradicional en morteros cementicios, con un muy buen desempeño en la resistencia a la compresión simple. Este comportamiento fue corroborado ensayando probetas normalizadas de acuerdo a la Norma IRAM1622 a 28 días, (Fig. 12a y 12b), dando valores inferiores al árido tradicional pero aceptables para morteros. Los valores de la tensión máxima de rotura (Tmax) para una relación árido : cemento 6:1 se muestran en la Tabla 5.



**Fig. 12.** Ensayos de resistencia a la compresión simple de probetas de AS.

**Tabla 5.** Resistencia a la compresión de morteros con AS

Serie	Árido	Árido:Cemento	Tmax (MPa)
1	Plástico RAEE	6:1	1,8
2	AS P3	6:1	2,4
3	Arena Gruesa	6:1	9,7

El AS P3 fue elaborado incorporando carbón activado en la mezcla, para estabilizar los contaminantes orgánicos, principalmente los BFRs. En probetas elaboradas sin el aditivo se pudo comprobar la formación de una coloración amarilla con el paso del tiempo, atribuible a la liberación de este tipo de compuestos, (Fig. 13).



**Fig. 13.** Liberación de BFRs en medio cementicio

El uso de carbón activado en la mezcla del mortero logró frenar la liberación de los retardantes de llama. Por otro lado, la matriz cementicia proporciona un medio ligeramente básico, que estabiliza los metales y evita su lixiviación, dando como resultado un material que no emite contaminantes al ambiente [17].

#### 4.4. Principales ventajas técnicas

Entre las principales ventajas técnicas se destaca la posibilidad de reemplazar al árido tradicional con un material que, dada su composición química (el corazón de polímero), permite inferir un mejor comportamiento como aislante térmico. Esto será corroborado en próximos estudios sobre sus propiedades.

#### 4.5. Transferencia de la tecnología

Aún no se han realizado transferencias de esta tecnología, pues se está completando el estudio de las propiedades técnicas de este material y gestionando la patente que protegerá la propiedad intelectual del procedimiento que han utilizado los inventores.

### 5. Perfiles elaborados con plásticos reciclados

#### 5.1. El residuo utilizado como materia prima

Para esta tecnología se utilizó polietilen-tereftalato (PET), ya descrito en la sección 1.1, y PE reciclado.

#### 5.2. Proceso productivo

Materiales: PET (polietilen-tereftalato): proveniente de recolección diferenciada, sin mayor tratamiento, triturado a 3mm de tamaño máximo de partícula y PE (polietileno) pelletizado comercial, obtenido del reciclado de films plásticos de silobolsas, triturado, lavado y secado.

Equipamiento: extrusora de simple husillo, con tres fases de calentamiento, potencia de motor 2,2 kW, capacidad de plastificación de 500cc/min.

Proceso: se utilizó la técnica de extrusión, con una temperatura promedio de 240 °C, con salida a un molde-guía de chapa plegada donde se completa el proceso de moldeado y enfriado, (Fig. 14).

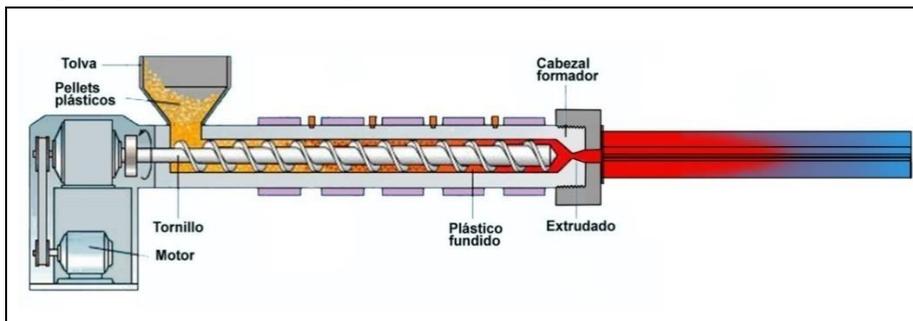


Fig. 14. Esquema de extrusora con molde guía

Una vez extruidos los perfiles, se fabricaron marcos para aberturas. Se ensayaron dos técnicas para la unión de los ángulos, el atornillado y la termofusión; esta última mostró ser más conveniente, (Fig. 14a y 14b). También se evaluaron otras propiedades para determinar la adaptación a la carpintería tradicional y mostró muy buen comportamiento al corte en inglete, acanalado, clavado y atornillado, (Fig. 15 b y c).

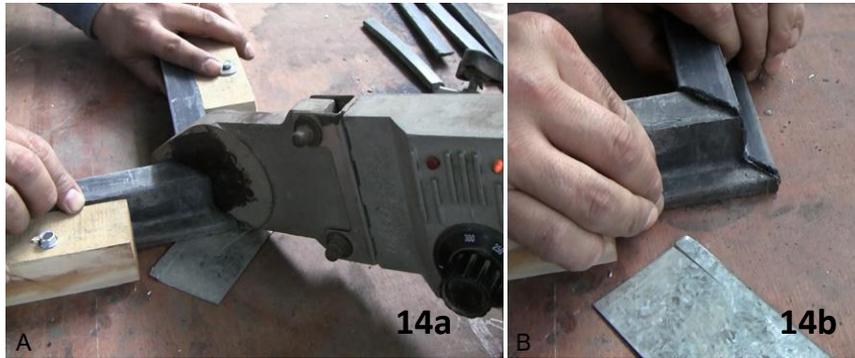


Fig. 14.a y b Uniones entre perfiles por termofusión



Fig. 15.a. Corte a inglete de perfiles. b. Pruebas de atornillado

### 5.3. Propiedades técnicas del material

Algunas de las propiedades técnicas de estos perfiles con una formulación de PET/PE65/35 en peso, extruido a 245 °C, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades técnicas de los perfiles plásticos para aberturas

Propiedades técnicas	Valor
Resistencia a compresión(MPa)	26,7
Resistencia a tracción(MPa)	11,3
Resistencia a flexión(MPa)	20,2
$\lambda$ Conductividad térmica(w/m°K)	0,61

Hasta este momento los resultados encontrados son positivos y se avanzará en la producción de otros prototipos para evaluar distintas propiedades, relativas a la seguridad para el uso en ventanas.

#### 5.4 Principales ventajas técnicas

Los perfiles producidos con este nuevo material, son constituidos 100% por plásticos de residuos, sin el agregado de resinas u otros polímeros vírgenes. De esta manera en el reciclado no son utilizados directa ni indirectamente materiales que requieran energía u otros recursos para su producción. Además, se destacan sus propiedades técnicas de bajo peso, flexibilidad, impermeabilidad e imputrescibilidad. Este tipo de perfiles es muy simple de aplicar en la producción de ventanas, (Fig. 16), con técnicas similares a los de madera.



Fig. 16. Prototipo de marco de ventana de con perfiles de plástico reciclado

#### 5.5 Transferencia de la tecnología

Aún no se han realizado transferencias de esta tecnología, pues se está completando el estudio de las propiedades técnicas de estos componentes constructivos.

### CONCLUSIONES

Las tecnologías que involucran el uso de materiales plásticos reciclados para fabricar componentes constructivos o materiales de construcción se presentan como una muy buena alternativa para revalorizar los desechos. Permiten absorber residuos a gran escala, para la producción de materiales y componentes constructivos técnicamente aptos, socialmente aceptables y ambientalmente amigables.

Uno de los principales inconvenientes para llevar a la práctica las tecnologías que reciclan residuos, radica en lo elevado del costo de producción. Esto es debido a que el acondicionamiento de la materia prima requiere un costo adicional y se pierde competitividad frente a materiales o componentes tradicionales.

Al realizar una comparación económica entre estas tecnologías y las tradicionales, se debería tener en cuenta que las tecnologías que utilizan reciclado permitirían la reducción de gastos para los municipios en concepto de recolección y disposición final de residuos.

Por las transferencias de este tipo de tecnologías realizadas hasta el presente por el CEVE, se advierte que municipios que poseen vertederos de basura son los principales demandantes. Ellos tienen acceso gratuito a los residuos en cantidad, deben lograr una disposición final adecuada de los mismos y, también necesitan construir viviendas sociales.

Desde el punto de vista social, este tipo de tecnologías genera una fuente de trabajo para personas de escasos recursos, tanto en la etapa de recolección de la materia prima como en la elaboración de los elementos constructivos y finalmente en el montaje de las construcciones.

En nuestro país es necesario avanzar en legislación que incentive el reciclaje, por ejemplo, con desgravaciones impositivas, para que sea viable la producción de componentes basados en materiales reciclados y podamos acercarnos a los resultados obtenidos en varios países europeos tales como España y Alemania, y algunos de Latinoamérica como Brasil y México.

Por ahora, impulsar este tipo de tecnologías es un desafío para la comunidad científica y tecnológica de Argentina.

## **LABORATORIOS DE ENSAYO**

Las propiedades técnicas de todos los productos han sido determinadas mediante ensayos realizados en los siguientes laboratorios normalizados:

- Laboratorios de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad –CINTEMAC- de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial -INTI- de Buenos Aires.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a las siguientes instituciones financiadoras: a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica - ANPCyT, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas -CONICET, a la Agencia para el

Desarrollo Económico de la Ciudad de Córdoba - ADEC y al Ministerio de Industria, Comercio, Minería y Desarrollo Científico Tecnológico del Gobierno de la Provincia de Córdoba.

También agradecen especialmente al Centro de Investigación, Desarrollo y Transferencia de Materiales y Calidad –CINTEMAC- de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, por su participación en la realización de los siguientes proyectos de investigación en red: "Desarrollo tecnológico de tejas con materiales reciclados para viviendas" y "Desarrollo de componentes constructivos reciclando la fracción plástica de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos -R.A.E.E."

## REFERENCIAS

- [1] R. Lanting, *Sustainable Construction in The Netherlands -A perspective to the year 2010*. Netherlands, Ministry of Housing. 1996.
- [2] Ministerio de Salud y Ambiente. *Proyecto nacional de gestión integral de residuos sólidos urbanos*. Buenos Aires, Argentina. 2 (2010).
- [3] Gobierno de la ciudad de Buenos Aires, Ministerio de Ambiente y Espacio Público. *Informe anual de gestión integral de residuos sólidos urbanos. Ley 1.854*. Buenos Aires, Argentina. 7 (2008).
- [4] A. L. Bisio & M. Xanthos. *How to manage plastics waste*. Hanser, New York, 10 (1995).
- [5] R. V. Silva & J de Brito. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in concrete. Plastic Wastes*. 199-227 (2018).
- [6] R. Gaggino. *Ladrillos y placas fabricadas con plásticos reciclados, aptos para la auto-construcción*. INVI. 139-163 (2008).
- [7] R. Gaggino, M. Positieri, J. Kreiker, M. P. Sanchez Amono, R. Arguello & J. C. Baronetto. *Building Components Made From Recycled Plastics. Key Engineering Materials*. 668, 348-356 (2016).
- [8] R. Gaggino. *Water-resistant panels made from recycled plastics and resin. Construction and Building Materials*. 468-482 (2012).
- [9] J. Kreiker, L. Peisino, R. Gaggino, M. Gómez & J. Gonzalez Laría. *Aridosintético de plásticos de R.A.E.E. – una alternativa sustentable para morteros y componentes constructivos. Libro de Resúmenes del IX CRETA*. Universidad Nacional del Litoral. 532, 2017.
- [10] E. Dimitrakakis. *Waste Management*, 29(10), 2700–2706 (2009).
- [11] H. Berretta, R. Gaggino & R. Arguello. *Patente de invención: Procedimiento para realizar una mezcla cementicia aplicable a la fabricación de elementos de construcción*. Titular: CONICET. País: Argentina. Número de Acta en INPI: P030101019. Número de Resolución: AR047617B1. Fecha de otorgamiento: 27 / 08 / 2018.
- [12] INTI. Noticiero Tecnológico Semanal N°18. *Argentina comienza a reciclar neumáticos fuera de uso*. Buenos Aires, Argentina. Publicación digital del 26 de julio de 2010.
- [13] CEAMSE. *Publicaciones periódicas*. Buenos Aires, Argentina. (2017).

- [14] R. Gaggino, M. Positieri, J. Kreiker, L. Peisino, M. Sánchez Amono, J. González Laría & C. Baronetto. *Certificado de Aptitud Técnica: Teja elaborada con caucho y plástico reciclados*. Número 3174. Expediente CUDAP S02: 0107903/2016 de la Dirección Nacional de Acceso al Suelo y Formalizaciones del Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Fecha de otorgamiento: 18 / 10 / 2018. Buenos Aires, Argentina.
- [15] <http://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc108/inti2.php>. acceso 16/06/2016.
- [16] E. Maris, E., *Minerals Engineering*. 76, 28–37 (2015).
- [17] M. Gómez, J. Gonzalez, L. E. Peisino, J. Kreiker\*, R. Gaggino, M. Angellelli, S. Martín, P. Uberman and A. L. & Cappeletti. *A novel core-shell recycled plastic aggregate from WEEE plastic and Portland cement*. 3<sup>rd</sup> Green and Sustainable Chemistry. Berlín, Alemania. Royal Society of Chemistry (2018).

## QUITOSANO OBTENIDO DE DESECHOS DE LA INDUSTRIA PESQUERA Y SU APLICACIÓN COMO ADSORBENTE DE METALES PESADOS

Dima, Jimena Bernadette<sup>(1,2)</sup> & Zaritzky, Noemi E\*<sup>(2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Biología de Organismos Marinos (*IBIOMAR-CCT CONICET -CENPAT*). Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

<sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (*CIDCA -CONICET- UNLP*). Calle 47 y 116 La Plata (1900) Argentina.

<sup>(3)</sup> Depto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.  
\*zaritzkynoemi@gmail.com

### Resumen

El aprovechamiento de residuos para la obtención de productos de alto valor agregado constituye un camino hacia la economía sostenible. Se describen resultados sobre la obtención del biopolímero quitosano para la remoción de cromo hexavalente de aguas contaminadas. El Cr(VI) es soluble en agua y representa un gran riesgo para la salud, por ser tóxico, mutagénico y carcinogénico. El quitosano fue obtenido de desechos de la industria pesquera de crustáceos patagónicos, y caracterizado fisicoquímicamente determinando su grado de desacetilación y peso molecular. Se llevaron a cabo estudios de adsorción de Cr(VI) en sistemas batch utilizando partículas de quitosano bajo diferentes pH, tiempo de contacto y concentración Cr(VI) inicial. Asimismo, se analizó el comportamiento en columnas de adsorción de lecho fijo, no estacionarias, rellenas con partículas de quitosano. Se utilizaron diferentes modelos para describir matemáticamente las curvas de ruptura y se obtuvieron los parámetros correspondientes. Se realizó además la síntesis de micro/nanopartículas de quitosano utilizando tripolifosfato de sodio como agente reticulante que confiere estabilidad al quitosano a bajo pH. Se midió el potencial Zeta y se analizaron los espectros infrarrojos FTIR de las partículas. Mediante técnicas químicas y de Espectroscopía de Absorción de Rayos X se analizó la capacidad reductora de las micro/nanopartículas; el Cr(VI) adsorbido en dichas partículas fue reducido a Cr(III) de menor toxicidad. Resulta factible aplicar esta tecnología en Argentina ya que se dispone de residuos siendo necesario que se construya una planta productora de quitosano cerca de los puntos de generación de los mismos.

*Palabras clave:* quitosano, cromo hexavalente, sistemas batch, isotermas de sorción, cinéticas, columnas de lecho fijo, micropartículas reticuladas

### Abstract

Production of chitosan from crustacean shell wastes and its application as a heavy metal adsorbent. The use of waste to obtain high added value products constitutes a path towards a sustainable economy. Results on the production of chitosan and its application in the removal of hexavalent chromium from contaminated water are described. Cr(VI) is very soluble in water and represents a great risk to health, because it is toxic, mutagenic and carcinogenic. Chitosan was obtained from exoskeletons waste of Patagonian crustaceans fishery. Chitosan was characterized physicochemically through its degree of deacetylation and molecular weight. Cr(VI) adsorption studies were carried out in batch systems using unmodified chitosan particles under different pH conditions, contact time and initial Cr(VI) concentration. The behavior of fixed bed, non-stationary adsorption columns, filled with chitosan particles was also analyzed. Different models were used to mathematically describe the breakthrough curves and the corresponding parameters were obtained. The synthesis of chitosan micro/ nanoparticles was also carried out using sodium tripolyphosphate as a crosslinking agent that confers stability to chitosan at low pH. The Zeta potential was measured and the FTIR infrared spectra of the particles were analyzed before and after adsorption. By using chemical techniques and X-ray Absorption Spectroscopy the reducing and detoxifying capacity of the micro/nanoparticles was analyzed, since the Cr (VI) adsorbed on these particles was reduced to Cr (III) which is less toxic than Cr (VI). It is feasible to apply this technology in Argentina, being necessary to install a chitosan production plant near the waste generation points.

*Keywords:* Chitosan, hexavalent chromium, batch systems, sorption isotherms, kinetics, fixed bed columns, cross-linked micro-particles

## INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de residuos para la obtención de productos de alto valor agregado constituye un camino hacia la economía sostenible. La quitina se encuentra ampliamente distribuida en la naturaleza, siendo el segundo polímero natural más abundante, sólo superado por la celulosa, por lo que constituye un importante recurso renovable. La quitina se encuentra presente en artrópodos, insectos, arácnidos, crustáceos y hongos, entre otros organismos. La quitina se obtiene principalmente del exoesqueleto de los crustáceos tales como los langostinos, cangrejos, centollas, etc.; la misma aparece asociada a otros constituyentes, tales como lípidos, colorantes, carbonato de calcio y proteínas. Se estima que solamente la cantidad de quitina de crustáceos presente en el medio marino asciende a 1 560 millones de toneladas [1]. Este polímero está compuesto por aminoazúcares unidos entre sí por enlaces glicosídicos  $\beta$  (1-4) formando una cadena lineal de unidades de N-acetil-2-amino- 2-desoxi-D-glucosa, algunas de las cuales se encuentran desacetiladas. En promedio la quitina natural posee un grado

de acetilación (DA) de 0.66, es decir que una de cada tres de sus unidades se encuentran desacetiladas [1]. El quitosano es un polisacárido catiónico que se obtiene por desacetilación parcial de la quitina en al menos un 50% y cuya estructura consiste en unidades de D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina unidas por enlaces b-(1-4) glicosídicos (Fig. 1).

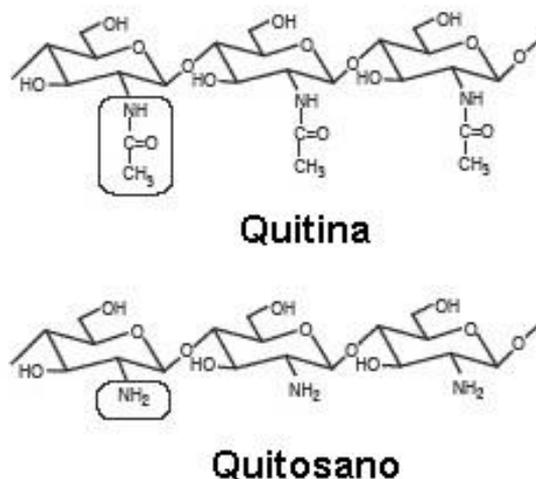


Fig. 1 Fórmulas químicas de quitina y quitosano.

Es un material biocompatible y biodegradable y no tóxico por lo que puede ser usado en diversas áreas científico-tecnológicas. Además, su costo de producción es relativamente bajo ya que es un subproducto de la industria pesquera. El quitosano presenta un conjunto de propiedades que permiten diversas aplicaciones. Tiene capacidad de secuestrar metales pesados (iones metálicos de transición y post-transición) lo que resulta de utilidad en la descontaminación de residuos industriales [2,3,4]. Su carácter de polielectrolito catiónico le confiere acción floculante, por lo que se puede utilizar con este fin en diversas industrias. Sirve como soporte para la inmovilización de enzimas, para su empleo en biotecnología y la industria alimentaria, entre otras. Su carácter antifúngico ha sido utilizado para aplicaciones en la agricultura; es un excelente formador de fibras, películas y membranas. El quitosano puede prepararse líquido, en escamas, en polvo o formando micropartículas (MQS), en función de su utilización. En los últimos años las MQS han sido investigadas en diferentes áreas científicas, ya sea como portadoras de fármacos, para mejorar la asimilación de los mismos [5], como sistema para liberación de proteínas, mostrando una excelente capacidad de atrapamiento [6], como agente antibacteriano [7] o como adsorbente de metales dado su pequeño tamaño versus su gran superficie de contacto [2,4].

### Principales usos del quitosano y quitosano modificado

El quitosano posee excelentes propiedades tales como antifúngico, antivirósico, antimicrobiano, material biocompatible, biodegradable, no tóxico, emulsionante, absorbente de grasas, adsorbente de metales contaminantes,

filmogénico, etc, que hacen que sea considerado de gran aplicación en distintos campos.

- Medio ambiente: El quitosano como catión puede utilizarse como coagulante primario. Su capacidad floculante le permite también remover las partículas sólidas de los coloides. Actúa además como capturante de metales pesados.
- Análisis bioquímicos: Al quitosano se lo emplea como biosensor, actuando como soporte para la inmovilización de enzimas sensibles a un sustrato específico. Un ejemplo de este uso es en la detección del nivel de glucosa en sangre donde la enzima glucosa-oxidasa es inmovilizada en quitosano. Otro ejemplo es la aplicación en la detección de fenoles en aguas residuales, en base a la propiedad del quitosano de inmovilizar a la enzima tirosinasa.
- Química analítica: aplicaciones cromatográficas, intercambiadores de iones, absorción de iones de metales pesados y absorción de ácidos, fabricación de electrodos específicos para metales, etc.
- Biomedicina: membrana de hemodiálisis, suturas biodegradables, sustituyentes artificiales de la piel, agente cicatrizante en quemaduras, sistemas liberadores de fármacos, liberación de insulina, transporte de agentes anticancerígenos, tratamiento de tumores (leucemia), control del virus, etc.
- Agricultura y ganadería: se lo emplea como protector contra microorganismos (bacterias y hongos, fundamentalmente) en las primeras etapas de la producción vegetal (almácigos y plántulas); en sistemas liberadores de fertilizantes, recubrimiento de semillas para su conservación durante el almacenamiento, aditivo para alimento de animales, en formulación de pesticidas, etc.
- Cosméticos: Espumas de afeitar, cremas para la piel y el cuerpo.
- Industria: del papel, textil, alimentaria (soporte para inmovilización de enzimas en la producción de maltosa, espesante en alimentos, agente de oxidación controlada, agente preservador).
- Tejidos: La industria textil es otro usuario habitual del quitosano. Al inhibir el crecimiento bacteriano, permite evitar la descomposición de las fibras textiles que luego termina en olores indeseables. A su vez, la incorporación del polisacárido le confiere a la fibra una textura más suave y facilita la absorción de los colorantes.

## Situación mundial

La obtención de quitina y quitosano dependen fuertemente de la materia prima de partida y de la técnica empleada para su extracción. Se han reportado rendimientos de quitina a partir de cangrejos entre 12-18% con niveles de hasta 25% y para camarones y langostas entre 17-25.6% con valores de hasta 50% [1,8, 9,10]. En 2015 el principal país exportador de quitosano con mayor participación en el mercado, fue China que ha exportado 116083 toneladas por un valor de 392 billones de dólares, participando de esta manera con el 22.1 % de las exportaciones mundiales; en segundo lugar se encuentra Estados Unidos con el 20% de la participación mundial. Otros países que exportan son Italia, Países Bajos, Francia, Alemania, Japón. La amplia variedad de sus funciones se

correlaciona con un alto número de productos en el mercado, y dentro de cada aplicación, hay distintos grados y variedades. Es así que se utiliza quitosano líquido como pesticida, en escamas, en polvo, en hilo de suturas, en bandas sanitarias y en cápsulas para adelgazar. La demanda internacional de quitosano prevista para el 2020 es de unas 700000 toneladas. El mercado internacional de quitosano fue de 1 billón de dólares en 2016 y está previsto que se duplique en 2021. ([www.reportbuyer.com](http://www.reportbuyer.com)).

## Situación argentina

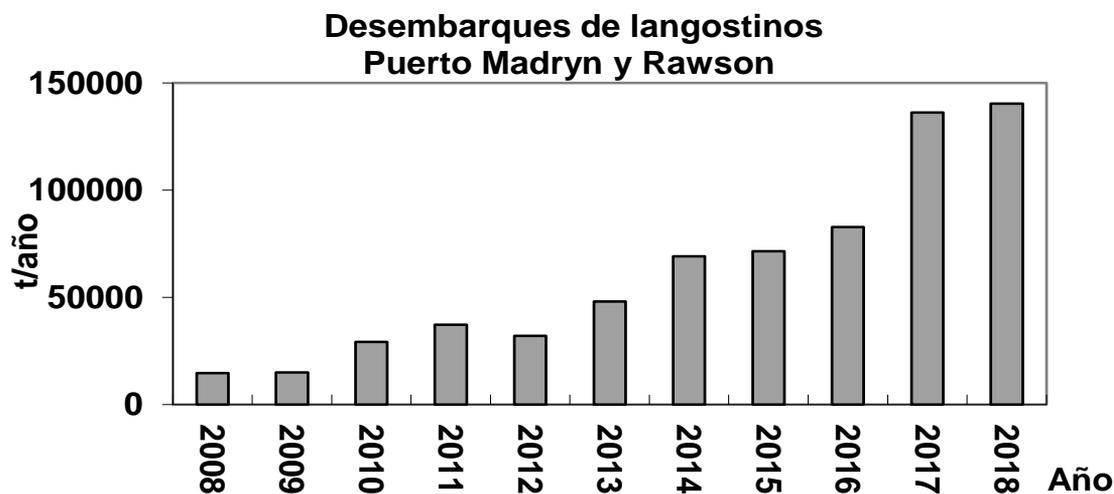
En Argentina, los desperdicios generados por las industrias pesqueras representan una verdadera problemática ambiental, ya que los desembarcos en los Puertos de Madryn y Rawson, sólo de langostino, fueron en 2018 de más de 140000 t/año (Minagro, 2018) (Fig 2). En la industrialización de la carne del langostino, el exoesqueleto restante de la remoción de carne y vísceras, representa cerca del 30-35% de su peso total, mientras que en el procesamiento de cangrejos y centollas los valores de exoesqueletos alcanzan entre el 45% y 55% [2]. Estos desechos constituyen un contaminante rico en carbonato de calcio, pigmentos (carotenoides) y quitina, que pueden ser valorizados si se diseña y aplica un método de extracción adecuado. En la actualidad el quitosano no se produce en el país y su costo de importación es alto, aunque va disminuyendo con el tiempo. El quitosano corresponde a la posición arancelaria 3913.90.50 y entre 2015 y 2016 se importó en Argentina un total aproximado de 2.5 t por un monto de U\$D125.000 (FOB), provenientes de Francia, China, USA e Islandia. Esta información hace suponer un precio de 52 U\$D/kg (FOB). El uso al que se destina es agropecuario mayormente y entre los importadores se pueden citar los laboratorios Sigma Aldrich, Lafarmen o Nova y a la empresa de productos destinados al agro Nutriterra. El desarrollo de alternativas tecnológicas para la producción de quitosano a nivel industrial en Argentina, permitirá sustituir las importaciones que se hacen de ese material, abastecer el mercado interno y poder realizar su exportación. Al respecto el grupo de investigación está realizando gestiones a nivel público y privado para que se construya una planta de producción de quitosano en el país que se localice cerca de los puntos de generación de residuos de crustáceos.

Si se promedian los valores de capturas de los últimos 5 años, sólo de los Puertos de Madryn y Rawson y suponiendo que toda la captura se procesa para la extracción de su pulpa, la cantidad de exoesqueletos generados representan aproximadamente 30000 t/año, siendo la principal fuente de los mismos el langostino (*Pleoticus muelleri*), sin considerar descartes de centollas, cangrejos y camarón.

### 1. Obtención y caracterización de quitina y quitosano de crustáceos patagónicos

Las técnicas de extracción de quitina reportadas son muy variadas, pues dependen en gran medida de las características de la fuente. La composición del

material de partida varía notablemente de una especie de crustáceo a otra, o bien dentro de la misma especie, encontrándose caparazones gruesos y carbonatados, en contraposición a otros de láminas calcáreas delgadas [10,11,12].



**Fig 2.** Desembarques de Langostino, en los Puertos de Rawson y Puerto Madryn, Chubut-Argentina. Datos reportados por Minagro de la Nación, 2008-2018

La mayor parte de las técnicas desarrolladas para la extracción de quitina se basan en procesos químicos de hidrólisis de la proteína y remoción de la materia inorgánica (parte calcárea). Algunos incluyen una decoloración de la quitina extraída, mediante una extracción con solvente o la oxidación de los pigmentos remanentes. El rendimiento en quitina por gramo de caparazón triturado puede variar entre un 7 y 25% dependiendo de la fuente y del proceso empleado para su obtención [1,10].

### 1.1. Metodología de extracción de quitina y quitosano de crustáceos patagónicos

**Obtención de quitina:** Los exoesqueletos de crustáceos de langostinos (*Pleoticus muelleri*) molidos y tamizados, se sometieron primero a un proceso de despigmentación química con una mezcla de agua y acetona en la proporción 1:3. Para ello se colocó la muestra (con un tamaño de partícula entre 0.5 y 1mm) en un recipiente provisto de agitación magnética, y se realizaron 3 lavados de 30 min cada uno a temperatura ambiente. Posteriormente se filtró y enjuagó con agua destilada. Como segundo paso, el producto obtenido en la fase anterior se sometió a una descalcificación con ácido clorhídrico 1.5 M, en una relación masa/volumen 1:10, a temperatura ambiente y con agitación constante, durante 3 y 8 h para langostino y cangrejo respectivamente. Finalmente, se procedió a filtrar y lavar la muestra con abundante agua destilada. Por último, se realizó el proceso de desproteínización, el cual se llevó a cabo mediante el empleo de hidróxido de sodio al 4.5%, con una relación masa /volumen de disolución básica de 1:10. El proceso se realizó durante 2 horas, a 70°C y con agitación constante. El producto obtenido se

purificó filtrando la muestra y realizando sucesivos lavados con abundante agua destilada hasta lograr la eliminación del exceso de álcali. El producto se secó en estufa a 65°C por 24 h y se lo denominó Quitina [2].

**Obtención de quitosano:** Este es un proceso de modificación química de la quitina, en el cual las unidades acetilo son eliminadas (desacetilación). Para ello la quitina fue tratada con NaOH al 50% a 120°C durante 2h. Posteriormente, la muestra fue filtrada, realizando sucesivos lavados con abundante agua destilada, hasta lograr eliminar la alcalinidad del medio. El producto se secó en estufa a 65°C por 24 h y se lo denominó Quitosano [2].

## 1.2. Rendimientos de quitina y quitosano

La Tabla 1 muestra los porcentajes de rendimiento del proceso de obtención de quitosano a partir de langostino, alcanzados en nuestros trabajos. Los rendimientos encontrados estuvieron dentro del rango observado por diferentes autores [1,2,8]. Asimismo, el quitosano obtenido en todos los casos representó en promedio el 76.8% de la quitina inicial, el cual se encuentra dentro de los valores reportados en la literatura [1,13].

**Tabla 1. Rendimientos de quitina y quitosano**

Porcentaje de quitosano a partir de la quitina	77%
Porcentaje de quitina a partir de residuo seco	24.9%
Porcentaje de residuo seco a partir de residuo húmedo	42%
Porcentaje de residuo húmedo a partir del peso total del animal	30%
<i>Rendimiento global del proceso*</i> :	2.42%

\* Depende de la condición inicial con que llega la materia prima.

Según describen los trabajos Dima y col [2] la tasa de conversión es 20:1 (pudiendo variar según la materia prima, es decir, se necesitan 20 toneladas de residuo seco (aproximadamente 47 t de descarte húmedo) para producir 1 tonelada de quitosano. Esta relación pone en evidencia que producir todo el quitosano que se importa sólo requeriría aproximadamente 120 toneladas de descarte húmedo. El esquema de la planta para procesar residuo húmedo, se observa en la Fig 3.

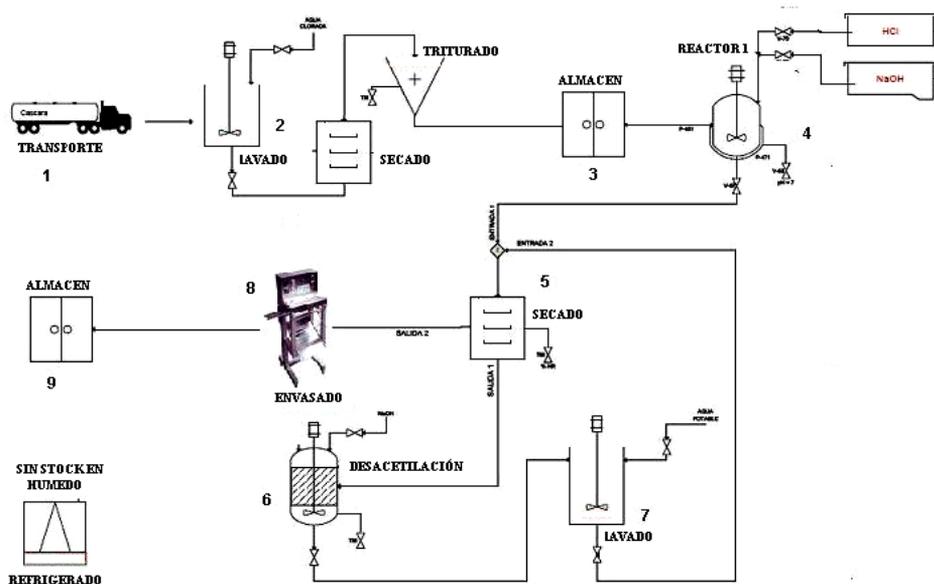


Fig 3. Esquema de las etapas de proceso de una planta de extracción de quitosano

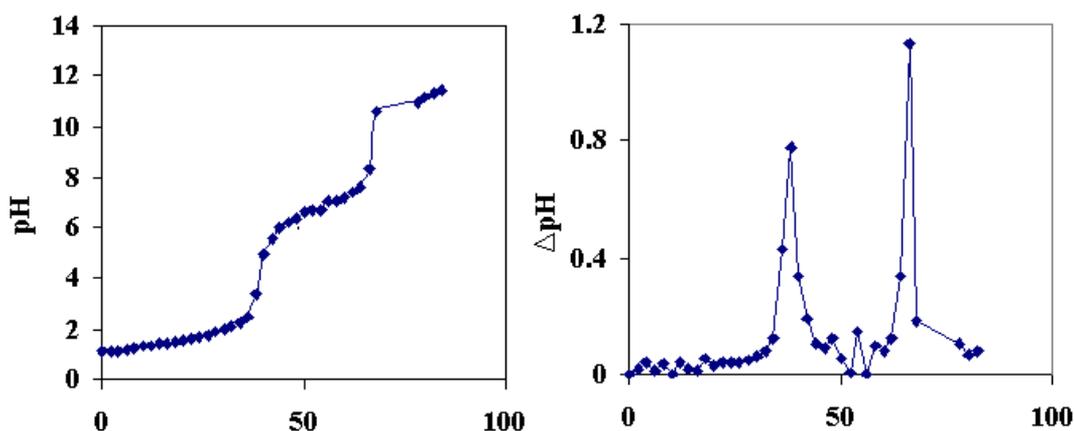
### 1.3. Determinación del grado de desacetilación del quitosano por titulación potenciométrica

El grado de desacetilación (DD%), es una de las propiedades más importantes en la caracterización del quitosano, pues dependiendo de su valor el polímero tendrá diferentes aplicaciones [13]. El contenido de grupos acetilo (-COCH<sub>3</sub>) residuales (grado de acetilación), o presencia de grupos aminos (NH<sub>2</sub>) (grado de desacetilación), pueden ser determinados por varios métodos; entre los más utilizados se encuentran el método potenciométrico y la determinación por espectroscopía infrarroja (FTIR). La titulación potenciométrica es uno de los métodos más simples utilizado por la industria del quitosano debido a su bajo costo en reactivos y equipamiento [13]. Para la determinación del grado de desacetilación de las muestras de quitosano obtenida, se utilizó la técnica original descrita por Broussignac [14]. Para la determinación del contenido de grupos amino de las distintas muestras de quitosano se procedió a la disolución de 0.5g de cada una de ellas, en 20ml de HCl 0.3M. A continuación, se tituló con una solución de NaOH 0.1M. La valoración potenciométrica se llevó a cabo midiendo el cambio de pH cada 2ml de base añadida; la adición se realizó bajo agitación continua para homogenizar la solución. El valor de DD% del quitosano se obtuvo a través de la ecuación propuesta por Broussignac [14] según:

$$DD(\%) = \left( \frac{203M_{eq}}{1 + 42M_{eq}} \right) \quad (1)$$

siendo  $M_{eq} = \frac{N\Delta V}{w}$  donde  $\Delta V$  es la diferencia entre los dos puntos de inflexión del gráfico pH vs. volumen de NaOH, N es la molaridad de la solución de NaOH, w el peso en gramos de la muestra seca de quitosano utilizada, 203 es la masa molar de la glucosamina y 42 es la masa molar del grupo acetilo.

Los resultados de las titulaciones para las muestras tratadas con NaOH 50% (m/v), se muestran en las Figura 4. El grado de desacetilación obtenido fue de 90.2%. Dichos valores se encuentran dentro del rango de los valores del quitosano comercial [13,15]. La quitina con más de un 50% de desacetilación es considerada quitosano, por otro lado, algunos autores, lo definen como tal ante un grado de desacetilación superior al 60%. Usualmente, en el caso del quitosano de uso comercial, se establece que el grado de desacetilación se encuentre comprendido entre el 60 y 95% [13,15].



**Fig. 4.** Curva de titulación del quitosano obtenido de exosqueleto de langostino. En las gráficas de la derecha se muestran los picos máximos que corresponden a los puntos de inflexión de la curva de titulación.

#### 1.4. Caracterización del quitosano por espectroscopía infrarroja (FTIR)

Para la caracterización del quitosano obtenido se utilizó espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) (Fig. 5). Esta técnica considera la variación de absorbancia en la banda que corresponde al grupo carbonilo  $-C=O$ , a  $1655\text{cm}^{-1}$ , característica de la quitina, como una medida de la disminución de los grupos acetilos.

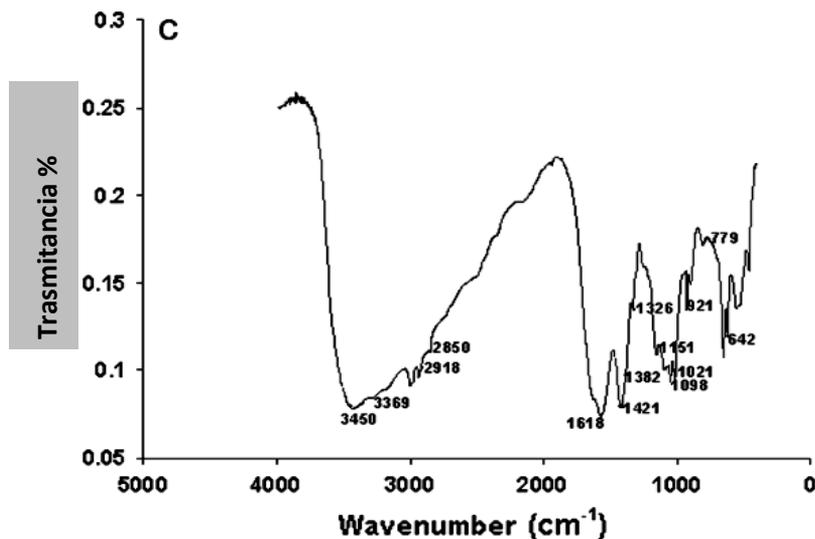


Fig 5. Espectro infrarrojo (FTIR) de quitosano obtenido de langostinos

Esta banda, conforme se produce la reacción, va disminuyendo en su intensidad, es decir, que el grupo aceto va desapareciendo en la quitina, a medida que se va formando el quitosano [13]. Las muestras se prepararon para su análisis en forma de pastillas con bromuro de potasio. Se molió una pequeña cantidad del quitosano conjuntamente con el bromuro de potasio, y la mezcla se prensó para obtener una pastilla, la cual se seca al vacío.

El método consiste en correlacionar la relación de absorbancias entre dos bandas de absorción determinadas, con el porcentaje de N-acetilación del quitosano. En este trabajo se usó el método de correlación propuesto por Brugnerotto [16], donde el grado de acetilación del quitosano fue calculado a partir de la integración de bandas características a 1320 cm<sup>-1</sup> y 1420 cm<sup>-1</sup> de acuerdo a la Ec. 2, dicha correlación ha sido utilizada con frecuencia en la literatura [5]. A partir de los espectros FTIR se toma como banda característica a la localizada a 1320 cm<sup>-1</sup>, y como referencia la banda a 1420 cm<sup>-1</sup>, obteniendo una correlación lineal que viene expresada por la siguiente relación:

$$DD(\%) = 100 - [31,92(A(1320\text{cm}^{-1})/A(1420\text{cm}^{-1})) - 12,20] \quad (2)$$

donde  $A(1320\text{cm}^{-1})$  y  $A(1420\text{cm}^{-1})$  son las absorbancias de los picos del espectro IR del quitosano.

### 1.5. Evaluación del peso molecular promedio viscosimétrico

En soluciones poliméricas diluidas la viscosidad intrínseca  $[\eta]$  es una medida del tamaño de una molécula en solución. La viscosidad intrínseca tiene unidades de volumen/masa y está directamente relacionada con el peso molecular

promedio del polímero en solución. Depende no sólo del tamaño de la macromolécula sino también de su conformación y de la naturaleza del solvente. Para fluidos newtonianos se emplean viscosímetros capilares del tipo Ostwald entre otros, y basándose en la ecuación de Hagen -Poiseuille, se mide el tiempo de escurrimiento del solvente puro ( $t_0$ ) y la solución ( $t$ ) en un tubo capilar entre dos marcas fijadas, a una temperatura determinada. Debido a que en viscosimetría capilar las concentraciones utilizadas son muy pequeñas, se considera que la densidad de la solución es similar a la densidad del solvente. A partir de los tiempos de escurrimiento se pueden determinar las viscosidades dinámicas. Se puede determinar así la viscosidad relativa ( $\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} \approx \frac{t}{t_0}$ ) donde  $\eta$  es la viscosidad

de la solución polimérica y  $\eta_0$  la del solvente puro. Asimismo se obtienen la viscosidad específica ( $\eta_{sp} = \eta_{rel} - 1$ ) y la viscosidad reducida ( $\eta_{red} = \eta_{sp}/c$ ) donde  $c$  es concentración del polímero. La viscosidad intrínseca  $[\eta]$  se determina extrapolando los valores de viscosidad reducida a valores de concentración de polímero tendiendo a cero.

Se llevó a cabo la determinación del peso molecular promedio viscosimétrico del quitosano mediante la técnica de viscosimetría capilar descrita por Rinaudo y col. (1993), utilizando un viscosímetro de Ostwald y la ecuación de Mark-Houwink-Kuhn-Sakurada (MHKS). Para ello, quitosano al 0.5% fue disuelto en buffer ácido acético 0.3 M /acetato de sodio 0.2M a 25°C. A partir de esta solución stock se prepararon diluciones de concentraciones comprendidas entre 0.5% y 0.065% a las cuales se les determinó la viscosidad específica ( $\eta_{sp}$ ). Las viscosidades se obtuvieron de cada dilución con un viscosímetro Ostwald colocado en un baño termostático a 25°C y midiendo el tiempo de caída para la solución buffer y las diferentes soluciones de quitosano.

Una vez calculada la viscosidad intrínseca, extrapolando a  $c=0$  se puede determinar el peso molecular viscosimétrico ( $M_v$ ) de un polímero a partir de la Ecuación de MHKS (Ec. 3), que plantea la dependencia de  $[\eta]$  con el peso molecular promedio.

$$[\eta] = k M_v^a \quad (3)$$

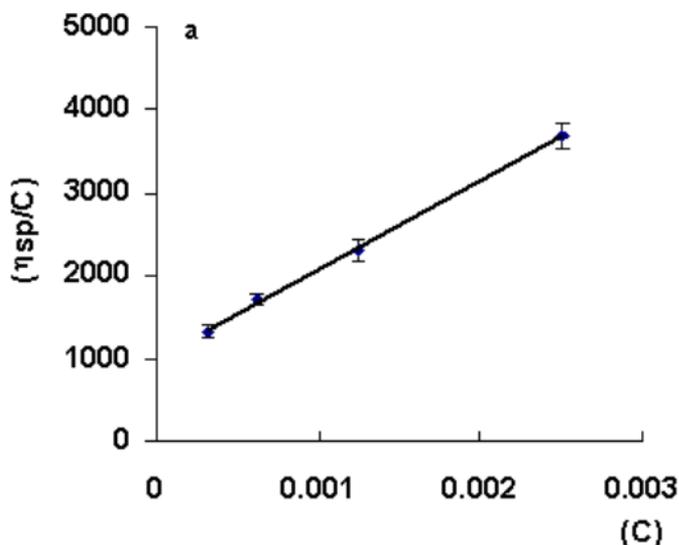
donde  $k$  y  $a$  son constantes empíricas válidas sólo para un sistema establecido de solvente - polímero, las cuales dependen de la naturaleza del polímero, del sistema disolvente utilizado y la temperatura.

El peso molecular viscosimétrico a partir de la Ec. (3) fue determinado utilizando los parámetros hallados por Rinaudo [17]. Se determinó la viscosidad intrínseca  $[\eta]$ , aplicando la ecuación de Huggins que relaciona la viscosidad reducida ( $\eta_{sp}/c$ ) con la concentración ( $c$ ):

$$\frac{\eta_{sp}}{c} = [\eta] + K_H [\eta]^2 c \quad (4)$$

En la Fig. 6 se puede observar el grado de linealidad de la Ecuación de Huggins. A partir de la graficas se obtuvieron los valores de la viscosidad

intrínseca como la ordenada al origen de la Ec. (4). El peso molecular viscosimétrico se determinó a partir de la Ec. (3) utilizando los parámetros hallados por Rinaudo [17];  $k= 0.082$  y  $a = 0.76$ . El peso molecular viscosimétrico ( $M_v$ ) resultó de  $2.39 \times 10^5$  Da.

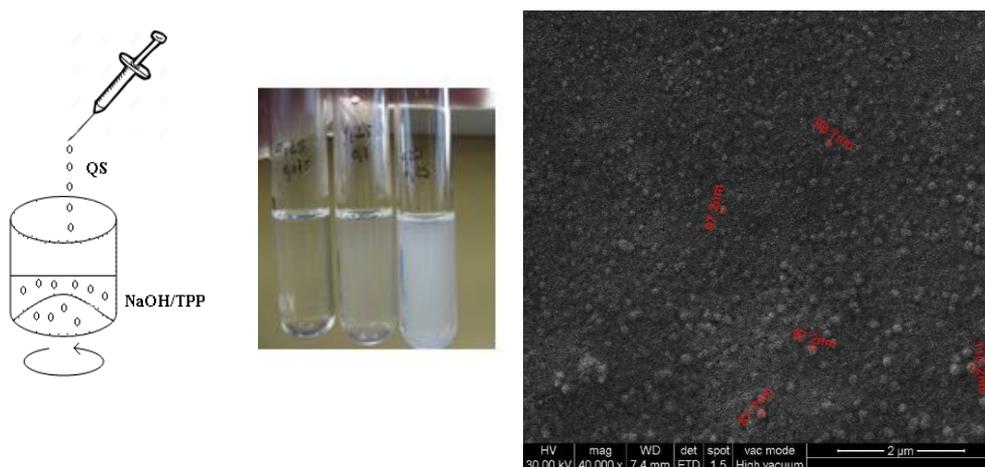


**Fig. 6.** Ecuación de Huggins aplicada a soluciones de quitosano, de exoesqueleto de langostino, para la obtención de la viscosidad intrínseca.

### 1.6. Síntesis de micropartículas de quitosano por gelificación iónica

Debido a la toxicidad del glutaraldehído y otras moléculas orgánicas utilizadas en la síntesis de geles con uniones covalentes, se propuso la utilización de la técnica de gelificación iónica, utilizando tripolifosfato (TPP) como agente reticulante. Las micropartículas de quitosano se prepararon tomando como base el procedimiento reportado por Calvo [18]. Para ello se realizaron diversas pruebas con el fin de obtener el tamaño de las partículas en suspensión deseado, variando la concentración de QS y de TPP. Luego, bajo agitación magnética constante y a temperatura ambiente, se agregó gota a gota, con ayuda de una jeringa insulínica, 1 mL de solución acuosa de TPP a 3 mL de la solución quitosano. Durante la obtención de las micropartículas se identificaron visualmente tres sistemas diferentes: una solución clara, una suspensión opalescente y agregados.

En la suspensión opalescente se observó la presencia de micropartículas. Las mismas se recolectaron por centrifugación a 10000 rpm durante 15 minutos. El tamaño de las micropartículas obtenidas fue visualizado en un microscopio electrónico de barrido. Para una relación de QS-TPP entre 1.25 y 1.5mg/mL el tamaño resultó cercano a los 140nm (Fig. 7) [2]. Estos rangos de concentraciones fueron observados por otros autores [5, 18, 19] para la formación de nanopartículas.



**Fig. 7.** Esquema de obtención de micro/nanopartículas y micrografías de nanopartículas de quitosano para una relación QS-TPP (mg/mL) de 1.25:1.5

## 2. Uso del quitosano para la remoción de cromo hexavalente

Con referencia a la aplicación de quitosano para el tratamiento de aguas que contienen iones metálicos, la importancia del tema radica en que los metales constituyen un grupo importante de contaminantes debido a su toxicidad. Los niveles de metales pesados en los sistemas acuáticos se han incrementado por el crecimiento de las actividades industriales y mineras. El quitosano tiene capacidad de secuestrar iones metálicos de transición y post-transición (metales pesados) lo que resulta de utilidad en la decontaminación de aguas [20]. Estos elementos tóxicos, de acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, incluyen entre otros a los siguientes elementos: cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, plomo. Se ha seleccionado como metal para su estudio el cromo hexavalente debido a que es altamente tóxico y carcinógeno para una gran variedad de organismos por su gran capacidad oxidante (U.S. EPA, 1998a). Como metal de transición, el cromo puede encontrarse en diferentes estados de oxidación sin embargo, en el ambiente generalmente se encuentra en los estados de oxidación III y VI. El Cr (VI), debido a su elevada solubilidad, puede persistir en ambientes acuáticos. En su forma hexavalente se comporta como un elemento tóxico que produce efectos nocivos en el organismo. La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (International Agency for Research on Cancer, 1990), clasifica al Cr (VI) como un elemento cancerígeno en el ser humano.

Los estudios de adsorción se pueden realizar en sistemas discontinuos (batch) y continuos. Los estudios en sistemas discontinuos suministran información sobre la capacidad de adsorción de sustancias específicas sobre el adsorbente; estos estudios consisten en colocar una disolución que contiene la sustancia a remover con una cantidad específica del adsorbente por un tiempo suficiente para que se establezca el equilibrio, proveyendo de agitación constante para mantener el

sistema en suspensión. Los sistemas continuos no funcionan bajo tales condiciones de equilibrio, debido a que constantemente se introduce a la columna la solución de alimentación, llevándose a cabo el proceso de transferencia de masa entre una fase móvil y otra que se encuentra fija. Por lo general el sistema continuo es de mayor aplicación a nivel industrial [21,22].

### 2.1. Estudios de adsorción de Cromo hexavalente en sistema batch

Se estudió la capacidad de adsorción del QS y las MQS, para eliminar el Cr (VI) de aguas residuales. Los experimentos de adsorción de Cr (VI) se realizaron bajo diferentes condiciones de: concentración inicial de Cr (VI) (50 a 400 (mg/L), tiempos de contacto (30min, 1h, 2h, 3h), y pH (2.5-6). Los experimentos de adsorción se llevaron a cabo utilizando 40 mg de MQS en 50 ml de volumen de Cr (VI). Los experimentos se llevaron a cabo en ensayos batch a 25 °C, bajo agitación constante. Las concentraciones finales de Cr (VI) se determinaron por espectrometría de absorción atómica de llama. La capacidad de adsorción de Cr (VI) en condiciones de equilibrio ( $Q_e$ ) se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_e = \frac{(C_i - C_{eq})}{w} V \quad (5)$$

donde  $Q_e$  (mg /g) es la cantidad de iones metálicos adsorbidos por el biopolímero,  $C_i$  y  $C_{eq}$  son las concentraciones de metal (mg/L) en la solución a tiempo cero y después del equilibrio, respectivamente,  $V$  (L) es el volumen de la solución y  $w$  es la masa (g) de adsorbente utilizado.

Para la descripción matemática de las relaciones de equilibrio de los iones Cr (VI) se utilizaron las isothermas de Langmuir, Freundlich y Temkin. Los análisis cinéticos se realizaron usando los modelos cinéticos de pseudo primer y segundo orden y la ecuación de Elovich. Los parámetros de operación fueron:  $T = 25$  °C,  $pH = 2-4$ , tiempo = 3 horas. La Fig.8 muestra el efecto simultáneo de la concentración de Cr (VI) inicial y el pH sobre el porcentaje de remoción de Cr (VI).

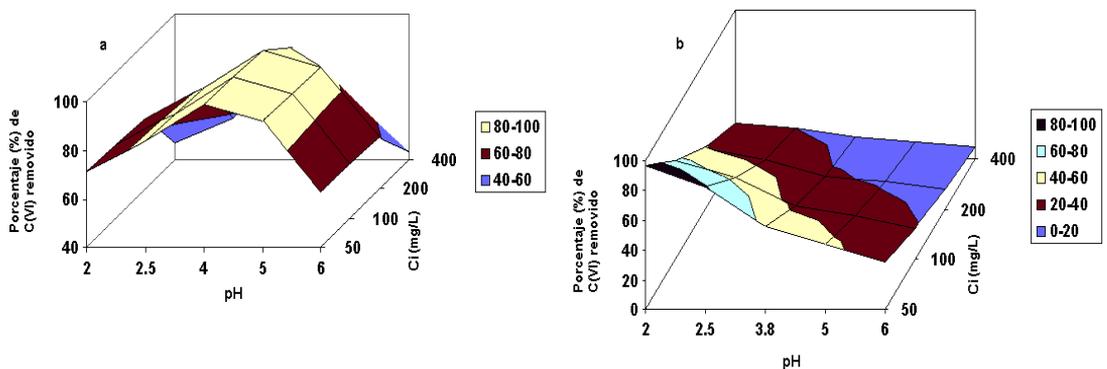


Fig 8. Porcentaje de Cr (VI) removido en función del pH y de la concentración inicial de cromo hexavalente: a) QS; b) MQS.

El pH del medio produce un efecto notable en la remoción de Cr (VI). La mayor efectividad de adsorción de Cr (VI) sobre MQS se observó a pH 2-2.5 luego de 2 hs de contacto. Según los resultados reportados por Dima y col. [2] el QS obtenido resultaba inestable a bajos valores de pH. En cambio, con el uso de quitosano modificado por reticulación con tripolifosfato (MQS), cuando el pH disminuyó de 4 a 2, la remoción aumentó en un 80% debido a la estabilidad que le confiere el proceso de reticulación [3,23].

## 2.2. Relaciones de equilibrio y estudios cinéticos

Los datos de equilibrio se analizaron utilizando las expresiones de las isothermas de Langmuir, Freundlich, y Temkin [24]. La isoterma de Langmuir está dada por la ecuación:

$$\frac{C_{eq}}{Q_e} = \frac{C_{eq}}{Q_m} + \frac{1}{K_L Q_m} \quad (6)$$

donde  $Q_e$  es la cantidad adsorbida por unidad de peso de adsorbente en el equilibrio (mg/g);  $C_{eq}$  es la concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción (mg/L),  $K_L$  es la constante de Langmuir (g/L) relacionada con la afinidad de los sitios de unión y  $Q_m$  es la máxima capacidad de adsorción en la monocapa (mg/g).

La isoterma de Freundlich es una ecuación empírica que supone que el proceso de adsorción tiene lugar en superficies heterogéneas, y la capacidad de adsorción está relacionada con la concentración de Cr (VI) en el equilibrio. Se puede escribir como:

$$\ln Q_e = \ln K_f + (1/n) \ln C_{eq} \quad (7)$$

donde  $K_f$  constante de Freundlich (mg/g) y  $n$  es el factor de heterogeneidad relacionado con la intensidad de adsorción.

La isoterma de Temkin en su forma lineal está dada por la ecuación:

$$Q_e = B_t \ln(K_t) + B_t \ln(C_{eq}) \quad (8)$$

asume que el calor de adsorción de las moléculas en la capa disminuye linealmente con la cobertura dada por las interacciones adsorbente-adsorbato.  $B_t$ , se relaciona con el calor de adsorción y  $K_t$  es la constante de unión de equilibrio.

Los parámetros obtenidos al aplicar las ecuaciones de adsorción se muestran en la Tabla 2. La isoterma de Langmuir mostró una mejor correlación de los datos, lo que indica la naturaleza homogénea del adsorbente (Tabla 2).

**Tabla 2. Parámetros de las isotermas de equilibrio para Cr (VI) adsorbido en micro/nano partículas de quitosano**

	Langmuir			Freundlich			Temkin		
	Q <sub>m</sub> (mg/g)	K <sub>L</sub> (L/mg)	R <sup>2</sup>	1/n	K <sub>f</sub> (mg/g)	R <sup>2</sup>	B <sub>t</sub>	K <sub>t</sub> (L/mg)	R <sup>2</sup>
MQS <sup>a</sup> pH=4	68.9	0.014	0.990	0.36	7.02	0.983	13.95	1.76	0.989
MQS <sup>a</sup> pH=2	124	0.086	0.990	0.12	60.42	0.977	22.55	1.46	0.939

Por otro lado, se requiere de un análisis cinético para obtener una visión de la velocidad de adsorción y de la etapa limitante del mecanismo de transporte, que se utiliza principalmente en el modelado, y en el diseño del proceso. Las ecuaciones cinéticas correspondientes a pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y la ecuación Elovich [24] fueron testeadas con los datos experimentales.

El modelo cinético de pseudo primer orden integrado, está dado por:

$$\ln\left(\frac{Q_e}{Q_e - Q}\right) = k_1 t \quad (9)$$

donde Q es la cantidad de metal adsorbido en cualquier momento t (mg/g), Q<sub>e</sub> es la cantidad de metal adsorbido en el tiempo de equilibrio (mg/g) y k<sub>1</sub> es la constante de velocidad (min<sup>-1</sup>):

La cinética de pseudo- segundo orden, se representa en forma integrada por:

$$\frac{t}{Q} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} t \quad (10)$$

donde k<sub>2</sub> es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden.

La ecuación de Elovich, se utiliza en los procesos de adsorción químicos y es adecuada para sistemas con superficies adsorbentes heterogéneas según:

$$Q = \beta \ln(\alpha\beta) + \beta \ln t \quad (11)$$

donde Q es la cantidad de metal adsorbido en un tiempo t, α es la velocidad de adsorción inicial (mg g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>), y β es la constante de Elovich.

La Tabla 3 muestra los parámetros obtenidos al aplicar las cinéticas de pseudo primer orden, pseudo-segundo orden y Elovich para la adsorción de cromo utilizando las MQS obtenidas.

Para QS los estudios cinéticos indicaron una rápida eliminación de cromo de las soluciones acuosas. El análisis de la cinética de la adsorción mostró

que el modelo cinético de pseudo-segundo orden fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales (Tabla 3).

**Tabla 3. Parámetros cinéticos para Cr (VI) adsorbido en micro/nana partículas de quitosano**

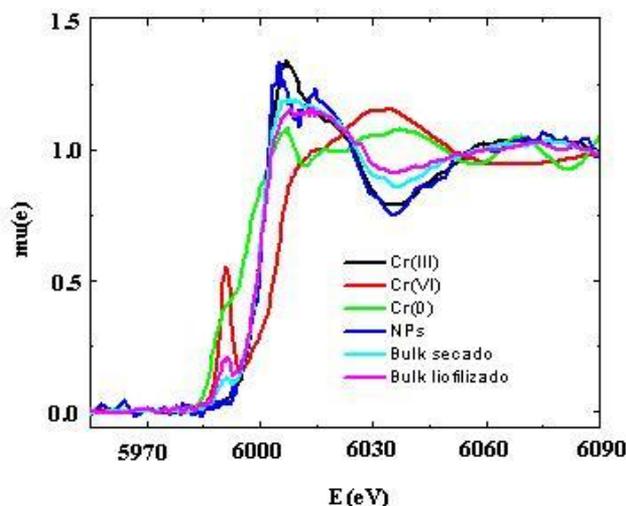
	Pseudo-Primer Orden		Pseudo-Segundo Orden		Elovich		
	$k_1(\text{h}^{-1})$	$R^2$	$k_2(\text{g/mgh})$	$R^2$	$\beta(\text{g/mg})$	$\alpha(\text{mg/gh})$	$R^2$
MQS	1.94	0.932	0.078	0.946	0.10	116.8	0.877

### 2.3. Análisis del estado de oxidación del cromo adsorbido

Se observó que en las MQS se producía un viraje del color anaranjado (característico del Cr(VI)) al verde (característico del Cr(III)) lo que hizo suponer que las MQS estarían actuando, además, como agente reductor del cromo hexavalente. Con el fin de determinar el estado de oxidación de los iones de cromo adsorbidos en MQS se llevaron a cabo experimentos de desorción a temperatura ambiente. La concentración de Cr (VI) resultante en la solución desorbente se determinó mediante análisis espectrofotométrico por la reacción del Cr (VI) con 1.5-difenilcarbazida en solución fuertemente ácida. El complejo coloreado se midió a 540 nm usando un espectrofotómetro Hewlett-Packard HP 8452a. La concentración de Cr (III) se calculó a partir de la diferencia entre las concentraciones de Cr (VI) y el Cr total. Para determinar la concentración total de Cr [Cr (III) + Cr (VI)], la solución de desorción se oxidó primero a Cr (VI) con persulfato de amonio 98%, en condición ácida a 100°C, utilizando  $\text{AgNO}_3$  como catalizador. Paralelamente, las MQS, después del proceso de adsorción, se separaron por centrifugación, se liofilizaron y se analizaron mediante Espectroscopía de Absorción de Rayos X XANES (“X-ray absorption near edge structure”, análisis del espectro en la cercanía del borde de absorción) en un Equipo Rigaku R-XAS. Asimismo se obtuvieron los espectros infrarrojos de las MQS antes y después del proceso de adsorción en un equipo de Espectroscopía Infrarroja-FTIR con accesorio ATR. Los análisis químicos de desorción indicaron que, utilizando quitosano reticulado (MQS), más del 60% del cromo adsorbido se redujo a Cr (III). Esto indica que las micro/nanopartículas de quitosano reducen Cr (VI) a Cr (III). En la remoción de Cr (VI) y reducción a Cr (III), existen dos mecanismos uno de reducción directa y otro de reducción indirecta, en esta última se produce la unión del Cr (VI) en su forma aniónica a grupos cargados positivamente en la superficie del material y luego la reducción de Cr (VI) a Cr (III) por grupos dadores de electrones adyacentes. Las partículas MQS reticuladas utilizadas como adsorbentes no sólo actúan como donadores de electrones para la reducción de Cr (VI) a Cr (III) sino que también actúan como sitios activos para la adsorción de Cr (III). El Cr (III) se encuentra adsorbido en la superficie de las MQS a partir de la atracción de grupos amino y la precipitación de Cr (III).

La Fig.9 muestra los espectros obtenidos por la técnica de XANES (X-ray absorption near edge structure) para diferentes muestras de QS y MQS que

removieron Cr (VI) de aguas residuales. Se puede observar que los espectros de las muestras de referencia para el Cr (III) (línea negra) y el Cr (VI) (línea roja) son bien diferentes. El espectro para el Cr (III) carece del pico agudo cercano a los 5990 eV que es característico del Cr (VI). La ausencia de este pico en la muestra de micropartículas MQS (NPs, línea azul) indica que el Cr (VI) no está presente en el quitosano reticulado luego de la remoción de cromo de las aguas residuales. En cambio, en las muestras de QS sin modificar se puede observar ese pico, indicando la presencia de Cr(VI).



**Fig. 9.** Espectro XANES para muestras de quitosano en contacto con aguas residuales con Cr (VI). Se detallan las distintas muestras: muestras de referencia (Cr(0), línea verde; Cr(III), línea negra y Cr(VI), línea roja); muestras de QS no reticulado (bulk secado, línea celeste y bulk liofilizado, línea rosa) y MQS (NPs, línea azul)

La cuantificación de Cr(III) en las MQS, en relación a las muestras de referencia de Cr(III), indicó que el 98% del cromo presente estaba como Cr(III). Por lo tanto se puede concluir que ambas técnicas utilizadas demostraron la presencia de Cr(III) en las MQS. La diferencia, en la concentración de Cr(III), encontrada entre los análisis de desorción y la medición por XANES, puede atribuirse a que los análisis químicos se realizaron después de un solo ciclo de desorción; de acuerdo con Sankararamakrishnan y col [25], son necesarios cerca de 10 ciclos para lograr que más de un 85% del cromo sea desorbido. Ellos demostraron que para dos ciclos sólo se desorbe menos de un 65%, en concordancia con los resultados encontrados.

## 2.4. Estudios de adsorción de Cromo hexavalente en sistemas continuos

En los sistemas continuos constantemente se introduce a la columna la solución de alimentación, llevándose a cabo el proceso de transferencia de masa entre una fase móvil y otra que se encuentra fija. Por lo general el sistema continuo es de mayor aplicación a nivel industrial [21,22]. Durante el proceso de adsorción,

en lecho fijo cuando el agua residual fluye a través de la columna, los contaminantes se van separando gradualmente y el agua residual se va purificando progresivamente. En la columna se forma una zona de transición en la cual la concentración de contaminante varía desde un máximo, al inicio de la zona, hasta prácticamente cero en la parte final de la misma. Esta zona es la porción activa de la columna, y se denomina "zona de adsorción" (Fig. 10). El movimiento progresivo de la zona de adsorción, desde el inicio de la columna al comienzo de su funcionamiento, hasta el final de la misma cuando el adsorbente se encuentra saturado, puede analizarse mediante la representación de las llamadas "curvas de ruptura". Es de particular interés también, el tiempo empleado por el sistema para alcanzar la concentración máxima permitida del contaminante a la salida de la columna, denominado tiempo de ruptura.

En función de los datos obtenidos en ensayos realizados en batch (Dima y col, [2]) se diseñó una columna de 20 cm de alto por 2 cm de diámetro en la que se introdujeron las partículas de quitosano. Por medio de bombeo, se realizó el pasaje continuo de Cr(VI) a pH 4 y 90 ppm de concentración inicial, a través del lecho las partículas de quitosano desde la parte inferior de la columna.

Se realizaron a nivel de laboratorio diversos experimentos variando caudales (3 y 5.8 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>), y utilizando diferentes alturas del lecho (0.7, 1.5 y 2 cm). A intervalos regulares de tiempo, se tomaron alícuotas del fluido a la salida del lecho de quitosano, con el propósito de determinar el contenido de Cr (VI) en el efluente.

La concentración se determinó mediante análisis espectrofotométrico por la reacción del Cr(VI) con 1,5-difenilcarbazida en solución fuertemente ácida. El complejo coloreado se midió a 540 nm utilizando un espectrofotómetro.

Se evaluó el efecto de la altura del lecho adsorbente, y el flujo volumétrico, sobre el tiempo de ruptura y la capacidad de adsorción del quitosano.

Para la columna empacada con partículas de quitosano, se determinó el tiempo de ruptura (tb) como el lapso transcurrido hasta que la concentración del Cr(VI) en la corriente de salida de la columna alcanzaba un 10% del valor de la concentración de entrada, es decir C/Co= 0.1

La cantidad de cromo adsorbido (mg) por masa de adsorbente (g) en el punto de ruptura de la columna qb, (mg g<sup>-1</sup>), se puede calcular empleando la Ec. (12):

$$q_b = \frac{Q_v t_{10\%} C_o}{1000m} \quad (12)$$

donde: Co es la concentración de cromo (VI) a la entrada a la columna (mg L<sup>-1</sup>) o (ppm) , t<sub>10%</sub> es el tiempo de ruptura (min), Q<sub>v</sub> es el flujo volumétrico (cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>), m es la masa de adsorbente (g) y el valor de 1000 corresponde a un factor de conversión.

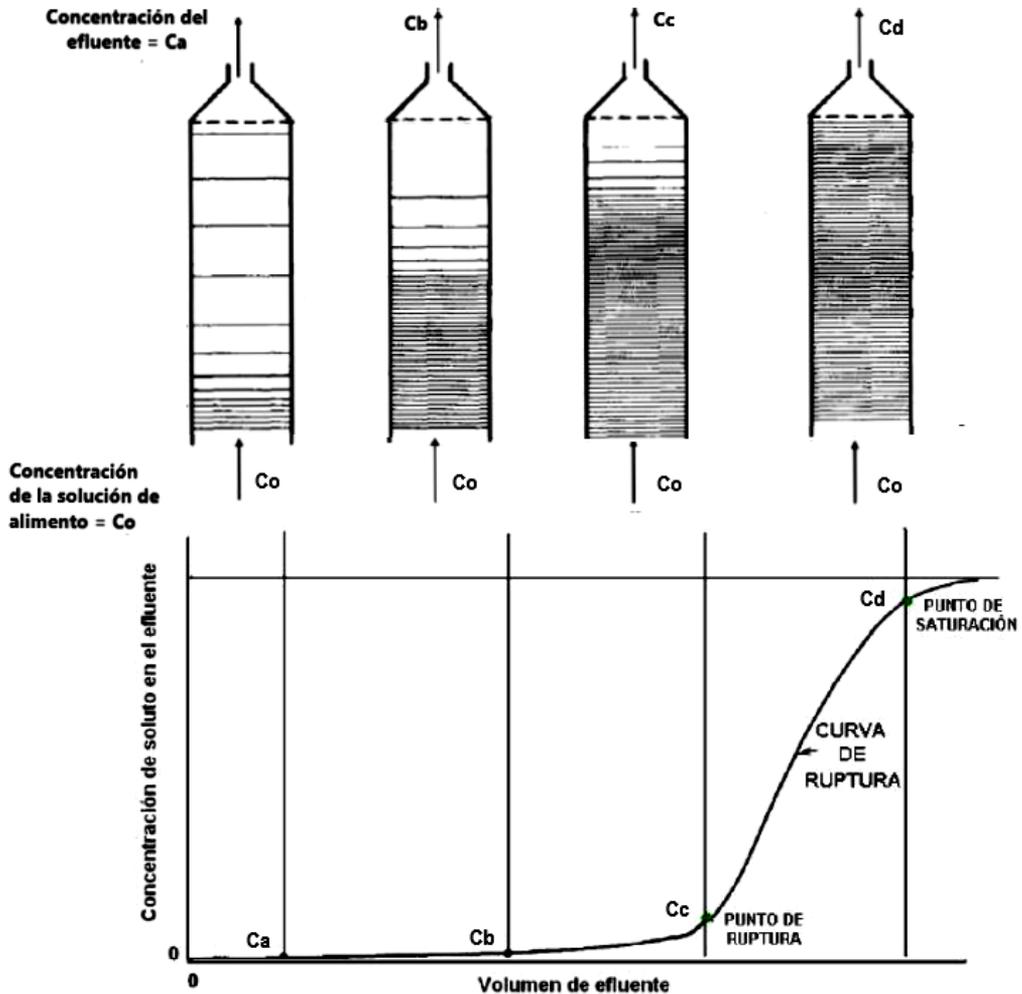


Fig. 10. Esquema del frente de adsorción y curva de ruptura en columna de adsorción de lecho fijo

### 2.4.1. Curvas de adsorción de Cromo hexavalente en columna

La Fig. 11 muestra las curvas de ruptura experimentales para una concentración de alimentación de Cr (IV) de 90 ppm, para dos caudales estudiados (3 y 5.8 cm<sup>3</sup>/min) y tres alturas de lecho (0.7, 1.5 y 2 cm).

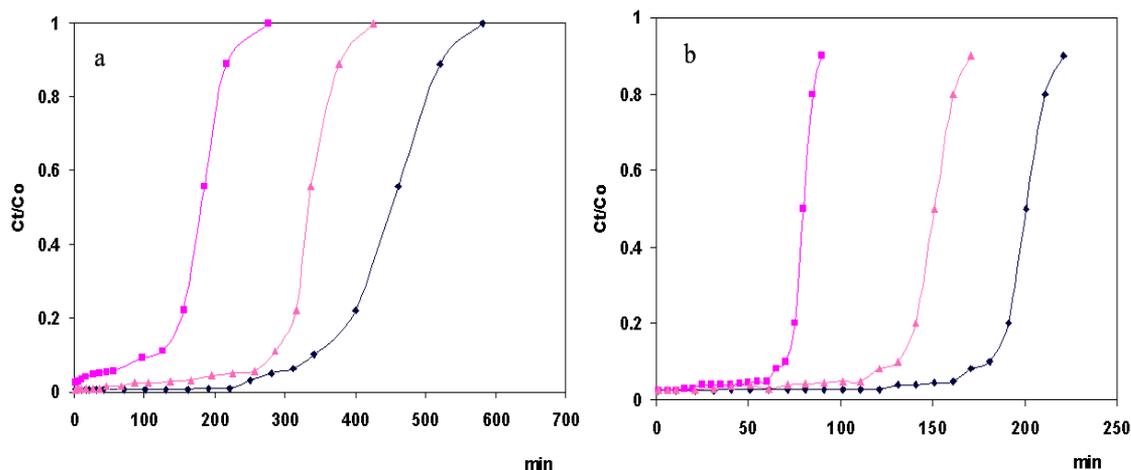


Fig 11. Curvas experimentales que muestran el efecto de la altura de la columna sobre las curvas de ruptura de Cr(VI) en partículas de quitosano a dos diferentes caudales (a)  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$  y (b)  $5.8 \text{ cm}^3/\text{min}$  para una concentración a la entrada de Cr(IV) de 90 ppm. Alturas de lecho: (■)  $0.7 \text{ cm}$ , (▲)  $1.5 \text{ cm}$ , (◆)  $2 \text{ cm}$ .

En la Tabla 4 se pueden observar los cálculos realizados para diferentes condiciones de operación variando la altura del lecho y el caudal volumétrico, a partir de las curvas experimentales obtenidas. Se puede observar que el tiempo de ruptura  $t_b$  disminuyó con el aumento del flujo volumétrico y se incrementó con la altura del lecho, en concordancia con resultados de Biswas y col [27] y Goel y col [28]. El quitosano mostró valores altos de  $q_b$ , reflejando una buena capacidad de adsorción; asimismo, no se observó un cambio apreciable en la capacidad de adsorción del adsorbente en función de las variables estudiadas; resultados similares fueron reportados por Goel y col [28] para una columna de carbón activado. Con el fin de modelar los resultados experimentales obtenidos de la adsorción de Cr (VI) sobre quitosano en sistemas continuos se aplicaron las ecuaciones correspondientes a los modelos de Yoon-Nelson, Thomas y Bohart-Adams [22,29,30].

El modelo de Thomas (Ec. 13) se suele usar para determinar la capacidad de adsorción de una columna asumiendo una cinética reversible de segundo orden y la isoterma de adsorción de Langmuir. Teóricamente es adecuado para estimar el proceso de adsorción cuando la resistencia externa a la transferencia de materia y la difusión interna son muy pequeñas [26,27,28,29].

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = \frac{K_{TH} q_0 m}{v} - K_{TH} C_0 t \quad (13)$$

donde  $K_{TH}$  ( $\text{mL} / \text{min mg}$ ) es la constante de velocidad de Thomas,  $q_0$  ( $\text{mg} / \text{g}$ ) es la capacidad de adsorción,  $v$  es el caudal volumétrico ( $\text{mL}/\text{min}$ ) y  $m$  es la masa ( $\text{g}$ ) del adsorbente en la columna [30].

**Tabla 4. Condiciones operativas de la columna y valores de  $q_b$  calculados con la Ec (12) para diferentes alturas de lecho, masa del adsorbente y caudales, correspondientes a una concentración de entrada de  $C_0= 90$  ppm de Cr (VI)**

Altura lecho (cm)	$t_b$ (min)	$Q_v$ (cm <sup>3</sup> /min)	$m$ (g)	$q_b$ (mg/g)
2	341	3	0.78	118.0
1.5	260	3	0.42	167.1
0.7	96	3	0.23	112.7

Altura lecho (cm)	$t_b$ (min)	$Q_v$ (cm <sup>3</sup> /min)	$m$ (g)	$q_b$ (mg/g)
2	151	5.8	0.78	101.5
1.5	121	5.8	0.42	150.3
0.7	67	5.8	0.23	152.0

La ecuación de Yoon y Nelson (Ec. 14) relaciona, la concentración adimensional con el tiempo de operación mediante dos parámetros  $K_{YN}$  y  $\tau$  correspondientes a la constante cinética y al tiempo para retener el 50% del cromo inicial, respectivamente [27,28,29,30]

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right) = K_{YN}t - K_{YN}\tau \quad (14)$$

donde  $K_{YN}$  es la constante de velocidad en (min<sup>-1</sup>),  $\tau$  es el tiempo requerido para retener el 50% del adsorbato y  $t$  es el tiempo de proceso (min).

Bohart y Adams desarrollaron una ecuación que describe la relación entre  $C_t/C_0$  y  $t$  en un sistema de flujo continuo de adsorción. El modelo se estableció suponiendo que el equilibrio del proceso de adsorción no es instantáneo y la velocidad de adsorción es proporcional tanto a la capacidad residual del adsorbente como a la concentración del adsorbato en el fluido [27,28,29,30].

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{BA} C_0 t - k_{BA} N_0 \left(\frac{z}{U_0}\right) \quad (15)$$

donde:  $k_{BA}$  (L/mg min) es la constante cinética,  $N_0$  (mg/L) es la concentración de saturación,  $z$  (cm) es la profundidad del lecho adsorbente y  $U_0$  (cm/min) es la velocidad lineal definida como la relación entre el caudal volumétrico (mL/min) y el área de la sección transversal (cm<sup>2</sup>) de la columna.

En la Tabla 5 se observan los parámetros obtenidos de los modelos ajustados a partir de las curvas experimentales.

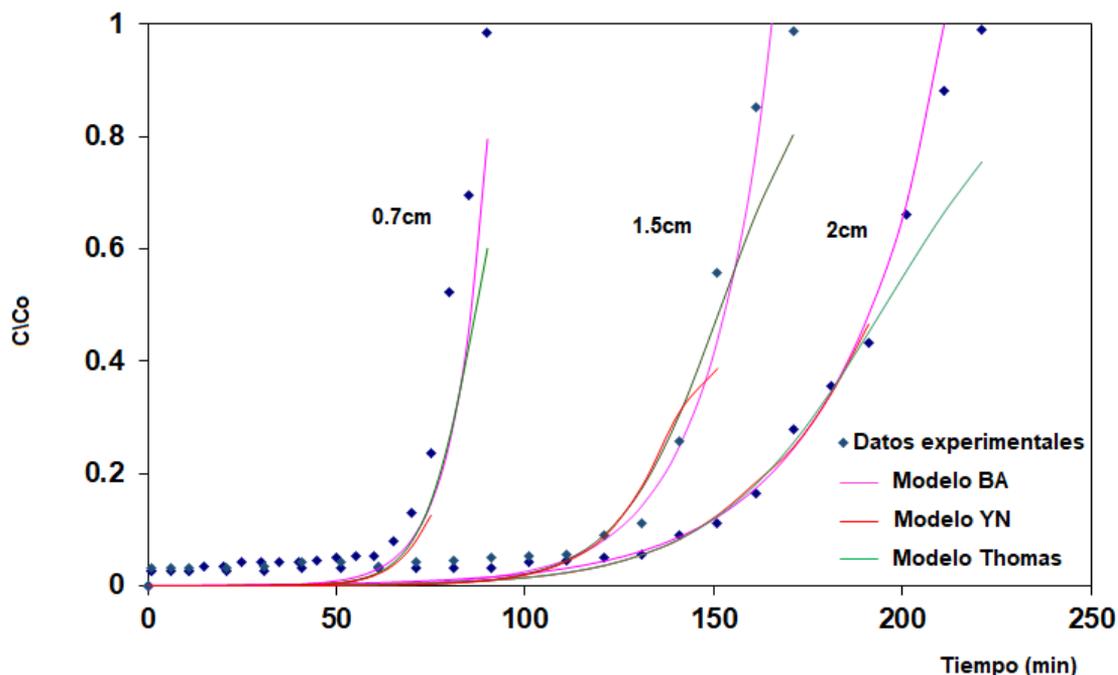
En la Fig.12 se observan los datos experimentales conjuntamente con los modelos matemáticos para las siguientes condiciones de ensayo: flujo volumétrico 5.8 cm<sup>3</sup>/min, concentración inicial 90 ppm y alturas de lecho de 0.7, 1.5 y 2 cm.

Los tres modelos presentaron un buen grado de ajuste, con R<sup>2</sup> entre 0.90 y 0.98. Para el modelo de Thomas se observó una disminución de la capacidad de adsorción (q<sub>0</sub>) a medida que aumentaba la altura de la columna para los caudales ensayados; resultados similares fueron reportados por Biswas, [27]. El aumento de K<sub>TH</sub> cuando se incrementó el caudal puede atribuirse a la disminución de la resistencia al transporte de masa [29].

Según el modelo de Yoon-Nelson, el coeficiente K<sub>YN</sub> aumentó con el incremento el caudal circulado mientras que el tiempo τ disminuía [27]. El modelo de Bohart-Adams fue el que mejor ajustó a los datos experimentales de la columna, reproduciendo de forma apropiada la curva de ruptura. La capacidad de adsorción volumétrica, N<sub>0</sub>, disminuyó al aumentar la altura de relleno, mientras que la constante, k<sub>BA</sub> aumentó con el caudal circulado (Tabla 5).

**Tabla 5. Coeficientes obtenidos de los modelos ajustados a las curvas experimentales (Co = 90ppm)**

Caudal cm <sup>3</sup> /min	Altura de columna cm	Yoon - Nelson			Thomas			Bohart-Adams		
		K <sub>YN</sub> min <sup>-1</sup>	τ min	R <sup>2</sup>	K <sub>TH</sub> mL/mg min	q <sub>0</sub> mg/g	R <sup>2</sup>	k <sub>BA</sub> mL/mg min	N <sub>0</sub> mg/mL	R <sup>2</sup>
3	0.7	0.012	285	0.95	0.187	359.3	0.96	0.170	29.881	0.94
3	1.5	0.017	304	0.96	0.188	196.6	0.99	0.168	22.077	0.97
3	2	0.017	402	0.98	0.183	151.0	0.90	0.166	19.420	0.96
5.8	0.7	0.144	110	0.95	1.598	205.4	0.95	1.250	21.859	0.98
5.8	1.5	0.074	183	0.92	0.817	190.1	0.92	0.627	18.221	0.95
5.8	2	0.044	198	0.98	0.490	131.0	0.98	0.360	17.666	0.98



**Fig 12.** Columna de adsorción de lecho fijo no estacionaria: Datos experimentales y modelos matemáticos para diferentes alturas de lecho, 0.7, 1.5 y 2 cm, caudal volumétrico de  $5.8 \text{ cm}^3/\text{min}$  y concentración inicial de Cr(VI) de 90 ppm.

## CONCLUSIONES

Se obtuvo quitina y quitosano de exoesqueletos de desechos de la industria pesquera del langostino y cangrejo patagónico. El quitosano fue caracterizado a través de su grado de desacetilación y peso molecular. Se sintetizaron MQS utilizando tripolifosfato de sodio como agente reticulante que confiere estabilidad al quitosano a bajo pH. Se realizaron estudios de adsorción de Cr (VI) sobre QS en sistemas discontinuos (batch) y en sistemas continuos (columnas de adsorción no estacionarias). Para los sistemas discontinuos se evaluó la capacidad de adsorción del Cr (VI) en QS y MQS bajo diferentes condiciones de pH, tiempo de contacto, y concentración Cr (VI) inicial. Para los estudios en batch la isoterma de equilibrio de Langmuir y el modelo cinético de pseudo-segundo orden proporcionaron la mejor correlación de los datos experimentales. La capacidad máxima de adsorción dada por la ecuación de equilibrio de Langmuir para sistemas discontinuos fue de  $230 \text{ mg/g}$  para una concentración inicial de Cr de 90 ppm.

Para los sistemas continuos se evaluó el efecto de la altura del lecho adsorbente, y el flujo volumétrico, sobre el tiempo de ruptura y la capacidad de adsorción del quitosano. Se evaluó el ajuste de los modelos matemáticos de Thomas, Yoon-Nelson y Bohart-Adams, para predecir el comportamiento dinámico de la columna y obtener los parámetros cinéticos correspondientes. El modelo de Bohart- Adams fue el que mejor ajustó las curvas de ruptura en columnas. Los datos experimentales mostraron que la capacidad de adsorción en la columna ( $q_b$ ),

según las condiciones del proceso continuo variaron entre 101 y 167 mg/g. Estos valores resultaron más bajos que en el caso del estudio en batch lo cual puede atribuirse, a que en sistemas discontinuos se alcanzan las condiciones de equilibrio y además, la agitación permanente proporciona una mejor interacción entre los sitios activos del adsorbente y el cromo, lo cual favorece la velocidad de transferencia de masa y, por lo tanto, la mayor retención.

Por otra parte, es interesante destacar que se analizó el estado de oxidación del cromo adsorbido sobre las micropartículas de QS reticuladas con tripolifosfato y sobre partículas de quitosano sin modificar; para ello se aplicaron técnicas de desorción química de cromo y técnicas de espectroscopía de absorción de rayos X (XANES). Los resultados obtenidos permiten concluir que la utilización de MQS reticuladas con TPP adsorbieron las especies aniónicas de Cr (VI) con eficiencia a bajos pH y que además en dicha matriz se produce la reducción del Cr (VI) adsorbido a Cr(III) de menor toxicidad. La adsorción utilizando QS como adsorbente representa una alternativa tecnológica natural y económica para remover metales pesados de soluciones acuosas.

Cabe señalar que se están realizando gestiones a diversos niveles para tratar que se instale una planta de producción de quitosano en la zona de generación de los residuos de la industria pesquera.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de este trabajo al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), a la Universidad Nacional de La Plata, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), al Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA) y al Instituto de Biología de Organismos Marinos (IBIOMAR CCT - CONICET-CENPAT)

## REFERENCIAS

- [1] C.A. Covas. Estudios sobre quitina y quitosano. Universidad de La Habana -Cuba. 2006.
- [2] J.B. Dima, C. Sequeiros & N. E. Zaritzky. *Chemosphere* 141 (2015).
- [3] S. Hena, *J Hazard Mater* 181.1-3 (2010)
- [4] L. Zhou, Y. Wang, Z. Liu, Q. Huang, *J Hazard Mater* 161.2-3 (2009)
- [5] R. Hamamura, N. Valderrama Negrón, A. Alarcón Cavero, H. & A. López Milla. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(4), (2010).
- [6] A. Grenha, B. Seijo, & C. Remunán-López, *Eur J Pharm Biopharm Sci* 25.4-5 (2005)
- [7] D. Wei, W. Sun, W. Qian, Y. Ye, and X. Ma. *Carbohydr Res* 344, 17 (2009)
- [8] Z. Mármol, E. Gutiérrez, G. Páez, J. Ferrer & M. Rincón. *Multiciencias* 4, 2 (2004).
- [9] K. Kurita, *Marine Biotechnology*, 8(3), (2006).

- [10] M.T., Yen, J. H. Yang & J. L. Mau. *Carbohydr Polym* 75, 1 (2009)
- [11] M. L. Tsaih, M. Larng & R. H. Chen, *J Appl Polym Sci* 88,13 (2003)
- [12] L.F., Del Blanco, M. S. Rodriguez, P. C. Schulz & E. Agullo. *Colloid Polym Sci* 277, (1999).
- [13] H. Hernández Cocolletzi, E. Águila Almanza, O. Flores Agustin, E. L. Viveros Nava & E. Ramos Cassellis. *Superficies y vacío* 22, 3 (2009)
- [14] P. Broussignac, *Chim. Ind. Genie Chim* 99, 9 (1968).
- [15] L. Parada, G. Crespín, R. Miranda & I. Katime. *Revista iberoamericana de polímeros* 5, 1 (2004)
- [16] J. Brugnerotto, J. Lizardi, F. M. Goycoolea, W. Argüelles-Monal, J. Desbrieres & M. Rinaudo. *Polymer* 42, 8 (2001)
- [17] M. Rinaudo, M. Milas V & P. Le Dung. *Int J Biol Macromol* 15, 5 (1993).
- [18] P. Calvo, C. Remunan-Lopez, J. L. Vila Jato & M. J. Alonso. *J Appl Polym Sci* 63, 1 (1997)
- [19] K. Yu, J. Ho, E. McCandlish, B. Buckley, R. Patel, Z. Li & N. C. Shapley. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* 425 (2013).
- [20] W.W, Ngah, L.C Teong & M. A. K. M. Hanafiah. *Carbohydr Polym* 83, 4: 1446-1456 (2011).
- [21] J.S.V Ríos & G.C. Castellar Ortega. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* ,66, 141-158. (2013)
- [22] Z. Xu, J. Cai & B. Pan. *J Zhejiang Univ Sci A* 14, 3 (2013)
- [23] R. Schmuhl, H. M. Krieg & K. Keizer. *Water SA* 27.1 (2001)
- [24] Y Sağ, & Y. Aktay *Biochem Eng J* 12, 2 (2002).
- [25] N. Sankararamakrishnan, A. Dixit, L. Iyengar &, R. Sanghi. *Bioresour Technol* 97, 18 (2006).
- [26] M.S. Sivakami, T. Gomathi, J. Venkatesan, Hee-Seok Jeong, Se-Kwon Kim & P. N. Sudha. *Int J Biol Macromol* 57 (2013).
- [27] S. Biswas, & U. Mishra. *Journal of Chemistry* (2015).
- [28] N.K. Goel, V. Kumar, N. Misra, & L. Varshney. *Carbohydr polym* 132 (2015)
- [29] M. Bhaumik, K. Setshedi, A. Maity, & Maurice S. Onyango, *Sep Purif Technol* 110 (2013)
- [30] J. Lara, C. Tejada, Á. Villabona, A. Arrieta & C. Granados Conde. *Revista ION (Investigación, optimización y nuevos procesos en ingeniería)* 29,2 (2016).

## GESTIÓN INTEGRAL DE PILAS Y BATERÍAS

*Natalia Cruz, Nadia Mazzeo, Ana Muzlera y Adriana Rosso\**

*Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
[adrosso@inti.gob.ar](mailto:adrosso@inti.gob.ar)*

### Resumen

El objetivo de este trabajo es abordar la problemática de pilas y baterías eléctricas en desuso en Argentina. A la vez, se busca establecer lineamientos básicos para mejorar la gestión actual. Una pila eléctrica es un dispositivo donde la energía química se transforma en energía eléctrica a través de reacciones de óxido-reducción simultáneas. Esta reacción química puede ser o no reversible e involucrar diversos elementos (Cd, Cr, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Zn) que revisten mayor o menor grado de peligrosidad para el ambiente y la salud. En Argentina no se producen pilas y baterías. Éstas ingresan al país a través de la importación. Sin embargo, la gestión de estas pilas y baterías una vez terminada su vida útil debe realizarse en el país según la normativa vigente. Se considera que una gestión adecuada debe tener en cuenta la jerarquía de residuos (generación, disposición inicial y recolección diferenciadas, tratamiento y disposición final), quedando la eficiencia de sus últimas etapas condicionada por las primeras. Para alcanzar este tipo de gestión muchos países han implementado sistemas de responsabilidad extendida del productor. Para su aplicación es imprescindible consensuar entre todos los actores involucrados un plan de gestión integral que impulse una economía circular aplicada al mercado de pilas y baterías a nivel regional.

*Palabras clave:* contaminación, gestión ambiental, residuos especiales.

### Abstract

**Integral management of batteries.** The objective of this article is to focus on the problem of waste management of electric batteries in Argentina. At the same time, it is intended to establish basic guidelines to improve current management. An electric battery is a device where chemical energy is transformed into electrical energy through simultaneous oxide-reduction reactions. These chemical reactions may be reversible or not and involve diverse elements (Cd, Cr, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Zn) carrying different hazard levels for the environment and health. There is no production of batteries in Argentina. They enter to the country through importation. Nevertheless, their management after their use life must be done in the country according to the current legislation. An adequate management must consider waste hierarchy (segregated

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío generation, initial disposition and differentiated collection, treatment and final disposition), where the efficiency of the last steps depends on the efficiency of the first ones. To achieve this kind of management level, many countries have implemented extended responsibility systems for the producers. For its application, it is essential to reach an agreement between all stakeholders in an integral action plan which encourages the circular economy in the batteries market at a regional scale.

*Key words:* pollution, environmental management, special waste

## INTRODUCCIÓN

### Características y funcionamiento

Una pila eléctrica es un dispositivo que está compuesto por varias celdas electroquímicas donde, a través de reacciones de óxido-reducción simultáneas, la energía química se transforma en energía eléctrica. Cuando los componentes no pueden volver a su forma original, una vez consumida la energía, se denominan pilas primarias o no recargables (PyB primarias); mientras que si las características químicas pueden ser reconstituidas se llaman pilas secundarias, pilas recargables, baterías o acumuladores (PyB secundarias) [1].

Una celda electroquímica está compuesta por dos electrodos (también llamados hemiceldas), generalmente metálicos, conocidos como ánodo (polo negativo) y cátodo (polo positivo) sumergidos en un electrolito (Fig. 1). Cada hemicelda está caracterizada por su potencial de reducción y lo que se mide es la diferencia entre los potenciales de ambas. Esa diferencia es la fuerza electromotriz que caracteriza a cada PyB.

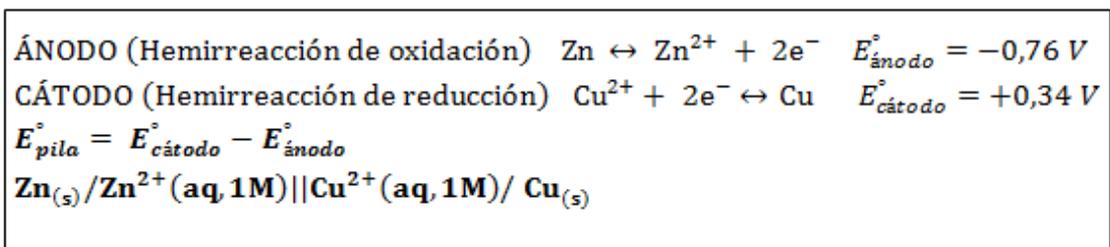


Fig. 1. Notación de una pila tipo

### Fundamentos de pilas y baterías secundarias: el caso de las baterías de ion-litio.

Una batería de ion-litio es una PyB secundaria que contiene varias celdas. Comúnmente, el cátodo está constituido por un óxido de metal-litio, el cual recibe iones litio desde el ánodo durante la utilización de la batería (se reduce), mientras que, durante la recarga, el cátodo emite iones que recibe el ánodo (se oxida).

El electrolito contiene una sal de Li de alta pureza ( $\text{LiPF}_6$ ,  $\text{LiBF}_4$ ) disuelta en un solvente orgánico dipolar aprótico (por ejemplo, carbonato de etileno y dimetilcarbonato). El separador es una membrana polimérica microporosa que permite el pasaje de los iones de Li y previene cortocircuitos entre el ánodo y el cátodo.

## 1. Marco legal

### 1.1. Normativa nacional

#### 1.1.1. Constitución Nacional (CN).

La reforma constitucional del año 1994 establece en su Artículo (art.) 41 el **derecho a un ambiente sano**, equilibrado y apto para el desarrollo humano presente y futuro. En ese mismo artículo, la CN da forma al instrumento de “**Leyes de Presupuestos Mínimos**” que serán sancionadas por el gobierno nacional y complementadas por las provincias en sus jurisdicciones. Así, el gobierno nacional establece los preceptos de base y uniformes para cumplir con el derecho a un ambiente sano y asegurar la protección ambiental.

#### 1.1.2. Ley 23.922 Aprobación del Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación (1991) (Decreto 662/1991).

Establece qué residuos son considerados peligrosos y pueden ser parte de un **movimiento entre países** (importación, exportación o tránsito), así como cuáles son los **procedimientos** a seguir en cada caso. Por último, establece qué desechos es necesario controlar y cuáles requieren una consideración especial, así como las características que se consideran peligrosas. Entre los que necesitan control se encuentran los desechos que contengan compuestos de Cromo (Cr), Zinc (Zn), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb), componentes habituales de algunos tipos de pilas, baterías y acumuladores (PByA).

#### 1.1.3. Ley 24.051 Residuos Peligrosos (1992) (Decreto 831/93).

Define como residuo peligroso a “todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua o el ambiente en general”. También prohíbe la importación, introducción o transporte de todo tipo de residuos provenientes de otros países al territorio nacional, sus espacios aéreo y marítimo. A su vez, define en sus anexos qué residuos se consideran peligrosos y qué características son peligrosas. Las PByA son considerados residuos peligrosos por poseer entre sus componentes: Cr; Zn; Cd; Hg; Pb; soluciones ácidas/básicas o ácidos/bases en forma sólida o disolventes orgánicos; así como por tener características de peligrosidad, tales como: toxicidad, ecotoxicidad; corrosión u oxidación.

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

La autoridad de aplicación nacional mantiene actualizado un Registro Nacional de Generadores y Operadores de Residuos Peligrosos, en el que deberán inscribirse las personas físicas o jurídicas responsables de la generación, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos. En cuanto a las **plantas de tratamiento y disposición final** serán consideradas como tales cuando modifiquen las características del residuo eliminando sus propiedades nocivas, recuperen energía o materiales, obtengan un residuo menos peligroso, susceptible de ser recuperado o más seguro para su transporte o disposición final.

Por tratarse de una **ley de adhesión**, las provincias pueden suscribirse de forma parcial o total o bien dictar sus propias leyes, así como tener su propio registro de operadores. La situación actual de cada provincia respecto a residuos peligrosos, entre ellos las PByA, se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1. Situación de cada provincia respecto a la ley 24.051,**

Provincia	Normativa provincial vigente	Registro provincial de operadores	Circulación e ingreso
Buenos Aires	Ley propia: 11.720/1996 Decreto: 806/1997	Sí	-
Catamarca	Ley de adhesión: 4.865/1995 Decreto: 473/2001	Sí	-
Chaco	Ley propia: 3.946/1993 Decreto: 578/2005	Sí	Se permite circulación en rutas específicas.
Chubut	Ley de adhesión: 3.742/1999 Decreto: 1.675/1993	Sí	Permite la circulación, siempre que cumpla con la ley 24.051 y se avise con al menos 10 días de antelación a la autoridad competente. No se permite instalación de plantas de tratamiento para residuos de otras jurisdicciones.
CABA	Ley propia: 2.214 Decreto: 2.020/2007	Sí	Prohibido.
Córdoba	Ley de adhesión: 8.973/2002 Decreto: 2.0149/2003	Sí	Con aviso a la autoridad competente al menos 10 días antes del transporte.
Corrientes	Ley de adhesión: 5.394/1999	-	-
Formosa	Ley de adhesión:	-	-

	1.135/1994		
Jujuy	Ley de adhesión: 5.011/1998	-	-
La Pampa	Ley de adhesión: 1.466/1993	-	-
La Rioja	Ley de adhesión: 6.215/1996	-	-
Mendoza	Ley de adhesión: 5.917/1992 Decreto: 2.625/1999	Sí	-
Misiones	Ley de adhesión: 3.664/2000	-	-
Neuquén	Ley propia: 1.875/1991; 2.267/1998 Decreto: 2.656/1999; 4.468/1998	Sí	Debe estar inscripto en el registro nacional.
Río Negro	Ley de adhesión: 3.250/1998 Decreto: 1.709/1998	Sí	Debe estar autorizado por la autoridad de aplicación.
Salta	Ley propia: 7.070 Cap. II y III. Decreto: 3097/2000 Arts. 185 a 199	Sí	Debe inscribirse el registro provincial según resolución 22/2012.
San Juan	Ley de adhesión: 6.665/1995 Decreto: 1.211/2007	Sí (Resol. 221/2007)	Prohibición.
San Luis	Ley de adhesión: 5.042/1995 Decreto: 1.322/1996	Sí	Con autorización de la autoridad de aplicación.
Santa Cruz	Ley propia: 2.567/1000; 2.703/2004 Decreto: 712/2002	Sí	Prohibición.
Santa Fé	Ley propia: 11.717/2002 CAPÍTULO IX, Arts. 22 y 23 Decreto: 1.184/2002	Sí	Debe existir convenio entre las jurisdicciones
Santiago del Estero	Ley de adhesión: 6.080/1994	-	-
Tierra del Fuego	Ley propia: 105/1993; 958/2014; 119/2015.	Sí	Prohibición.
Tucumán	Ley de adhesión: 6.605/1994	Sí	-

#### **1.1.4. Ley 25.612 Gestión integral de residuos industriales y de actividades de servicios (2002) (Decreto 1342/2002).**

Establece los preceptos para gestión de residuos industriales y de servicios. Fue pensada para reemplazar a la Ley 24.051, pero el artículo que daba esta indicación no fue reglamentado, razón por lo que el reemplazo quedó sin efecto y rigen ambas normas (la Ley 25.916 en sus artículos reglamentados y la Ley 24.051 en toda su extensión). Tiene como **objetivos**: minimizar los riesgos potenciales de los residuos en todas las etapas de la gestión integral; reducir la cantidad generada y promover la utilización y transferencia de tecnologías limpias. Por otro lado, determina que la responsabilidad sobre los residuos no es transmisible a otro.

#### **1.1.5. Resolución 544 (1994).**

Establece que los vendedores de acumuladores eléctricos están obligados a recibir el acumulador usado durante la operación de venta. Para ello deberá contar con un registro de los usuarios que han entregado acumuladores. Su transporte y tratamiento seguirá el curso de lo establecido en la Ley 24.051.

#### **1.1.6. Ley 26.184 Energía portátil (2006) (modificada por la Resolución 244/2018).**

**Prohíbe**, en todo el territorio nacional, la fabricación, ensamblado, comercialización e importación de PyB primarias de carbón-Zn y alcalina de manganeso (Mn) con contenidos en peso mayores a: 0,0005% de Hg; 0,015% de Cd y 0,200% de Pb. A su vez, indica que las PyB deberán: tener fecha de vencimiento, ser herméticas y cumplir con requisitos de duración mínima. El cumplimiento de estos aspectos es certificado por el INTI y otros organismos o instituciones autorizadas por la autoridad de aplicación.

#### **1.1.7. Resolución 522-E/2016 Manejo sustentable de residuos especiales de generación universal (REGU) (2018).**

Establece los objetivos, definiciones y lineamientos para el desarrollo de una estrategia nacional para el manejo sustentable de REGU, dentro de los cuales se encuentran las PyB. En este marco, menciona la **jerarquía de opciones** bajo la cual se deben priorizar las distintas etapas de la gestión de REGU, similar a la de la Ley 25.916: 1) prevenir; 2) reutilizar; 3) recuperar materiales, 4) recuperar energía; 5) tratamiento y 6) disposición final.

### **1.1.8. Resolución 21 Energía eléctrica portátil (2019).**

Modifica el procedimiento de certificación establecido en la Ley 26.184 y la Resolución 14/2007. Obliga a los organismos certificadores, autorizados por la Secretaría de Control y Monitoreo Ambiental, a remitir mensualmente a la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) la información que generen. El procedimiento de certificación implicará una inspección visual, que detecte la presencia de fecha de vencimiento y la realización de ensayos para determinar: contenido de metales pesados, marcado, blindaje y duración mínima.

### **1.1.9. Ley de Responsabilidad Extendida al productor.**

La responsabilidad extendida al productor (REP) es un concepto que surgió en Suiza en 1990. Según postularon Lindhqvist y Lidgren “se trata de un principio político para promover mejoras ambientales en ciclos de vida completos de los sistemas de productos, al extender las responsabilidades de los fabricantes a varias fases del ciclo total de su vida útil y especialmente a su recuperación, reciclaje y disposición final [...]. La REP es implementada a través de instrumentos políticos administrativos, económicos e informativos”. Los ejes fundamentales de la REP son: prevención, equidad intergeneracional, progresividad, responsabilidad (quien contamina paga) y ciclo de vida. Existen dos grupos de objetivos REP. El primero, relacionado con el desarrollo del producto, busca estimular a los fabricantes a invertir en ecodiseños. El segundo, relacionado con el fin de vida del producto, intenta dar un máximo uso a los materiales a través de la recolección, tratamiento, reutilización y reciclaje [2].

En Europa la REP se encuentra ampliamente implementada en varios países e inclusive la Unión Europea ha modificado su directiva de residuos para incorporar este principio (DIRECTIVE (EU) 2018/851). Varios países de Latinoamérica toman este precepto y lo incorporan a leyes destinadas a distintos productos y residuos. Si bien en el país no hay aún una ley de REP, desde distintas instituciones se está avanzando en el desarrollo de un proyecto a presentarse en el Poder Legislativo.

## **1.2. Normativas provinciales relacionadas con pilas y baterías**

**Catamarca - Ley 5368 (2013):** crea el “Programa de Recolección, Tratamiento y Disposición Final de Pilas y Baterías Agotadas”.

**Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Ley 5.991 (2018):** busca garantizar la gestión ambiental de PByA en desuso, considerándolas como RSU de manejo especial. Esta normativa obliga a productores, importadores, distribuidores e intermediarios a hacerse cargo de la gestión en la etapa post-consumo de las PByA, cumpliendo con el principio de REP.

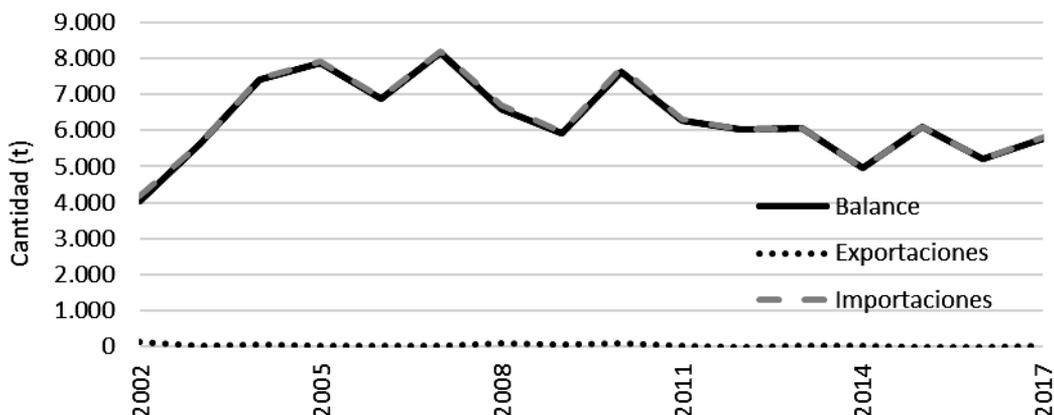
Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

**Salta – Resolución 185 (2014):** dispone que los vendedores de PByA eléctricos de Pb y ácido están obligados a recibir PByA usados de sus clientes durante la operación de venta. Los puntos de venta serán considerados como generadores y deberán cumplir lo determinado en la ley de residuos peligrosos para su transporte y tratamiento.

## 2. Ingresos y egresos de pilas, baterías y acumulaciones

Como todos los bienes provenientes de otros países, las PyB primarias y secundarias que ingresan a Argentina se clasifican según la nomenclatura del Mercosur (NCM). A partir de esta nomenclatura se ingresó a los registros disponibles en el Sistema de Consulta de Comercio Exterior del INDEC [3] y se obtuvieron los ingresos y egresos al país para cada uno de los tipos de PByA y sus residuos (en kg). Se desconoce si estos registros incluyen a las PByA incorporados a otros productos (equipos, juguetes, otros). Durante el período 2002-2017 se importaron en promedio 39.6082 t.año<sup>-1</sup> de estos insumos, mientras que sólo se exportaron 2.244 t.año<sup>-1</sup>, de las cuales 3 t.año<sup>-1</sup> corresponden a residuos. Este promedio no es representativo debido a que los datos durante el periodo analizado son muy variables.

En cuanto a las PyB primarias, no hay prácticamente diferencias entre lo ingresado y el balance remanente en el país (calculado como la diferencia entre las importaciones y las exportaciones de cada año) (Fig. 2). El tipo de PyB primaria más abundante todos los años del período fue “dióxido de manganeso” (MnO<sub>2</sub>) (8506-10) con valores entre 3.947.703kg (2002) y 8.046.784kg (2007). Extrayendo del análisis este tipo de PyB primarias (Fig. 3) las que le siguen en abundancia son las de Li, con un notable aumento en los últimos años del período, llegando a un máximo de 248.060kg en 2017. Las demás PyB primarias presentan cantidades menores, siendo las menos abundantes las de óxido de Hg (HgO), en concordancia con lo establecido por la legislación vigente.



**Fig. 2.** Balance (Importaciones-Exportaciones) de pilas y baterías primarias en Argentina en 2002-2017. Elaboración propia en base a [3].

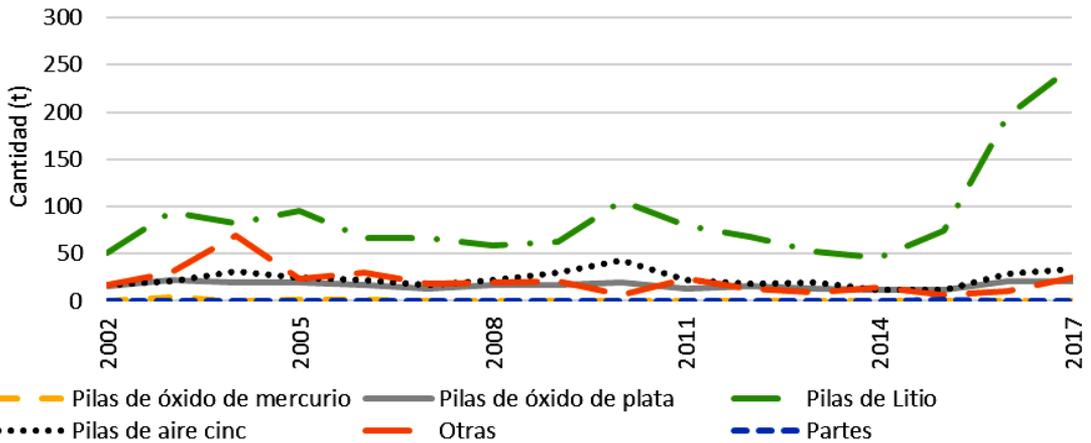


Fig. 3. Balance (Importaciones-Exportaciones) de pilas y baterías primarias por tipo, excluyendo las de dióxido de manganeso, en Argentina en 2002-2017. Elaboración propia en base a [3]

Las PyB secundarias presentaron un mayor grado de exportación que las primarias (Fig. 4). En 2002 un equivalente al 21% de las PyB secundarias que ingresaron al país fueron exportadas, ese porcentaje se redujo a la mitad los años siguientes, llegando a ser sólo un 1% en 2017. En cuanto al balance por tipo de PyB secundaria, las de “de plomo para arranque de motores” presentaron el mayor balance del período con un máximo de 25.816.306kg en 2013 y un mínimo de 6.173.639kg en 2002 (Fig. 5). Les siguen en abundancia otros acumuladores de Pb, con un máximo de 9.366.748kg (2015) y un mínimo de 156.585kg (2002), las “partes de acumuladores” y “otros tipos de acumuladores”. Los demás tipos de PyB secundarias presentan valores máximos anuales menores al millón de kg (Fig. 5)

Por último, los residuos de PyB no presentan ingresos al país, sólo se realizaron exportaciones en algunos años puntuales: 2002-4.105 kg, 2008-40 kg; 2014-16.339 kg, 2016-14.376kg y 2017-10.123kg. Los países receptores de estas PyB fueron Suecia, Francia y Bélgica, quienes implementan tecnologías para el tratamiento de este tipo de residuos.

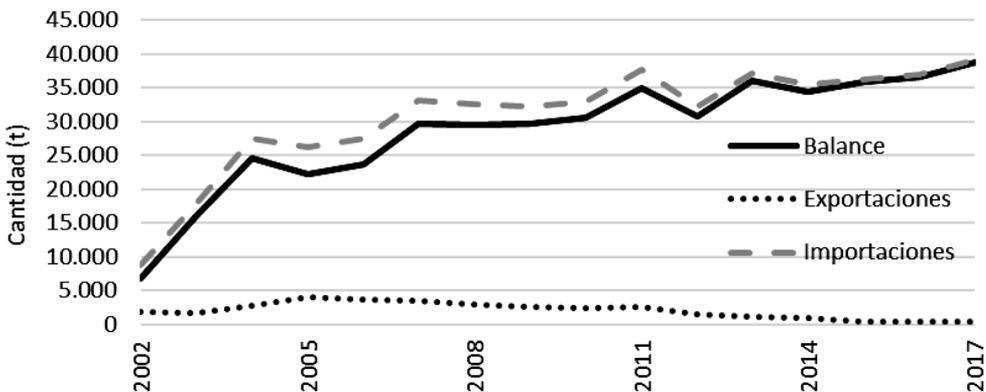
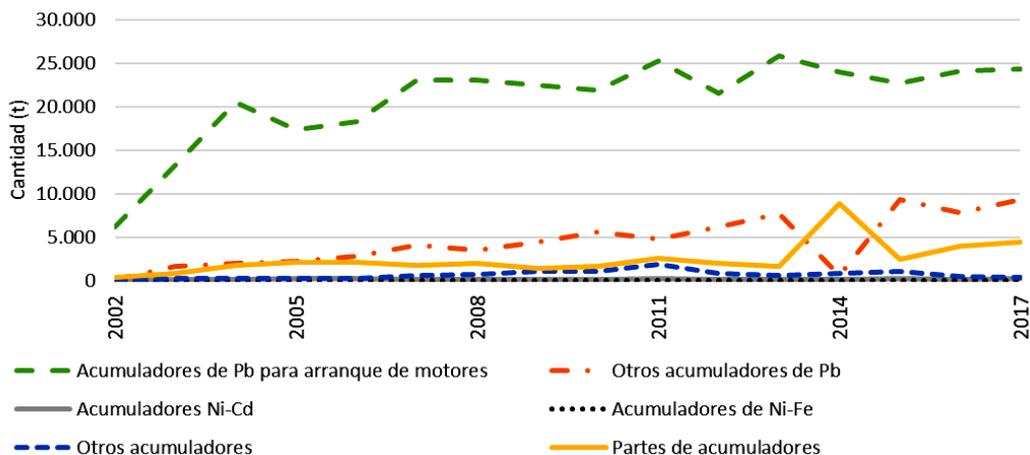


Fig. 4. Balance (Importaciones-Exportaciones) de acumuladores eléctricos (pilas y baterías secundarias) en Argentina en 2002-2017. Elaboración propia en base a [3].



**Fig. 5.** Balance (Importaciones-Exportaciones) de acumuladores eléctricos (pilas y baterías secundarias) según tipo en Argentina en período 2002-2017. Elaboración propia en base a [3]

### 3. Toxicología y peligrosidad

La peligrosidad de las PyB está dada por la toxicidad y concentración de sus componentes y la liberación de éstos al ambiente. Cada tipo de PyB tiene al menos dos metales presentes en dos formas químicas diferentes, como metales puros y como óxidos para permitir las hemirreacciones de óxido-reducción.

#### 3.1. Toxicología

No todas las PyB tienen los mismos elementos potencialmente tóxicos (EPT) y no todos ellos tienen la misma toxicidad, por lo tanto, no todas las PyB pueden recuperarse con la misma tecnología ni son igual de peligrosas para el ambiente: además, no tienen la misma masividad en su utilización. Se comercializan cinco tipos de PyB primarias compuestas por los siguientes minerales: carbón-Zn, alcalinas ( $MnO_2$ ), cloruro de zinc, óxido de plata,  $HgO$ . En Argentina, las más comunes son las alcalinas (97,5%) [3].

Las secundarias, contienen: grafito,  $MnO_2$  o metales como Zn, Li, Ni, Cd, plata y Hg [4]. Éstas representan el 8% del mercado europeo con prevalencia de las de NiCd [5]. En Argentina desde el 2008 a la actualidad, las PyB secundarias representan entre el 80 y el 88 % del mercado [3].

Según informe de la FIUBA, en la CABA las PyB representan el 0,03% de los RSU [6]. En 2009 La CABA envió a disposición final 1.403.856 t de residuos domiciliarios [7] lo que significa que, sólo la CABA, generó más de 42 mil t de PyB domiciliarias, sin contar las automotrices e industriales.

Las PyB no son un elemento contaminante durante su vida útil, por esto y por el uso hogareño que tienen, es que se discute su clasificación como residuos peligrosos y se propone su clasificación como REGU. Cuando las PyB se descartan y

están en contacto con los líquidos presentes en los residuos, los materiales de la cubierta pueden disolverse. Se liberan entonces al ambiente elementos que sufren distintas reacciones químicas dependiendo de la composición del líquido disolvente, pH, potencial redox, etc. Estos elementos pueden llegar a la napa por filtraciones, aún en rellenos sanitarios o por escorrentía y filtraciones en basurales. En rellenos sanitarios que disponen de tecnología para el tratamiento de lixiviados y gases, los EPT aportados por las PyB habitualmente no son eficientemente retenidos y entorpecen los tratamientos biológicos [8]. También los incendios de los basurales, representan un aporte significativo de ETP al aire [9].

### 3.2.Toxicidad de los elementos que componen las pilas y baterías

El **Pb** es una sustancia tóxica que se acumula en el organismo afectando a diversos sistemas, con efectos especialmente dañinos en los niños de corta edad. Se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos, depositándose en estos últimos y en los dientes, donde se acumula paulatinamente con el paso del tiempo. No existe un nivel de exposición al Pb que pueda considerarse seguro [10].

El **Li** en pequeñas dosis es utilizado como medicación de algunas dolencias neurológicas [11]. Sin embargo, en altas concentraciones, es un neurotóxico y nefrotóxico. Es muy soluble en agua por lo que lixivia fácilmente llegando a las aguas subsuperficiales y elevando su concentración en ellas [12].

El **Cd** tiene efectos tóxicos en los riñones y en los sistemas óseo y respiratorio; además, está clasificado como carcinógeno para los seres humanos [13]. La International Agency for Research on Cancer (IARC) concluyó que la inhalación de compuestos de **Ni** es cancerígena para el ser humano y que el Ni metálico es posiblemente cancerígeno [14]. Sin embargo, no hay pruebas sobre el riesgo de carcinogenia derivado de la exposición al Ni por vía oral [15].

El **Hg** es un elemento que está presente de forma natural en el aire, el agua y los suelos. La exposición al Hg (incluso a pequeñas cantidades) puede causar graves problemas de salud. Es tóxico para los sistemas nervioso e inmunitario, el aparato digestivo, la piel, los pulmones, riñones y ojos. Para la Organización Mundial para la Salud, el Hg es uno de los diez productos o grupos de productos químicos que plantean especiales problemas de salud pública (<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>). Es un metal pesado y por lo tanto se bio-acumula en el organismo.

El **Cr** es más o menos tóxico dependiendo de su estado de oxidación (y por lo tanto del medio en el cual se encuentre). El  $Cr^{+3}$  no presenta riesgo, mientras que la inhalación, aún en bajas dosis, de  $Cr^{+6}$  es carcinogénica [16] Su acción sobre la piel, mucosas oculares y nasofaríngeas provoca efectos irritativos crónicos intensos ante su contacto prolongado. Es posible que cause conjuntivitis con

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío lagrimeo y dolor, dermatitis del tipo eczematoso con úlceras características poco dolorosas o sintomáticas o de localización en dedos, manos y antebrazos [17].

### 3.3. Tipo de pila, componentes tóxicos de pilas primarias y porcentaje de componentes tóxicos

Las llamadas “pilas comunes” son las carbono-Zn que contienen carbono y Zn en concentraciones que varían entre el 2 y el 7% de carbono y 14 a 17 % de zinc. Además, contienen Mn, Cd y Hg, este último en concentraciones del 0.05 al 1%. En Argentina, la Ley 26.184 y sus modificatorias prohíben la comercialización e importación de PyB primarias de carbón Zn y alcalinas de MnO<sub>2</sub> con contenido en peso mayor a: 0,0005% de Hg; 0,015% de Cd y 0,200% de Pb. Por lo cual, todas las PyB certificadas por el INTI y otros organismos autorizados por la autoridad de aplicación, revisten una marcada reducción en su riesgo de contaminación. Las PyB secundarias Ni-Cd, contienen hasta un 18% y 20 % de Ni y Cd respectivamente, dos metales pesados peligrosos para la salud [18].

**Tabla 2. Composición porcentual de pilas primarias**

Tipo de pila	Ag	C	Cd	Fe	Hg	Li	MnO <sub>2</sub>	Ni	Pb	Zn
Zn/C (Lenclanché)		7-8	0.01- 0.08	16	<0.01		28-29		0.05	17-20
Zn/Mn (Alcalina)		2-3	<0.025	35-37	<0.025* 0,5-1**		22-23		0.05	13-15
Hg		4		40	30					10-11
Ag <sub>2</sub> O	28-30			40-45	<1					10-11
Zn/aire	1			45	1					30
Li				50-60		2* 10-30**	25			
Ni/Co				20-25				13-15	10	
Pb Acido									65	
Verde (Lenclanché)		8	<0.001	16	<0.0001		28			18-20

Fuente: [13,18]; \*[13]; \*\*[18]

El sistema NiCd es considerado de los más peligrosos para la disposición, aunque en Argentina representa menos del 1% del mercado de PyB secundarias. [3]. Su peligrosidad ha llevado a buscar otras tecnologías. El sistema Ni Metal Hidruro (NiMH) es menos contaminante y podría reemplazar al NiCd en cuanto a sus aplicaciones, a pesar de ser más costosas en su fabricación [5]. En los '90 salió al mercado un nuevo tipo de PyB secundaria a base de Li metálico (Li-ion), que poseen menor toxicidad (debido a que el Li es menos tóxico que el Ni y el Cd). Tienen riesgo de ignición, debiendo procurar una disposición final e intermedia en

las cuales los contactos no sufran de rozamiento ni conducción eléctrica entre sí [19]. En Argentina no hay información de cuál es el consumo de esta tecnología. Por su menor toxicidad, las baterías de NiMH (Ni Hidruro metálico) y Li-ion tienen mayor aceptación y han remplazado a las PyB de NiCd en la mayoría de sus aplicaciones [20].

**Tabla 3. Composición porcentual de pilas secundarias**

Tipo de pila	Ag	C	Co	Cd	Fe	Hg	Li	MnO <sub>2</sub>	Ni	Pb	Zn
Ni/Cd		0.5		11-22	2				20-32		
NiMH			4.5						30-50		
Li-ion							15-40*				
Pb										36-90**	
Fuente: [18-22];* 23;** 24											

#### 4. Gestión

Distintos países cuentan con diferentes sistemas de gestión y tratamiento de PyB. Todos ellos tienen etapas en común: sensibilización, reducción de la generación, disposición inicial, recolección, clasificación en planta, reciclado y disposición final. Todas las etapas de gestión deben estar relacionadas entre sí y adaptadas a los recursos y características locales, de forma que los residuos de PyB puedan seguir un recorrido trazable durante todo el proceso. No existen recetas únicas para lograr una gestión adecuada, si no que ésta debe planificarse basándose en la información, tecnología y recursos disponibles localmente (ej. generación de PyB, número y localización de proveedores y puntos de recepción, disponibilidad de sitios de tratamiento o factibilidad técnico-económica de emplazar uno, tipo y localización del sitio de disposición final, entre otros).

Dada la toxicidad de los componentes enumerados y la ventaja económica de aprovecharlos, es importante implementar el reciclaje de PyB. Un estudio de ciclo de vida realizado por la consultora internacional ERM (2000) para Inglaterra, confirma que el reciclado de baterías es beneficioso para el ambiente, especialmente cuando existen tecnologías que aprovechen el material recuperado en industrias ya existentes [5]. Por otro lado, también se recomienda la utilización de PyB recargables por sobre las de un solo uso. En la Tabla 4 se presentan los costos de dos PyB “AA”; los valores muestran que, aún desde el punto de vista económico, es conveniente utilizar las baterías recargables que las no recargables.

**Tabla 4. Costo de dos pilas AA, recargable y no recargable**

	Costo baterías	Tiempo de vida (h)	Costo anual	Pilas desechadas
Alcalina	\$10	14	\$380	38
Carbon-Zn	\$6.5	4.5	\$754	116
Recargables	\$38	>900	\$68	<1
Fuente [25]				

#### 4.1. Etapas de un proceso de gestión

La gestión de PyB usadas, al igual que los demás residuos, debe siempre considerar la jerarquía de gestión de los residuos: reducir, reutilizar, reciclar, recuperar energía y disponer de manera controlada. Para lograr una gestión eficiente es insoslayable la participación de toda la sociedad, de allí que la primera etapa de cualquier gestión integral de residuos es la sensibilización de la comunidad respecto a su rol en el sistema de gestión.

La **sensibilización** tiene la función de informar, concientizar y comprometer a la comunidad para lograr la reducción en el consumo y la participación activa para la reutilización o reciclado. Los procesos involucrados en el reciclado necesitan que los usuarios formen parte activamente del proceso de gestión, a través de la separación en origen de los residuos y, algunas veces, del traslado de los materiales a puntos de disposición inicial. Las campañas de sensibilización deben ser continuas y, en todo momento, estar alineadas al plan de gestión implementado.

La segunda etapa a contemplar en un sistema de gestión es la **disposición inicial**. En ella los grandes comercios vendedores de PyB son buenos puntos de recolección, como también los puntos verdes u otros relacionados con el sistema de gestión integral de RSU en general. No se recomienda el almacenamiento provisorio en botellas o bidones sin ningún acondicionamiento ni control. Durante el almacenamiento, las baterías de Li deben tener sus contactos aislados (con cinta, film, etc.) a fin de disminuir el riesgo de ignición. En este sentido, se desaconseja el acopio en escuelas y cualquier otro sitio que no cuente con las medidas de seguridad necesarias para su acumulación y manipulación [1].

La tercera etapa es la **recolección**, que debe estar integrada a las otras etapas de la gestión y depende de los puntos de recolección y del tratador. Puede estar a cargo del municipio, de una empresa de recolección o de la empresa tratadora. El camino que recorren las PyB desde su disposición inicial, debe ser claro y acordado por todos los actores de la gestión. Acorde a la legislación vigente, tanto transportistas como tratadores de residuos de PyB deben estar registrados y habilitados por la autoridad de aplicación.

La cuarta etapa es **clasificación en planta** que debe ser acorde al tipo de PyB y al tratamiento que se realizará a posteriori.

La quinta etapa es el reciclado, que se desarrolla en el punto 6 “Tratamiento de PyB”. Todas las PyB son técnicamente reciclables con mayor o menor porcentaje de recuperación. Si bien en Argentina existen desarrollos incipientes para el tratamiento de PyB, aún no se han escalado e instalado como plantas de tratamiento.

La sexta y última etapa es la de **disposición final** que, dada la legislación vigente, sólo puede hacerse en sitios registrados por la autoridad de aplicación.

## 4.2. Algunas experiencias internacionales en gestión

### 4.2.1. Europa

- La Directiva 006/66/EC (año 2006) de la Comunidad Económica Europea (UE) en pos del reciclado de PyB incluye
- La obligatoriedad de un etiquetado que describa la capacidad energética, el símbolo químico del metal pesado que contenga y el símbolo de recolección diferenciada.
- La prohibición de comercializar PByA con más de 0,0005% de Hg en peso y 0,002% de Cd en peso, con excepción de los dispositivos de emergencia, de alarma y los equipos médicos.
- La asignación de responsabilidades por la gestión. Establece que los fabricantes deben hacerse cargo de todas las etapas de la gestión de las PyB usadas, sin que para el consumidor suponga un costo. De esta forma, se incluye la REP. No obstante, la normativa también impone responsabilidades para los consumidores acerca de la disposición inicial.
- La definición de metas de recolección y reciclado para todos los países miembros, lo cual requiere de un análisis estadístico riguroso en cuanto a generación, recolección y tratamiento.

Según información publicada por la oficina de estadísticas de la UE (Eurostat) en el 2015 se recolectaban para su reciclado el 42% de las PyB puestas en el mercado doméstico. En 2016, 13 países alcanzaron la meta del 45% de recolección propuesta por la Directiva, otros 10 tenían valores menores y los 5 restantes no reportaron información. En lo que respecta a la eficiencia en el reciclado de estas PyB recolectadas, es mayor al 75% para las de Pb, entre el 75% y el 85% para las de Ni-Cd y entre el 50% y el 80% para otras PyB, en todos los países de la Unión Europea [26].

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

Cabe destacar que muchos países de la UE cuentan con sistemas de REP y presentan tasas de recolección de PyB mayores que los estándares establecidos por las directivas. Estos sistemas se basan en ofrecer puntos de recolección gratuitos para los consumidores y procedimientos de recolección y clasificación que son administrados por una Organización de Responsabilidad del Productor (Producer Responsibility Organisation – PRO). Para mantener el sistema en funcionamiento los productores pagan tasas por disponer PyB en el mercado (en 2011 variaban entre €240 en Francia y €5.400 en Bélgica por cada tonelada de PyB). Este dinero, sumado al obtenido por la recuperación de materiales, es utilizado por el PRO para cubrir los costos de recolección y tratamiento, el manejo de la información y las campañas de sensibilización [27].

#### **4.2.2. Chile**

No realiza el tratamiento integral de PyB, sólo cuenta con sitios de recolección y almacenamiento. Las PyB son encapsuladas en bloques de concreto con el fin de evitar que su contenido se derrame y provoque daños [28].

#### **4.2.3. Estados Unidos de América**

La “Ley de gestión de PyB que contienen mercurio” facilita la recolección de baterías recargables y permite el reciclaje de las baterías NiCd por parte de los fabricantes [29]. Los principales componentes de esta ley son:

- La institución de los requisitos nacionales de etiquetado uniforme de PyB Ni-Cd y algunas recargables pequeñas que contienen Pb (SSLA por sus siglas en inglés).
- La exigencia que las PyB Ni-Cd y algunas SSLA sean fácilmente desmontables para favorecer su reciclaje.
- La aplicación nacional, para todos los Estados Federales de Estados Unidos en lo que respecta a: transporte, manipulación y almacenamiento de PyB.
- Prohibición de ciertos tipos de PyB que contienen Hg (alcalinas de Mn, Zn-carbono, PyB botón de óxido de Hg y otras PyB de óxido de Hg).

#### **4.3. Gestión de pilas en la Argentina.**

La CABA, a través de la Ley 5.991, es la única jurisdicción del país de la que se dispone información sobre cómo se postula la gestión integral de PyB. No se sabe aún cómo será su implementación y control. Sin embargo, según lo establecido en la Constitución Nacional, Ley 26.675, Ley 24.051 y Ley 26.916 todas las jurisdicciones, a través de sus autoridades de aplicación, deben asumir el compromiso de una gestión integral de PyB y responsabilizarse de la elección de

una alternativa técnica viable para la evaluación, selección e implementación de un tratamiento.

Es importante llevar a cabo una campaña de sensibilización que apunte a recolectar las PyB separadas en origen con el fin de incentivar la recuperación de sus elementos constitutivos. A la vez, es esencial e imprescindible que los demás eslabones de la gestión estén definidos y articulen con esta etapa a fin de que el proceso sea integral. Si no existe una planta de tratamiento a nivel local o regional se dificulta encontrar un destino final sustentable, ya que la opción actual es la exportación de PyB como residuo peligroso a países que poseen la tecnología necesaria para su tratamiento. Siendo conscientes de esta dificultad, se espera que la Ley de REP permita alcanzar un consenso entre los actores involucrados, para que la gestión permita el tratamiento de PyB en el país.

## **5. Tratamiento de pilas y baterías agotadas**

### **5.1. Pretratamiento o tratamiento mecánico.**

Ningún proceso de reciclado puede tratar todos los tipos de PyB y para lograr una mayor eficiencia es conveniente acondicionar las PyB agotadas mediante su separación manual (realizada por operarios) o automatizada (a través de sistemas ópticos), diferenciándolas por tipo y tamaño [1]. Una vez clasificadas las PyB, se procede a la separación de sus componentes. La fracción gruesa a separar está compuesta por papeles, plásticos y metales ferrosos y no ferrosos, mientras que la fracción fina (básicamente polvo de PyB) es la que contiene los metales a recuperar [1].

Para la separación de la fracción fina de la gruesa, se emplea el tamizado con cilindro Trommel o mesa vibratoria. Dentro de los procesos para tratar la fracción gruesa, se encuentra la separación magnética (separación de metales ferrosos y no ferrosos), la separación electrodinámica (separación de metales ferrosos, no ferrosos y no metales) y la separación electrostática (utiliza la conductividad eléctrica de los materiales).

En la Fig.6 se presenta la secuencia de pasos a seguir en el pretratamiento de las PyB.

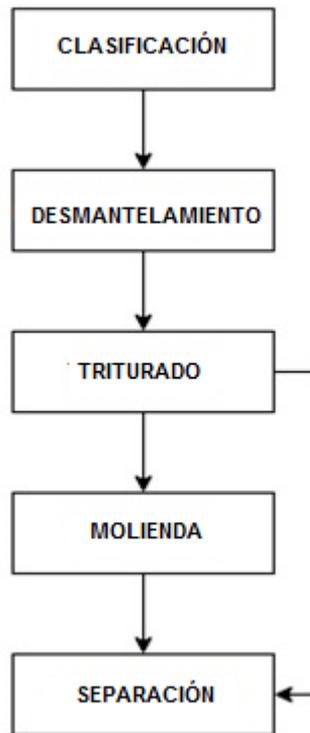


Fig. 6. Diagrama de flujo para el pretratamiento de pilas y baterías

## 5.2. Recuperación de metales

Para la recuperación de los metales contenidos en PyB (y en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos –RAEE- en general), se distinguen dos métodos principales: la pirometalurgia y la hidrometalurgia. El tipo de tratamiento seleccionado dependerá exclusivamente de la composición de la PyB. Finalmente, si la recuperación de metales no es posible, existe la posibilidad del confinamiento en un relleno de seguridad o de inmovilización de sus componentes.

### 5.2.1. Pirometalurgia

Es el tratamiento térmico en medio reductor (generalmente se utiliza coque como reductor) de minerales, menas y concentrados que provoca transformaciones físicas y químicas en los materiales, permitiendo la recuperación de metales de valor económico. Los procesos pirometalúrgicos creados específicamente para reciclar PyB incluyen diferentes técnicas que tienen un elevado requerimiento energético, dado el alto punto de fusión y ebullición de la mayoría de los metales que las componen. Sin embargo, el consumo de energía en la recuperación de los metales de las PyB es más bajo que en su producción primaria, al no generarse residuos de minería [30]. Además, la concentración de metales contenidos supera a la concentración del metal en la mena [31], lo que

convierte a las PyB en una fuente valiosa de metales, con menos etapas de tratamiento y consumo energético.

Todos los procesos pirometalúrgicos para el reciclado de baterías tienen en común la evaporación del metal para separarlo de otros compuestos con mayor punto de ebullición. Principalmente, el objetivo de estos procesos es evaporar el Hg, Zn y Cd.

Las pilas que contienen zinc se pueden reciclar por procesos pirometalúrgicos dado que los puntos de ebullición de los metales que contienen (Hg, Zn y Mn) son muy diferentes. En los residuos de pilas alcalinas agotadas se puede esperar encontrar no sólo Zn metálico, sino también ZnO, MnO<sub>2</sub> y Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. El ZnO, cuando se calienta a 920°C en presencia de un reductor a presión atmosférica, se reduce a Zn metálico. Como la temperatura de reacción está por encima del punto de ebullición del Zn, el metal reducido se obtiene en forma de vapor. En consecuencia, el proceso de reciclado de Zn debe llevarse a cabo a temperaturas superiores a 920°C para evaporar la mayor parte de este elemento. También ocurre la prerreducción de los óxidos superiores de Mn a MnO por lo tanto el material que permanece sólido a lo largo del proceso se compone principalmente de MnO y del hierro (Fe) proveniente de las carcasas metálicas.

Los procesos pirometalúrgicos que utilizan hornos de arco eléctrico, como INMETCO y Waelz, aceptan PyB de Zn-C y alcalinas. En tales procesos, el material triturado se mezcla con un reductor a base de carbono. Después de esto, la mezcla se pone en un horno de hogar abierto o en un horno rotativo, que opera a temperaturas de hasta 1350°C. Durante el proceso, el Zn y otros compuestos o elementos volátiles se capturan en el sistema de tratamiento de gases.

Las PyB de NiCd se tratan en procesos separados del resto de las PyB por dos importantes razones: la presencia de Cd provoca ciertas dificultades en la recuperación de Hg y Zn por destilación y las dificultades técnicas asociadas a la separación del Ni y el Fe. El proceso de reciclado para las PyB de NiCd se basa en la destilación del Cd. Luego de la evaporación del agua y durante el calentamiento, los hidróxidos de Cd y Ni se descomponen. El tratamiento se puede llevar a cabo con o sin agente reductor (a base de carbono). Para evitar su uso, la presión total del sistema debe ser de aproximadamente 10<sup>-4</sup> bar para permitir la descomposición del CdO a 850–900°C y así producir vapor de Cd (el punto de ebullición del Cd metálico es 767 °C). Si se utiliza un agente reductor, la reducción de los óxidos de Ni y Cd es termodinámicamente posible a bajas temperaturas (menores a 510°C). En general, el reciclado pirometalúrgico de las PyB de NiCd se lleva a cabo a temperaturas cercanas a los 900°C, en vacío con atmósfera inerte o reductora. La atmósfera controlada es necesaria para evitar la oxidación del cadmio metálico, el cual se produce con un 99,9% de pureza y puede utilizarse en numerosas aplicaciones inclusive la producción de nuevas PyB de NiCd. Los compuestos que permanecen sólidos durante el tratamiento son básicamente Ni, Fe y Co y se pueden utilizar en la producción de acero inoxidable.

Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío

Estas mismas técnicas se pueden aplicar para las PyB de NiMH mezcladas en la carga. Sin embargo, sólo se recupera el Ni, las tierras raras presentes en los residuos se pierden en el proceso [5, 32].

### 5.2.2. Hidrometalurgia

Los procesos hidrometalúrgicos consisten en la disolución parcial o total, en medio ácido o alcalino, de la fracción metálica de las PyB y su extracción selectiva para el uso como materia prima en la industria metalúrgica [1] (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.). La lixiviación corresponde a la disolución selectiva en medio acuoso de los metales de interés a través de los reactivos adecuados y el agente lixivante encargado de realizar la disolución.

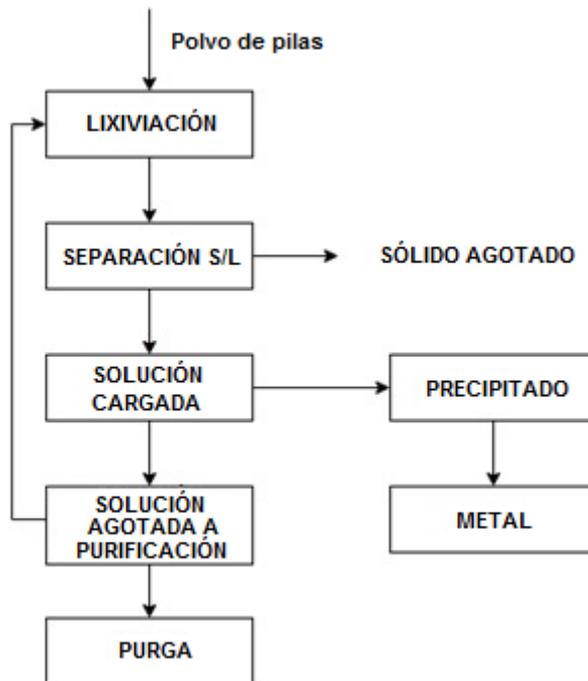


Fig. 7. Secuencia de etapas físico-químicas de la hidrometalurgia

En la separación sólido-líquido, el sólido agotado se separa de la solución enriquecida con los metales disueltos por decantación, sedimentación o filtración. Dicho sólido se trata posteriormente teniendo en cuenta la neutralización de cualquier reactivo que pueda afectar al ambiente y, por último, se envía a disposición final.

La solución rica en los metales de interés ingresa a la etapa de recuperación selectiva o precipitación. El precipitado pasa a otros procesos metalúrgicos que pueden ser pirometalúrgicos o electrometalúrgicos y es aquí donde se recupera el metal como un producto sólido. Cabe aclarar que las rutas pirometalúrgicas empleadas en este paso no son necesariamente las mismas que

las rutas detalladas en el punto anterior. La solución agotada es enviada para su reutilización en la lixiviación o bien, se desecha como purga del sistema siendo debidamente tratada antes de su disposición [33].

Una ventaja de la hidrometalurgia es que puede operar en pequeña y mediana escala [34], existiendo una gran variedad de técnicas y combinaciones a emplear para separar los metales una vez disueltos. Además, en los procesos hidrometalúrgicos, las emisiones gaseosas son considerablemente más bajas. Por otro lado, el consumo eléctrico es notablemente menor en comparación con las rutas pirometalúrgicas [35] y, a su vez, es el principal método de recuperación del Li, compuesto de particular interés debido a su utilización en baterías de celulares y artefactos móviles, acumuladores empleados en el almacenamiento de energías alternativas y en autos eléctricos.

### 5.3. Desarrollos nacionales

En Argentina se han desarrollado algunos trabajos a escala piloto en pos de mejorar y hacer más sustentables los procesos descritos anteriormente. Sin embargo, estas tecnologías aún no han logrado alcanzar una escala comercial. La Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo) se encuentra trabajando en el desarrollo de plantas piloto de tratamiento de PyB de Li [36, 37], así como en mejorar los procesos existentes para la recuperación de Co y Li de este tipo de PyB y lograr purezas mayores al 94% [38]. Por su parte, la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), desde los centros CINDECA, CICPBA y Plapimu-Laseisic, estableció un proceso para reutilizar los óxidos y metales recuperados de PyB alcalinas por vías biohidrometalúrgicas, recuperando el 28% del Mn y el 95% del Zn [39]

Por otro lado, investigadores de la Facultad Regional Avellaneda, de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), realizaron una propuesta de planta piloto para el tratamiento de pilas y baterías en el país. Los autores destacan que la tecnología propuesta permite extraer materiales de las PyB con valor de mercado. Sin embargo, las percepciones económicas debidas sólo a las ventas de estos elementos son inferiores a los costos de operación de la planta, por lo que es necesario contar con ingresos complementarios. Entre las alternativas propuestas se destacan el cobro de tasas a generadores y usuarios de los productos (acciones relacionadas con la estrategia de REP) o el pago de subvenciones por parte del Estado [40]. De allí la importancia de contar con sistemas de gestión integral para PyB que hagan sustentable su tratamiento.

## CONCLUSIONES

En Argentina, entre el 2002 y 2007 el consumo de PyB secundarias se incrementó, en detrimento de las primarias. Esta tendencia se estabilizó a partir del 2008 y desde entonces hasta la actualidad, las PyB secundarias representan entre el 80 y el 88% del mercado, mientras que las primarias entre un 20 y un 12% sin ninguna tendencia clara.

Las PyB contienen elementos peligrosos que pueden alterar las características del ambiente y, por ende, tener impactos sobre la calidad de vida de la población y su salud. Sin embargo, de incorporarse en el marco de la economía circular, estos elementos adquieren valor al ser recuperados y reinsertados en los ciclos productivos.

Para avanzar en torno a una economía circular es innegable la importancia de contar con una ley de REP que brinde herramientas y recursos para aplicar una gestión integral de este tipo de residuos. Teniendo esto en cuenta, se sugiere realizar una copiosa campaña de sensibilización que apunte, en última instancia, a reducir la cantidad de PyB que se envían a disposición final. Esta campaña debería convocar a reducir la cantidad de PyB que son utilizadas y, en sintonía con esto, promover la utilización de PyB recargables por sobre las no recargables. Luego debería enfocarse en promover una disposición primaria en lugares acordes, que permitan recolectar las PyB como una corriente de residuos especiales y no domiciliarios o peligros. Se recomienda que las PyB cuenten con un etiquetado que permita a los usuarios elegir la menos dañina e informarse acerca de qué hacer con las PyB al terminar su vida útil. La campaña de sensibilización sugerida debe ser acompañada de la implementación de centros de acopio primario correctamente identificados y con personal de atención instruido, que puedan comprender la peligrosidad que implica el recipiente que almacena PyB. En estos puntos de acopio se articulará con los usuarios para recibir las PyB, responder a consultas y brindar información. A la vez, se aconseja impulsar la creación de centros de tratamiento a nivel regional para reciclar las PyB recolectadas.

Como se mencionó anteriormente, en el mundo se aplican distintas tecnologías ampliamente difundidas para el tratamiento de PyB. En Argentina se han desarrollado algunos trabajos a escala piloto, pero todavía no han encontrado aplicación a escalas mayores. Actualmente, el punto crítico se encuentra en el desarrollo de tecnologías de gestión que permitan hacer de estos desarrollos una práctica sustentable y sostenible en el tiempo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dra Leila Devia y la Lic. Laura Correa por sus revisiones y sugerencias.

## **REFERENCIAS**

- [1] INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL, INTI. Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina. 1a. Edic., Instituto Nacional de Tecnología Industrial. INTI, Buenos Aires, 2016.
- [2] T. Lindhqvist, P. Manomaivibool, N. Tojo, La responsabilidad extendida del productor en el contexto latinoamericano. La gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en Argentina, Lund University International Institute for Industrial Environmental Economics, 2008.

- [3] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICAS Y SENSOS, INDEC. Sistema de consulta de comercio exterior de bienes (19 de marzo de 2019). Recuperado de: [https://comex.indec.gov.ar/search?\\_ga=2.108708608.328972513.1529611515-66349678.1529611515](https://comex.indec.gov.ar/search?_ga=2.108708608.328972513.1529611515-66349678.1529611515).
- [4] M Jacott, C. Reed y A. Villamar, Hazardous waste management in the United States-Mexico Border Region: More Questions than Answers, Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio (RMALC) La Neta—Proyecto Emisiones: Espacio Virtual, México City, D.F., México and Texas Center for Policy Studies, Austin, Texas, 1999.
- [5] A.M. Bernardes, D.C.R. Espinosa, J.A.S. Tenório, *Journal of Power Sources* 130 (2004).
- [6] Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) y Coordinación Ecológica Área Metropolitana Sociedad del Estado (CEAMSE) (21 de octubre de 2013), Estudio de calidad de los residuos sólidos urbanos del Área Metropolitana de Buenos Aires. Recuperado de: <http://www.fi.uba.ar/sites/default/files/Informe%20ECRSU%20AMBA%202011%20IF.pdf>.
- [7] Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires (19 de marzo de 2019). Residuos recolectados por tipo y promedio diario por habitante, Ciudad de Buenos Aires, Años 1995/2017. Recuperado de: <http://www.estadisticaciudad.gob.ar/eyc/?p=29140>.
- [8] Environmental protection agency (EPA), Hazardous Waste Management System: Identification and Listing of Hazardous Waste; Notification Requirements; Reportable Quantity Adjustments, *Federal Register*, 51, 114 (1986).
- [9] T. Duston, *Recycling Solid Waste: The First Choice for Private and Public Sector Management*. Edit. Quorum, EE.UU., 1993.
- [10] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) (23 de agosto de 2018). Intoxicación por plomo y salud. Recuperado de: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.
- [11] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), Tratamiento farmacológico de los trastornos mentales en la atención primaria de salud, OMS, Washington, D.C., 2010.
- [12] L. Domínguez Ortega, O. Medina Ortiz y S. Cabrera García-Armenter, *An. Med. Interna*, 23 (2006).
- [13] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), Exposure to Cadmium: a major public health concern, World Health Organization, Suiza, 2010.
- [14] International Agency for Research on Cancer. (IARC), IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, World Health Organization, France, 2012.
- [15] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), Guías para la calidad del agua potable, tercera edición, OMS, Suiza, 2016.
- [16] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS), Guías de calidad para el agua de consumo humano, cuarta edición, OMS, Ginebra, 2011.
- [17] Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades (ATSDR) (septiembre de 2012). Resumen de salud pública: Cromo. Recuperado de: [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs7.pdf](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs7.pdf).

- [18] Eurotech Inc., Used batteries and the environment: A study on the feasibility of their recovery, report EPS 4/CE/1. Technology Development Branch Environmental Protection Conservation and Protection, Environment Canada, Ottawa, Canadá, 1991. Citado en J.C. Díaz, M.L.D. Arias. Gaceta Ecológica, 2004, La contaminación por pilas y baterías en México.
- [19] L. Sánchez, Anales de la Real Sociedad Española de Química, 97, (2001).
- [20] I. C. Nnorom, O. Osibanjo, Int. J. Environ. Sci. Tech., 6, 641 (2009).
- [21] X. E. Castells. Reciclaje de residuos Industriales (2nd ed.), Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora, Díaz de Santos, España, 2009.
- [22] J. A. Patton, M. J. Pérez, Acta Nova; 3, (2007).
- [23] ENERGYZER BATTERY COMPANY (enero de 2015), Product Safety Data Sheet: "Lithium Ion Batteries" Energizer Battery Company. Recuperado de: [http://data.energizer.com/pdfs/lithiumion\\_psd.pdf](http://data.energizer.com/pdfs/lithiumion_psd.pdf)
- [24] ENERGYZER BATTERY COMPANY (enero de 2016), Product Safety Data Sheet: "Lead Acid Batteries" Energizer Battery Company. Recuperado de: [http://data.energizer.com/pdfs/leadacid\\_psd.pdf](http://data.energizer.com/pdfs/leadacid_psd.pdf)
- [25] M. Jacott, Pilas y baterías: tóxicas en casa, Greenpeace, México, 2005.
- [26] Eurostat (junio, 2018). Waste statistics - recycling of batteries and accumulators. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste\\_statistics\\_\\_recycling\\_of\\_batteries\\_and\\_accumulators](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics__recycling_of_batteries_and_accumulators).
- [27] V. Monier, M. Hestin, J. Cavé, I. Laureysens, E. Watkins, H. Reisinger & L. Porsch, Development of guidance on extended producer responsibility (EPR) Final Report, European Commission – DG Environment, 2014.
- [28] E. Vivanco Font, Baterías y Pilas: Impacto sobre el Medio Ambiente, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2012.
- [29] EPA. Mercury-Containing and Rechargeable Battery Management Act. PUBLIC LAW 104-142—MAY 13, 1996.
- [30] S. Grimes, J. Donaldson, J. Grimes, Report on Environmental Benefits of Recycling, Bureau of International Recycling (BIR), 2016.
- [31] C. Ekberg, M. Petranikova, Recycling of Spent Batteries, Chalmers University of Technology, Sweden, 2018.
- [32] D.C.R. Espinosa, M.B. Mansur, Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook, Woodhead Publishing, 2012.
- [33] J.J. Castañeda Bocanegra, Evaluación de los métodos de hidrometalurgia, pirometalurgia y estabilización solidificación en el tratamiento de lodos procedentes de plantas de aguas residuales de procesos de cromado, tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2015.
- [34] N. Cavallero, Separación por método hidrometalúrgico de cinc y manganeso en pilas de tipo alcalinas a los efectos de transformar estos compuestos en productos de utilización industrial, Pontificia Universidad Católica Argentina Facultad de Química e Ingeniería "Fray Rogelio Bacon", 2014.
- [35] M.D. Adams, Gold Ore Processing: Project Development and Operations, 2a. Edic., Elsevier Science, 2016.
- [36] Gobierno de Godoy Cruz, Mendoza, (1 de julio de 2016), Godoy Cruz y la UNCuyo trabajarán en conjunto para construir una planta procesamiento de baterías. Recuperado de: <https://www.godoycruz.gob.ar/sitio2/?p=29853>

- [37] S. Conte (16 de marzo de 2018) Godoy Cruz tendrá una planta de procesamiento de pilas y baterías. Diario Los Andes. Recuperado de: <https://losandes.com.ar/article/view?slug=godoy-cruz-tendra-una-planta-de-procesamiento-de-pilas-y-baterias>.
- [38] D. Suarez, E. Pinna, G. Rosales & M. Rodriguez. Minerals, 7, 81, (2017).
- [39] M.V. Gallegos, M.A. Peluso y J.E. Sambeth, The Minerals, Metals & Materials Society, (2018).
- [40] G. Lencina, R. Lahorca, M. Alí, A. Gauna, A. Ciencia, 7, 25, (2012).



# Los residuos que generamos. Su manejo sustentable, un gran desafío



**ANCEFN**

Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ISBN 978-987-4111-24-1



9 789874 111241