

# GOMAS TRITURADAS: ESTADO DEL ARTE, SITUACIÓN ACTUAL Y POSIBLES USOS COMO MATERIA PRIMA EN PUERTO RICO

Jorge H. Botero<sup>1</sup>, Milton O. Valentín<sup>2</sup>, O. Marcelo Suárez<sup>3</sup>, Jeannette Santos<sup>3</sup>, Felipe J. Acosta<sup>4</sup>, Arsenio Cáceres<sup>4</sup>, Miguel A. Pando<sup>5</sup>

Resumen: La acumulación de neumáticos desechados es uno de los problemas ambientales que más importancia ha tomado en los últimos años. En países desarrollados la producción es mayor cada año y los métodos más usados para la disposición final, como la colocación en vertederos, ya no son permitidos. Esto genera la necesidad de buscar nuevas alternativas para darle una disposición apropiada a los neumáticos desechados. En Puerto Rico el problema debe ser atendido con prontitud, ya que se ha llegado a una producción de un neumático por habitante por año (1 neu/hab/año), similar a la producción de Estados Unidos.

En este trabajo se realizó una revisión de la situación del reciclado de neumáticos con el fin de conocer los diferentes usos dados a la goma. El enfoque principal fue la goma triturada, la cual se ha convertido en materia prima para usos variados. Se estudiaron temas como el uso de goma triturada en sistemas de recolección de lixiviados y en absorción de contaminantes, como componente del concreto y como sustituto de agregados, el asfalto-caucho y el uso de la goma triturada en terraplenes. Además se analizó la situación actual de Puerto Rico frente a este problema.

**Palabras Claves:** absorción de contaminantes, barreras de sonido, caucho asfalto, goma triturada, reciclaje.

## SHREDED TIRES: STATE OF THE ART, CURRENT SITUATION AND POSSIBLE USES AS A COMMODITY IN PUERTO RICO

Abstract: The accumulation of discarded tires has become one of the most important environmental problems in the last years. In developed countries, tire production increases every year and the most used disposal method, landfills disposal, have been prohibited. This problem generates the necessity to search for new and appropriate alternatives for the pneumatics disposal. In Puerto Rico this problem must be attended with promptness since it has increased to a rate of one tire per inhabitant per year (1 tire/inha/yr), very similar to the rate of the USA.

In this research, a review of the state of the art in tires recycling was performed in order to know the different uses of discarded tires. The approach was mainly oriented to tire chips or crumbs which have become commodity for different uses. Themes like asphalt rubber or rubber crumb/chips as contaminant absorption were studied. The use of tire chips as a concrete component, also as sand, gravel or other aggregate substitutes and its usage as compilation of leachate have also been surveyed. The current situation of pneumatic recycling in Puerto Rico was also analyzed.

**Keywords:** asphalt rubber, contaminants absorption, recycling, shredded tires, sound barriers.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, MSCE, Aritel Inc., P.O. Box 1039 San Sebastián, PR 00685

<sup>2</sup> Ingeniero Civil, Diego Tamariz y Asoc., Ramírez Silva #11, Mayagüez, PR 00680

<sup>3</sup> Catedrático Asociado, Dept. de Ing. General, Universidad de Puerto Rico- Mayagüez, Mayagüez, PR 00681-9044.

<sup>4</sup> Catedrático Asociado, Dept. de Ing. Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico- Mayagüez, Mayagüez, PR, 00681-9041.

<sup>5</sup> Catedrático Asistente, Dept. de Ing. Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico- Mayagüez, Mayagüez, PR, 00681-9041. E-mail: [mpando@uprm.edu](mailto:mpando@uprm.edu)

## INTRODUCCIÓN

Puerto Rico produce alrededor de cuatro millones de neumáticos desechados cada año. Éstos no pueden ser dispuestos en los vertederos, según lo ordenado por la ley 171 de 1996. Por tal motivo es importante buscar alternativas de uso para este desperdicio.

La disposición de gomas enteras en vertederos reduce la vida útil de éstos y los convierte en focos de enfermedades e incendios. Los vertederos ilegales representan un peligro similar o mayor. Según Velásquez (2001) existen cuatro alternativas para el manejo de neumáticos desechados con el fin de evitar su disposición en vertederos. Éstas son:

- Reducción de la producción de neumáticos nuevos aumentando la vida útil de éstos, mediante el mejoramiento de la capacidad y desempeño de los mismos. En esta etapa los fabricantes juegan un papel importante.
- Reutilización de los neumáticos mediante un método conocido como reencauche o recauchutaje, que consiste en adherir al neumático capas nuevas de goma para hacerlo nuevamente utilizable.
- Recuperación de energía mediante el uso de la goma como combustible derivado de goma (*Tire Derived Fuel, TDF*)
- Reciclaje de la goma mediante granulación y otros métodos, con lo cual se obtienen pedazos de goma de diferentes tamaños los cuales pueden ser utilizados ya sea como agregado o para productos moldeados.

La reutilización de neumáticos mediante el reencauche es una solución parcial, ya que en algún momento el neumático no podrá ser reencauchado más y finalmente tendrá que ser desechado. La recuperación de energía mediante el uso de la goma como *TDF* genera residuos nocivos para el ambiente, principalmente debido a emisiones de humo cargadas con materiales pesados altamente contaminantes. Por estas razones la alternativa más viable es el reciclaje, ya que no sólo elimina el problema ambiental, sino que convierte a la goma en un producto útil con valor agregado y crédito económico.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es estudiar las diferentes alternativas para el uso de la goma reciclada y su posible aplicación para Puerto Rico. Otro de los objetivos es determinar cuáles son los usos que más beneficio generan teniendo en cuenta factores como volumen de consumo de gomas, costo de aplicación, generación de utilidades, mejoramiento de las propiedades del producto manufacturado, etc. Por último, se pretende documentar algunas investigaciones realizadas en este tema, para conocer experiencias previas, así como las propiedades mecánicas más importantes y tener una mejor idea del comportamiento físico-químico de la goma reciclada.

## GENERALIDADES

La ley 171 de 1996, según enmendada, "Ley de Manejo de Neumáticos", establece que todo vendedor al detal de neumáticos en Puerto Rico debe tener un área de almacenamiento en su establecimiento donde aceptará y retendrá todo neumático que haya sido vendido por el comercio o que sea removido de un automóvil para ser reemplazado.

Actualmente, existen en Puerto Rico unos 3,400 almacenadores de neumáticos. A continuación se desglosa la distribución numérica de los mismos a través de la Isla:

- Región de San Juan	1,567
- Región de Arecibo	465
- Región de Guayama	359
- Región de Mayagüez	547
- Región de Ponce	<u>462</u>
<b>Total</b>	<b>3,400</b>

En la actualidad se recoge la totalidad de neumáticos desechados, los cuales se disponen de dos formas: se exporta el neumático completo o se tritura para producir material reciclado. Aproximadamente la mitad de los neumáticos desechados que se producen en la Isla están siendo exportados hacia Estados Unidos. La labor de exportar está siendo llevada a cabo por dos empresas: Terralina Environmental y Techniques Recycling. Por otro lado, el proceso de reciclaje y triturado está siendo realizado por las compañías Integrated Waste Management y REMA.

Para incentivar el desarrollo del sector del reciclaje, la Ley 171 ha creado beneficios tributarios para las empresas que participen en las labores de disposición final. Cuando se vende un neumático se cobra un impuesto que cubre el costo de la disposición final del mismo. Por lo tanto, la Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico paga a las empresas participantes en este proceso, por cada neumático de automóvil: US\$0.50 por transporte, US\$0.41 por procesado, US\$0.31 por triturado adicional y US\$0.21 por neumático pulverizado (Todas estas cifras se refieren a dólares estadounidenses).

Los neumáticos exportados son enviados enteros sin pasar por ningún proceso de triturado. Esta práctica, aunque elimina el problema de acumulación de neumáticos, no trae ningún beneficio adicional (con excepción para el exportador) y no se le genera ningún valor agregado al material.

### **AUTORIDAD DE DESPERDICIOS SÓLIDOS (ADS)**

La Autoridad de Desperdicios Sólidos de Puerto Rico tiene a su cargo la responsabilidad de coordinar la implantación de la Ley 171. En un intento por garantizar el manejo eficiente de los neumáticos desechados, la ADS busca establecer una estructura corporativa viable para industrias procesadoras de neumáticos.

De los variados usos dados a la goma triturada, la ADS está interesada en apoyar y promover aquellos que no sólo consuman grandes volúmenes de goma, sino que generen beneficios económicos para la sociedad puertorriqueña. Por tal motivo, usos como la sustitución de agregados en sistemas de recolección de lixiviados y en otros componentes de los vertederos no forman parte de la agenda de trabajo.

A pesar de lo dicho anteriormente, ya se ha utilizado goma triturada en sistemas de recolección de lixiviados, como es el caso del vertedero de Humacao (municipio en el Este de Puerto Rico), municipio en el este del Puerto Rico. Sin embargo, ADS considera que actualmente no es posible continuar con esta aplicación en otros lugares ya que la mayoría de vertederos en la Isla no cumplen con los requisitos de calidad, no compactan los estratos de capas adecuadamente, no realizan monitoreos de gases y lixiviados y tampoco cuentan con la infraestructura para el almacenaje y manejo de la goma triturada.

La Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA, por las siglas en inglés de Environmental Protection Agency) estima que de un neumático de automóvil se debe obtener 23.1 lb (10.48 kg) de goma triturada. Sin embargo, ADS estima esta misma producción en 19.8 lb (8.98 kg), lo que significa que por cada 19.8 lb (8.98 kg) que el triturador obtenga, le serán reconocidos los US\$0.41 que se dan por neumático procesado.

En la Tabla 1 se presentan datos cronológicos sobre la cantidad de neumáticos procesados por año. Esta información proviene de la Junta de Calidad Ambiental de Puerto Rico.

**Tabla 1: Cantidad de neumáticos procesados por año en Puerto Rico.**

<b>AÑO</b>	<b>NEUMÁTICOS PROCESADOS</b>
abril-diciembre 1997	2,381,303
1998	3,604,388
1999	3,766,402
2000	2,645,775
2001	3,505,853
2002	4,069,854
enero-marzo 2003	1,296,335
<b>TOTAL</b>	<b>21,870,295</b>

### **RUBBER RECYCLING AND MANUFACTURING (REMA)**

La empresa REMA está ubicada en el municipio de Caguas, y es una de las cuatro empresas donde actualmente se disponen todos los neumáticos desechados que se producen en la Isla.

Tiene una capacidad para procesar 9,000 neumáticos diarios, aunque en la actualidad se procesan 7,000 por día, estimándose una producción anual de 1,800,000 neumáticos triturados. Actualmente el consumo local está acaparando la producción total de la planta, aunque anteriormente se exportaba debido a la poca demanda en la Isla.

Los neumáticos son llevados a la planta por empresas transportadoras autorizadas por la Junta de Calidad Ambiental. REMA también cumple con esta función. La totalidad de las empresas transportadoras se presentan en el Apéndice A.

Al procesar la goma se obtienen varios tamaños a los cuales se les debe encontrar mercado, ya que en el triturado no es posible obtener uno o algunos tamaños deseados. Los usos dados a la goma triturada están generalmente asociados al tamaño de ésta. La Tabla 2 presenta algunos usos dados a este producto según su tamaño.

**Tabla 2: Usos de la goma triturada según su tamaño.**

Tamaño (mm)	Usos
Malla 16	Ingeniería no estructural. Sustituto de gravilla. Productos moldeados
Malla 4	Campos de juegos ( <i>playgrounds</i> ). Productos moldeados. Pistas atléticas
Malla 1.4 -0.850	Caucho-Asfalto. Sustituto de arena
Malla 0.600	Caucho-Asfalto. Pegamento de techo

La goma triturada exportada por REMA ha sido usada para campos de golf, hipódromos y establos, entre otros. Localmente se ha usado en un parque de Caguas, en campos de juegos (*playgrounds*), pistas atléticas y como parte del sistema de recolección de lixiviados en el vertedero de Humacao.

Según los requerimientos de ADS se deben obtener 19.8 lb (8.98 kg) por cada neumático triturado. Sin embargo REMA está obteniendo de 6 a 8 lb (2.72 a 3.63 kg) de goma triturada por cada neumático que se procesa. Por esta razón se tiene que procesar el equivalente a casi 3 neumáticos para que le sea reconocido al menos uno.

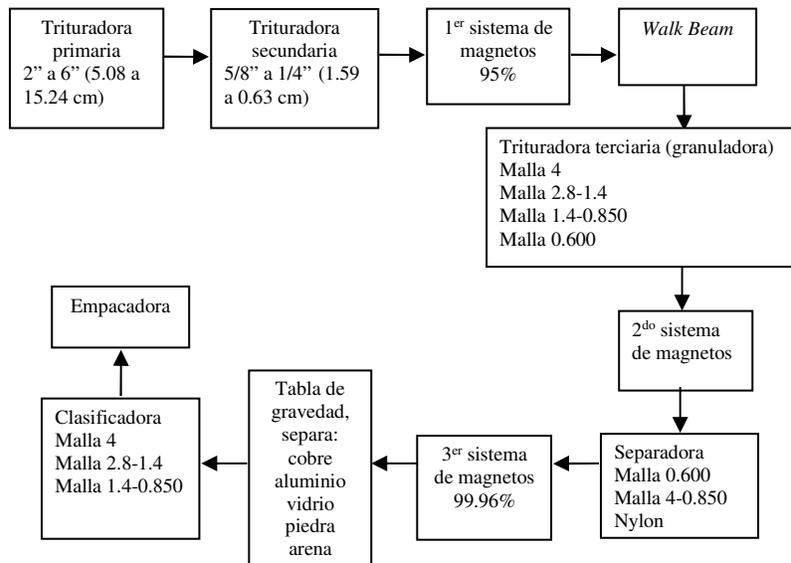
Del proceso de triturado resultan acero y nylon como productos de desecho. Éstos están actualmente siendo dispuestos en vertederos; sin embargo REMA ya ha comenzado investigar para darle uso a estos productos. El acero puede ser reciclado y el nylon puede ser utilizado en procesos de devulcanización.

#### *Proceso de triturado*

A continuación se describe en forma simplificada el proceso de triturado de neumáticos desechados realizado en REMA según descrito por Joseph Albino, gerente general de la empresa.

- El neumático es recogido en el generador principal (gomeras).
- Luego es llevado a la planta a través de los transportistas.
- Entra a la trituradora primaria donde se obtienen pedazos entre 2" y 6" (5.08 y 15.24 cm).
- Se hace un primer proceso de selección donde los pedazos mayores de 6" (15.24 cm) son llevados de nuevo a la trituradora primaria.
- Se sigue hacia la trituradora secundaria donde se obtienen pedazos entre 5/8" y 1/4" (1.59 y 0.63 cm).
- Los pedazos de goma pasan al primer sistema de magnetos donde se recoge el 95% de los alambres de acero.
- De allí pasan a la trituradora terciaria (granuladora), donde se obtienen cuatro tipos de tamaño: Malla 4, Malla 2.8-1.4, Malla 1.4-0.850 y Malla 0.600.
- Se somete el material al segundo sistema de magnetos para la extracción del remanente de acero.
- A continuación, en un separador se recuperan las partículas de tamaño Malla 0.600 y se separa el nylon grueso. Los tamaños Malla 4 - 0.850 continúan hacia la tabla de gravedad.
- En la tabla de gravedad se encuentra el tercer sistema de magnetos. Después de pasar por éste se considera que el producto es 99.96% libre de metal. Allí mismo se separan también las impurezas de las gomitas tales como vidrios, arena, piedras y metales diamagnéticos tales como aluminio y cobre.
- De la tabla de gravedad se continúa hacia la clasificadora donde se separan en los siguientes tamaños: Malla 4, Malla 2.8-1.4 y Malla 1.4-0.850.
- Finalmente, en una empacadora el material es colocado en sacos quedando listo para salir de la planta.

En la Figura 1 se presenta un esquema de los principales procesos que se llevan a cabo en la planta para el triturado de neumáticos.



**Figura 1: Proceso de triturado de gomas llevado a cabo en la compañía REMA.**

La distribución de partículas, en porcentajes, obtenida en los rangos de Malla 4 a Malla 0.850 es de la siguiente manera:

- Malla 4: 20% a 30%
- Malla 2.8-1.4: 50%
- Malla 1.4-0.850: 20% a 30%

## TERRALINA ENVIRONMENTAL Y TECHNIQUES RECYCLING

### Terralina Environmental

Terralina Environmental es una de las compañías exportadoras de neumáticos de Puerto Rico. Su administración cuenta con una oficina y cuatro camiones que transitan por diferentes lugares de la Isla para recoger los neumáticos desechados. Éstos son exportados enteros a los Estados Unidos con los siguientes fines:

- Combustible para empresas privadas
- Triturado para reemplazo de agregados en mezclas de concreto y asfalto

Los cuatro camiones de la compañía mueven diez contenedores (*trailers*) a la semana. Cada contenedor alberga unos 2,000 neumáticos. Se estima entonces que una cantidad de 1,040,000 neumáticos son exportados por año. Este movimiento consume aproximadamente una cuarta parte de la totalidad desechada actualmente en la Isla.

### Techniques Recycling

Techniques Recycling es otra compañía exportadora de neumáticos. Cuentan con una pequeña oficina ubicada en San Juan, con un personal estimado de 20 empleados. Una peculiaridad de esta empresa es que subcontratan transportistas del gobierno para mover los neumáticos desechados al puerto desde donde deportadores contratados exportan los neumáticos enteros a los Estados Unidos.

Realizando un cálculo similar al aplicado con la empresa previamente mencionada, se estima en unos 780,000 los neumáticos exportados por año. Esta cantidad se aproxima a una quinta parte de la totalidad de neumáticos desechados en la Isla. Todo este material se destina a las mezclas de hormigón y asfalto.

## BLOQUES ESSAN

Bloques Essan es una compañía puertorriqueña que produce hormigón prefabricado. Esta compañía utiliza goma triturada para la fabricación de barreras de sonido. Éstas cuentan con tres capas principales: la capa acústica, el acero de refuerzo y el hormigón estructural. La capa acústica absorbe el 80% del sonido y retiene un 10% del sonido restante en

los canales acústicos, dejando sólo un 10% del sonido original.

Essan recibe la goma triturada producida por REMA de diámetros aproximados de 8 a 10 mm. Éstos se mezclan con hormigón y se depositan en moldes de metal. Una vez se tiene una consistencia adecuada se coloca un refuerzo compuesto de una malla de acero. Las barreras se construyen en unidades de 12 pies de largo (3.66 m) por 4 ú 8 pies de alto (1.22 ó 2.44 m), dependiendo del propósito. Las unidades se unen con columnas de concreto en forma de "I" que se entierran en el suelo, dando la resistencia necesaria para sostener las barreras.

La Autoridad de Carreteras de Puerto Rico es el principal consumidor de este producto, teniendo instaladas unas 40 millas (64.37 km) de barreras de sonido a lo largo de varias de las vías principales de la Isla.



**Figura 2: Barreras de sonido de Essan.**

La empresa consume alrededor de unos 250,000 neumáticos triturados, producidos por REMA. Essan está experimentando con la implantación de la goma triturada como sustituto de agregados para sus productos prefabricados. De tener éxito, su consumo de neumáticos reciclados aumentaría.

## USO DE LA GOMA TRITURADA EN VERTEDEROS

El uso de la goma triturada en vertederos ha sido un tema ampliamente estudiado por especialistas en el tema tales como Cosgrove (1995) y Edil et al. (2004). El uso de este material ha demostrado ser una alternativa importante para reducir el volumen de neumáticos acumulado en depósitos legales e ilegales.

Los manuales utilizados por el *California Integrated Waste Management Board* (GeoSyntec Consultants, 1998a, b, c, d, e), describen los variados usos de la goma triturada en los depósitos de basura. Cada manual consta de las siguientes partes: requerimientos de regulación, criterio de desempeño, características del material y la guía para el uso particular del material en el vertedero. Los cinco manuales clasificados según el uso son:

- Material para el recubrimiento diario
- Material para el drenado de lixiviados
- Fundación para la capa final de recubrimiento
- Material protector en las capas
- Material para el sistema colector de gases

Cosgrove (1995) realizó pruebas para el uso de goma triturada en sistemas de drenaje, enfocándose en estudiar los esfuerzos generados en la interfase entre la goma y la geomembrana. Encontró que los esfuerzos que se generan en la interfase permiten el uso de la goma para este fin, con ciertas limitaciones de pendientes, dependiendo del tipo de membrana usada.

Edil et al. (2004) estudiaron el comportamiento de la goma triturada en sistemas de recolección de lixiviados. Según el estudio, el material demostró tener buenas cualidades para la absorción de compuestos orgánicos volátiles (*Volatile Organic Compounds, VOC*). Los autores mencionan que para un sistema de recolección de lixiviados en un vertedero de una hectárea, se pueden emplear unos 300,000 neumáticos para hacer una capa de 0.3 m de espesor.

Por otro lado, Humphrey y Blumenthal (1998) presentaron el caso de un vertedero usado por tres poblaciones en el estado de Maine, Estados Unidos, donde se hizo una expansión del mismo. La capa de drenaje del fondo, hecha con arena derivada de piedra caliza, se había endurecido causando una reducción en la permeabilidad, situación que disminuía la capacidad de drenado del sistema. Las autoridades se negaron a dar la licencia al nuevo vertedero hasta que este problema no fuera resuelto. La solución fue utilizar 300,000 neumáticos que se encontraban apilados en el vertedero, los cuales fueron triturados hasta alcanzar pedazos de 3 a 12 pulgadas (7.6 a 30.5 cm) y se colocaron como capa suplementaria de drenaje. Finalmente, el problema fue resuelto, la licencia fue otorgada y se eliminó la pila de neumáticos que igualmente representaba otro problema para las comunidades.

Un vertedero de 17 acres ubicado en Rockingham, Vermont, Estados Unidos, fue el primero en usar pedazos de goma triturada de una y dos pulgadas (2.5 y 5.1 cm) para el sistema de drenaje. La mitad del sistema se construyó con arena y la otra mitad con goma triturada. Pruebas de laboratorio encontraron que la goma triturada presentó iguales o mejores propiedades geotécnicas que la arena. Después de su clausura se realizaron tres monitoreos encontrando que la calidad de las descargas era la esperada y que el uso de la goma triturada no había producido daños en la geomembrana (Andrew y Guay, 1996).

## **USO DE LA GOMA TRITURADA PARA ABSORCIÓN DE METALES PESADOS Y SUSTANCIAS CONTAMINANTES**

No son muchas las investigaciones realizadas sobre el potencial de absorción de la goma triturada. Sin embargo, se ha logrado detectar un comportamiento retentivo de varias sustancias nocivas al ambiente. El riesgo de contaminación a cuerpos de agua superficiales y subterráneos impulsa esta iniciativa.

Estudios realizados por Gunasekara et al. (2000), revelaron la capacidad de absorción de la goma triturada. Concentraciones conocidas de sustancias orgánicas como el naftaleno y el tolueno, e iones de mercurio ( $Hg^{2+}$ , inorgánico) fueron sometidas a goma triturada (220 $\mu$ m a 280 $\mu$ m). El naftaleno y tolueno reflejaron coeficientes de absorción de 1340 y 225 ml/g, respectivamente. Los iones de mercurio revelaron una absorción un poco más lenta, pero con una buena afinidad.

Por otra parte, se determinó que los pedazos de goma triturada absorben los fertilizantes y pesticidas de los campos de golf (Carlson, 2004). Se trituraron gomas a diámetros de 6 a 9 mm y se colocaron entre estratos de arena y mezclas de arcilla con gravilla. Las concentraciones de nitrato, componente básico de fertilizantes, experimentaron una reducción de un 23% a un 58.6% de su concentración original. En consecuencia, se espera que el exceso de nitrato sea absorbido por la goma, mientras que los microorganismos del suelo ayudarán a consumir parte del mismo. El estrato de goma podría permanecer intacto por mucho tiempo mientras absorbe el nitrato. Un campo de golf puede consumir hasta 1,000 lb (453.5 kg) de pesticidas por año, los cuales penetran el suelo y llegan a aguas subterráneas (Carlson, 2004). Por tal razón es altamente recomendable utilizar goma triturada para absorber estas sustancias. En síntesis, con goma triturada se puede controlar el exceso de nitratos y fertilizantes que llegan al subsuelo y a los acuíferos.

El uso de gomas trituradas para retener sustancias disolventes como el benceno y o-xileno ha sido estudiado con resultados favorables. Concentraciones de 1.3 y 8.2 mg de benceno y o-xileno respectivamente pueden ser absorbidas por cada gramo de goma triturada (Kerchaw et al., 1997).

En Puerto Rico, Perales et al. (2003) están realizando un proyecto para medir la capacidad de absorción de la goma triturada de una forma más detallada. La investigación se proyecta en tres fases. En la primera se piensa diseñar el método de medición de absorbancia para diferentes sustancias. La segunda tratará la cuantificación de la absorción para diferentes concentraciones de las sustancias a estudiarse. La tercera fase estudiará el tiempo útil de la goma triturada basándose en su capacidad de absorción.

## **USO DE GOMAS TRITURADAS COMO AGREGADO PARA MEZCLA DE CONCRETO**

La posibilidad de utilizar gomas trituradas como agregado para las mezclas de concreto ha sido estudiada numerosas veces como, por ejemplo, en los estudios realizados por Biel y Lee (1994), Huynh y Raghavan (1997), Kathib y Bayomy (1999) y Nehdi y Khan (2001). Los primeros resultados revelaban una disminución considerable en las propiedades mecánicas del material, como la resistencia a la compresión y a la tensión. En pruebas hechas por Biel y Lee (1994), donde se sustituyó la totalidad del agregado por goma triturada, la resistencia a compresión se redujo en un 90%.

Estudios más recientes lograron estabilizar el efecto de la goma en la mezcla obteniendo resultados favorables en pruebas de compresión y tensión. Khatib y Bayomy (1999) estudiaron el comportamiento de muestras de concreto con diferentes cantidades de goma triturada. Sus resultados revelan que para obtener resultados similares a los de la mezcla convencional de concreto, el contenido óptimo de material reciclado no debe exceder el 20% del volumen total de agregado.

La posibilidad de una reacción adversa de la goma triturada con la alcalinidad del cemento fue estudiada por Huynh y Raghavan (1997). Estos investigadores expusieron pedazos de goma a ambientes alcalinos extremos por un período de 4 meses. La deformación de las partículas de goma fue mínima, por lo que no atribuyen que el material falle bajo una exposición prolongada a la pasta del cemento.

### **Posibles usos del concreto con goma triturada**

Ciertas cualidades del concreto con goma triturada, como su peso unitario, lo hacen aplicable para propósitos arquitectónicos como fachadas y elementos decorativos (Nehdi y Khan, 2001). Al ser una mezcla más liviana puede utilizarse en lugares donde se requieran elementos de concreto no estructurales de mayor tamaño. Es importante redundar en el hecho de que la mezcla no debe utilizarse para propósitos estructurales por su pérdida de resistencia mecánica. Deben realizarse mayor número de investigaciones antes de utilizar el concreto con goma triturada para este fin.

Se recomienda el uso de esta mezcla para la construcción de aceras peatonales, caminos para ciclistas y deportistas (Schimizza et al., 1994). Todo tipo de losa a la cual no se le apliquen cargas grandes puede construirse con la mezcla mencionada. En Puerto Rico existen aproximadamente unas 10,000 millas (16,093 km) de calles municipales. De éstas, un número sustancial no tiene aceras peatonales, sin mencionar las calles que requieren reparaciones. Si se utilizara la mezcla de gomas para la construcción y reparación de aceras peatonales, se consumirían alrededor de 17,800 libras de goma por milla (4.94 toneladas por kilómetro), lo que equivale a unos 990 neumáticos por milla (615.15 neumáticos por kilómetro).

Se espera un mayor uso de esta mezcla en las carreteras, como material para barreras de sonido (*sound barriers*), barreras de concreto *Jersey*, como base para rieles de ferrocarril y en todos los lugares donde se requiera resistencia a la explosión y reducción de vibraciones.

El uso del concreto con goma triturada también es recomendado para trincheras de tuberías (Nehdi y Khan, 2001). Si las trincheras para tuberías se construyeran con este material se consumiría un neumático por cada diez pies de trinchera (0.33 neumáticos por metro).

### **Características del concreto con goma triturada:**

A continuación se mencionan varias de las características presentadas por esta mezcla:

- **Asentamiento:** se acerca a cero cuando un 40% del volumen total del agregado es sustituido con goma triturada (Nehdi y Khan, 2001). En pruebas realizadas por Raghavan et al. (1998) morteros con partículas de goma mostraron un desempeño comparable o mejor que los morteros de control.
- **Peso unitario:** al aumentar la cantidad de goma en la mezcla se reduce el peso unitario de la misma ya que la densidad de la goma es menor que la del agregado.
- **Contenido de aire en la mezcla:** el contenido de aire aumenta con el aumento de goma triturada. Al no absorber el agua de la mezcla como suele ocurrir con los vanos del agregado natural, la goma tiende a retener burbujas de aire en su superficie (Nehdi y Khan, 2001).
- **Encogimiento plástico:** la goma triturada reduce el encogimiento plástico en el mortero. Al comparar muestras de concreto regulares con muestras de goma triturada, se observó que el agrietamiento se reduce en tamaño y cantidad. En pruebas realizadas por Raghavan et al. (1998), se observó que en morteros de control se desarrollaron grietas de 0.9 mm mientras que en muestras con goma se generaron grietas de 0.4 mm a 0.6 mm.
- **Resistencia mecánica:** la capacidad de tensión y de compresión se afecta de manera inversamente proporcional al contenido de goma en la mezcla. En pruebas realizadas por Edil y Senouci (1993), se reemplazaron diferentes cantidades de agregados finos y gruesos con goma triturada a tamaños equivalentes. Al reemplazar el agregado grueso en su totalidad, se perdió un 50% de la resistencia en tensión y un 85% de la resistencia en compresión. Al sustituir el agregado fino, la resistencia a la

tensión disminuyó un 50% y la resistencia a la compresión un 65%. Kathib y Bayomy (1999) determinaron que las muestras con goma mostraban un comportamiento similar al de la mezcla convencional al sustituir un máximo de 20% del volumen total de agregado. Al exceder esta cantidad las muestras con goma fallaron antes de que las muestras control lo hicieran.

- Textura de superficie: a mayor aspereza de las partículas de goma, mayor será su adhesión con la mezcla. Para conseguir esto los pedazos de goma deben ser sometidos a los siguientes procesos:
  - tratamiento ácido.
  - tratamiento con látex y tetracloruro de carbono (CCl<sub>4</sub>) diluidos.
- Uso de cementos especiales: la alta resistencia y las características de enlace de algunos cementos especiales como el cemento de oxiclورو de magnesio pueden mejorar grandemente el desempeño del concreto con goma. En pruebas realizadas con mezclas de cemento de oxiclورو de magnesio y goma por Biel y Lee (1996), se observó un aumento en resistencia de compresión de 2.5 veces la resistencia de la mezcla de cemento Portland con goma. Se recomienda limitar la cantidad de goma a un 17% del volumen total de agregados para aplicaciones estructurales.
- Resistencia a impactos y sonido: el contenido de goma en elementos de concreto aumenta su resistencia a impactos. Las propiedades elásticas de la goma ayudan a absorber la energía del impacto y a suprimir el sonido del mismo.
- Comportamiento bajo fuego: Hernández y Barluenga (2003) estudiaron el comportamiento de unos cilindros de concreto de alta resistencia (*high-strength concrete* o *HSC*) con diferentes cantidades de goma sustituyendo al agregado. El *HSC* es un concreto con mayor rigidez y durabilidad. Por su poca permeabilidad es más propenso a explotar ante un aumento repentino de temperatura. Las cantidades de goma mejoraron notablemente el comportamiento del concreto bajo fuego, ya que la presión de vapor fluye por los espacios dejados por la goma derretida. También se observó que la curvatura presentada por los especímenes debido al alza en temperatura, mantenía una relación lineal con el porcentaje de goma en el mismo, reduciendo el valor de la curvatura a medida que se incrementa el contenido de goma.

## USO DE LA GOMA TRITURADA EN ASFALTO

El estudio del caucho-asfalto ha tenido un desarrollo importante en Europa. Suiza fue el primer país en desarrollar este concepto en la década de los 60 y tuvo la patente de éste conocida como “*rubit*”. En países como Francia se empezaron a mejorar las propiedades del asfalto añadiéndole caucho, carbón y polietileno.

En Estados Unidos el caucho-asfalto es una tecnología que ha demostrado ser económicamente viable en ciertas situaciones. Cuando se trata de una vía rural con poco tráfico el uso de este material puede resultar desventajoso en términos económicos. Por el contrario, en áreas donde se tenga un problema constante de agrietamiento y deterioro del asfalto, causado por tráfico excesivo o por condiciones extremas de temperatura, resulta ser una alternativa económica (Rubber & Plastic News, 1998a).

Estados como Arizona, Florida y California siguen usando el caucho-asfalto en donde quiera que se presente agrietamiento, siempre y cuando se necesite un período de vida grande de la vía. Esto se debe al alto costo del caucho-asfalto, alrededor del doble del costo del asfalto convencional (Rubber & Plastic News, 1998b). Otros estados como Tennessee, Texas y Nuevo México están experimentando con este material.

El caucho-asfalto comúnmente usado en Arizona contiene un 20% en peso de goma triturada. Arizona ha asfaltado 1,100 millas (1,770 km) de carreteras con caucho-asfalto, equivalente a 120,000 toneladas de las cuales, como se mencionó anteriormente, el 20% es caucho. Algunas de las ventajas que trae el uso del caucho-asfalto son: mayor durabilidad de la superficie, menor mantenimiento, buen rodaje y mayor reducción de ruido (Rubber & Plastic News, 1998b).

La reducción del ruido fue estudiada inicialmente en Bélgica en 1981 por E. Nakkel (ARPG, 1991). Desde esa época se han llevado a cabo varios estudios que verifican esta cualidad. En su estudio, Nakkel encontró que el caucho-asfalto podía generar una reducción del 75% en el nivel de decibeles medido. Horst Pochhacker comparó el costo de las barreras de protección de ruido que se deben construir usando asfalto convencional y el costo del caucho-asfalto, encontrando que este segundo puede generar un ahorro de hasta diez veces el valor de las barreras (ARPG, 1991).

El único caso, hasta ahora, donde se usó este material y se encontraron algunos agrietamientos leves es en la interestatal 19 al sur de Tucson, Arizona (Way, 1999), para la cual se usó un 10% de goma triturada en la mezcla. Por su parte, Hicks et al. (1998) hicieron un estudio de costos de ciclo de vida de caucho-asfalto usando tres escenarios

diferentes y un período de análisis de 40 años. Los resultados determinísticos demostraron que para los tres casos tomados, el uso del caucho-asfalto resultó ser económicamente más viable que el asfalto convencional. La Tabla 3 presenta los resultados de este análisis.

**Tabla 3: Resultados de un análisis de costo de ciclo de vida usando caucho-asfalto (Hicks et al., 1998).**

Escenario	Valor actualizado del Costo (\$/m <sup>2</sup> )				Total	Ahorro con caucho asfalto (\$/m <sup>2</sup> )
	Rehabilitación	Mantenimiento	Ahorro	Retraso		
<b>Preservación - Sello granular</b>						
Convencional	19.45	1.71	1.15	2.73	22.74	4.91
Caucho - Asfalto	16.39	1.69	2.30	2.05	17.92	
<b>Preservación - Cubierta delgada de Hot Mix Asphalt</b>						
Convencional	22.02	1.75	0.75	2.87	25.89	6.20
Caucho - asfalto	18.06	1.66	2.15	2.14	19.70	
<b>Cubierta estructural</b>						
Convencional	24.11	1.66	1.90	2.40	26.28	8.78
Caucho - asfalto	14.20	1.78	0.60	2.13	17.50	

El Departamento de Transportación de California (Caltrans) ha usado caucho-asfalto desde 1978 en varios lugares y climas del estado. Los proyectos anteriores a 1983 que usaron caucho-asfalto se construyeron usando espesores de capas iguales a los requeridos por el asfalto convencional. Observaciones realizadas reflejaron que estas vías presentaban un período de vida mayor. En 1983, Caltrans desarrolló un proyecto experimental que incluyó varios espesores de caucho-asfalto y asfalto convencional. En éste se observó que se podía obtener un beneficio de costo respecto a una vida de servicio prolongada, si se comparaban espesores iguales de ambos tipos de asfalto. Se encontró además una equivalencia de espesores para obtener comportamientos similares entre ambos asfaltos (Van Kirk, 1997).

El consumo se estima en unos 2,500 neumáticos por milla (1553 neumáticos por kilómetros) por carril para una capa de 2 pulgadas (5.08 cm) de caucho-asfalto. La experiencia ha demostrado que a pesar de que los costos del caucho-asfalto pueden ser una y media o dos veces más que los del asfalto convencional, existe la viabilidad económica de usar este material.

Algunos problemas de salud fueron reportados en 1993 por trabajadores de proyectos donde se estaba usando caucho-asfalto. Caltrans evaluó los riesgos de seguridad y salud, tomó datos de más de 15 proyectos encontrando que las muestras de aire del humo del caucho-asfalto estuvieron por debajo de los límites establecidos por Cal-OSHA (Van Kirk, 1997).

Rinck y Napier (1991) evaluaron la exposición de los trabajadores a las emisiones de humo cuando se usa caucho-asfalto. Se realizó un monitoreo a dos tipos de trabajadores, los que estaban en contacto directo con la mezcla (*aggregate spreader operator*) y a los que tenían un contacto lejano con ella (*roller operator*). Los resultados del monitoreo demostraron claramente que el riesgo asociado al uso del caucho-asfalto era despreciable.

Existen dos tecnologías para fabricar el caucho-asfalto, una se conoce como el proceso húmedo y la otra como el proceso seco. En la primera se mezcla la goma con el cemento asfáltico antes de mezclarla con los agregados. En el proceso seco se mezcla primero la goma con el agregado antes de hacerlo con el cemento asfáltico (Velar, 1997).

En Puerto Rico existen trabajos previos realizados para estudiar el uso del caucho-asfalto en la Isla. Particularmente se menciona el trabajo realizado por Velar (1997), donde se encontraron comentarios y conclusiones que llevan a pensar que el uso en Puerto Rico no es viable, sin embargo investigaciones más recientes podrían demostrar lo contrario. El trabajo presenta también una guía de especificaciones para el caucho-asfalto en Puerto Rico. A continuación se destacan algunos aspectos mencionados en el trabajo de Velar (1997):

- Los contratistas indican que el caucho-asfalto puede doblar la vida convencional de los pavimentos, pero no existen suficientes datos de largo tiempo para hacer un estudio de costo-desempeño y, por lo tanto, no se puede determinar si el alto costo inicial es justificado.
- La industria local del asfalto se encuentra preocupada por las modificaciones que habría que hacer en las plantas y por el equipo que habría que tener para el manejo del caucho-asfalto.

- De ambos procesos (el húmedo y el seco), el seco sería más económico que el húmedo a largo plazo. El proceso húmedo requiere la instalación un tanque de almacenamiento adicional para el aglutinante (o bitumen), una bomba que pueda manejar esta mezcla que resulta ser más viscosa y abrasiva, e instalar además el equipo necesario para hacer la mezcla.
- Para un proceso seco, las modificaciones en las plantas de producción tipo *Batch* (por lotes) serían menores. Sin embargo de las 19 plantas en Puerto Rico sólo dos son de este tipo (datos para 1997), las demás son tipo tambor. No obstante, el proceso seco se podría aplicar a estas últimas mezclando la goma triturada al momento de salir del tambor, con lo cual no se requerirían modificaciones significativas del equipo.
- Existe preocupación relacionada al impacto en la salud humana respecto a las emisiones producidas por el caucho-asfalto. Sin embargo, estudios del Departamento de Transportación de Florida (FDOT, por sus siglas en inglés) determinaron que, aunque los niveles de toxicidad del caucho-asfalto son mayores que los del asfalto convencional, éstos no sobrepasan los niveles establecidos por EPA.
- El caucho-asfalto presenta un mejor desempeño cuando se diseña a mezcla abierta (*open graded*) ya que presenta un alto coeficiente de fricción. Sin embargo, en Puerto Rico este tipo de mezclas no es usado comúnmente. Menciona el autor que la viabilidad de usar este tipo de mezcla podría ser un tema de estudio futuro.
- Un contenido de goma triturada de 20% es demasiado alto debido a los problemas de emisión de humo que presentó en el laboratorio donde se hicieron los estudios. Una mezcla con un 5% de goma triturada es aceptable ya que alcanza a mejorar lo suficiente las propiedades mecánicas para el escenario particular de la Isla.
- Para implementar el proceso húmedo, las plantas existentes tendrían que adecuar sus instalaciones. Estos costos se verían reflejados en el precio del caucho-asfalto, el cual se estima sería un 67% más costoso que el asfalto convencional.
- El proceso húmedo es económicamente más efectivo para aplicar en Puerto Rico, ya que las plantas no tienen alimentadores para el asfalto recuperado del pavimento, el cual es necesario para el proceso seco.
- Aunque las características del asfalto se mejoran con la goma triturada, el costo inicial y el riesgo potencial asociado con la implementación total de esta tecnología la hace menos probable de ser aceptada por la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico.
- El caucho-asfalto puede ser usado en áreas de poco tráfico o en los paseos.
- Se deben realizar estudios de costos de ciclo de vida con el fin de proveer estimados reales.

En cuanto a la mezcla en frío para el asfalto, Hossain et al. (1997) estudiaron la viabilidad de usar pedazos de goma como sustituto de agregados en el asfalto frío. En el estudio encontraron que el asfalto elaborado con goma es más débil que el convencional, ya que los pedazos de goma (12.5 mm) que reemplazan al agregado no tienen la dureza de éste.

La empresa REMA, mencionada anteriormente, ha investigado el posible uso del caucho-asfalto aplicado a Puerto Rico. A continuación se mencionan algunos aspectos destacados por los directivos de la empresa en relación a la aplicación de esta tecnología en Puerto Rico:

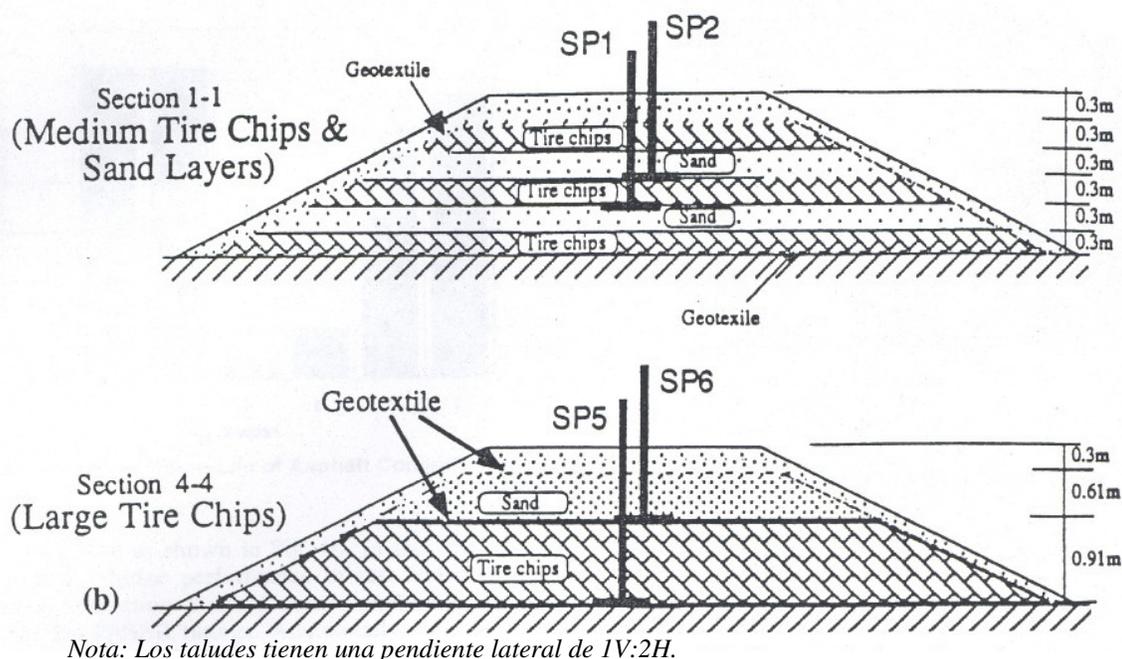
- Las plantas de asfalto de la Isla necesitarían una inversión aproximada de \$460,000 para adaptar su infraestructura para producir caucho-asfalto en proceso húmedo.
- Una mezcla con 20% de goma puede consumir 2,000 neumáticos por milla (1,243 neumáticos por kilómetro) por carril.
- Países como Sudáfrica, Brasil, Méjico y Canadá han comenzado a usar el caucho-asfalto.
- El caucho-asfalto es efectivo en reparaciones de asfalto en concreto. Cuando una losa de hormigón presenta fractura, no es necesario repararla, bastaría con colocar una capa de caucho-asfalto para hacer que funcione nuevamente. Esto es posible debido a que el material impide la propagación de grieta por reflexión (*non reflecting cracking*). Igualmente es utilizado para hacer reparaciones en asfalto flexible.
- Las mezclas *open graded* no deben ser usadas en estacionamientos o intersecciones, ya que el neumático del vehículo al girar o al arrancar genera esfuerzos de corte sobre la capa y es posible que desprenda el agregado que está en la superficie.
- En Puerto Rico no es muy común usar mezclas *open graded* debido a que unos ensayos que se hicieron con ésta resultaron ser no satisfactorios. Sin embargo, parece que las muestras de asfalto se colocaron en lugares donde no es recomendable hacerlo (intersecciones, estacionamientos).

- A pesar de que es económicamente más viable usar caucho-asfalto en vías de gran volumen, es posible emplearlo en vías rurales de poco tráfico, ya que los espesores de las capas a usar serán menores que los convencionales y esto compensaría el alto costo que se debe pagar por el material.

### USO DE LA GOMA TRITURADA EN TERRAPLENES

Existen variados estudios para determinar la efectividad de la goma triturada cuando es usada en rellenos y terraplenes, por ejemplo los realizados por Humphrey et al. (1993), Bosscher et al. (1997), Lee et al. (1999), Yang et al. (2002) y Ghazavi (2004). Lee et al. (1999) sugieren que la goma triturada mezclada con arena puede ser efectiva para rellenos livianos. En dicho trabajo se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar las propiedades de resistencia y rigidez y se determinó que estas mezclas son adecuadas para dichas aplicaciones.

Para terraplenes en autopistas, Bosscher et al. (1997) encontraron que la mezcla de goma y suelo es adecuada para este uso, siempre y cuando se haya realizado una buena compactación. Se recomienda además, que la goma triturada debe ir cubierta por capas gruesas de suelo ( $\approx 1$  m) y no capas delgadas ( $\approx 0.3$  m). Finalmente el artículo presenta un procedimiento de diseño para terraplenes usando este material. La Figura 3, tomada de este trabajo, muestra el perfil de dos diseños realizados usando goma triturada.

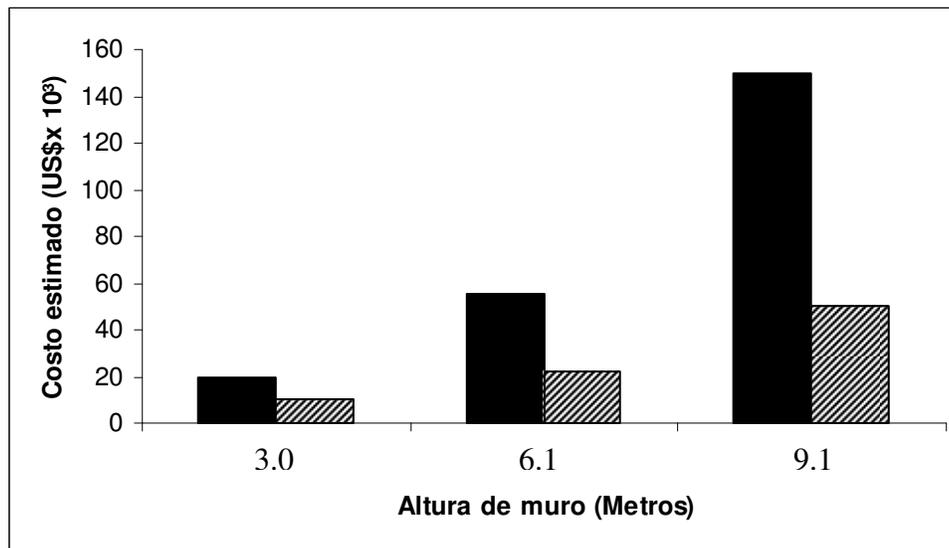


**Figura 3: Diseño de dos secciones de terraplenes usando goma triturada (Bosscher et al., 1997). Reproducido con permiso del editor (American Society of Civil Engineers).**

Humphrey y Nickels (1997) determinaron espesores límites para que no se presenten deformaciones inaceptables en el asfalto cuando éste se soporta en un terraplén de suelo y goma triturada. Un modelo numérico para estimar deformaciones se comparó con mediciones en el campo utilizando la viga Benkelman. La importancia de este estudio radica en que la goma triturada es tres veces más compresible que el material granular y esto podría generar grandes deformaciones en el asfalto. Los resultados del estudio sugieren que con capas de 127 mm de pavimento, 457 mm de suelo y 610 mm de goma triturada, se pueden obtener deformaciones aceptables.

A través de ensayos de laboratorio, Cecich et al. (1996) estudiaron las propiedades ingenieriles de la goma triturada tales como el peso unitario, conductividad hidráulica, resistencia en cortante, cohesión y ángulo de fricción interna. Luego diseñaron muros de retención de diferentes alturas usando goma triturada como material de relleno. Los diseños se compararon con muros similares que usaban arena como material de relleno. Primeramente, se estableció que los muros hechos con goma triturada eran substancialmente más económicos que los de arena. Además, el factor de seguridad que se obtuvo usando goma triturada fue mayor que el encontrado usando arena.

La Figura 4 está tomada del trabajo de Cecich et al. (1996). Allí se comparan los costos totales de muros de retención usando arena (en negro) y usando goma triturada (líneas).



Nota: Costos basados en un muro de 100 pies (30.5 m) de largo.

**Figura 4: Costos estimados de muros de retención usando arena (sombreado) y goma triturada (líneas) (Cecich et al., 1996).**

Igualmente la Tabla 4 presenta los factores de seguridad para vuelco y deslizamiento para muros de retención con goma triturada como material de relleno y muros de retención con arena como material de relleno.

**Tabla 4: Factores de seguridad para muros de retención usando arena y goma triturada como relleno (Cecich et al., 1996).**

Altura del muro (m)	Factor de seguridad de deslizamiento		Factor de seguridad de vuelco	
	Relleno de arena	Relleno de goma triturada	Relleno de arena	Relleno de goma triturada
3.05	4.15	>20	2.10	>20
6.10	1.68	10.37	1.84	2.12
9.14	1.54	3.35	1.65	2.14

La Tabla 5 presenta un resumen de varios estudios existentes hechos para determinar las propiedades mecánicas de la goma triturada, específicamente aquellas relacionados a la resistencia al corte de este material.

**Tabla 5: Parámetros de resistencia al corte de la goma triturada.**

Autor	Tamaño máximo (mm)	Peso Unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Presión de confinamiento (kPa)	Parámetros de resistencia al corte <sup>(1)</sup>			
				10% deformación unitaria		20% deformación unitaria	
				c (kPa)	$\phi$ (°) □ □	c (kPa)	$\phi$ (°) □ □
Ahmed (1993)	13	6.2	36 - 199	22.7	11.2	35.8	20.5
Benda (1995)	9.5	5.9	35 - 55	0	20.6	0	32.1
Cecich et al. (1996)	12.5	5.97	3.5 - 27.6 <sup>(2)</sup>	----	----	7 <sup>(2)</sup>	27 <sup>(2)</sup>
Masad et al. (1996)	4.75	6.24	150 - 350	70	6	82	15
Yang et al. (2002)	10	5.73	23.4 - 84.1	21.6	11	37.7	18.8
Gutiérrez et al. (2004)	4.75	6.3	25 - 100	0	11.3	0	14.9

Nota: (1): Obtenido de ensayos triaxiales excepto Cecich et al. (1996).

(2): Obtenido de ensayos de corte directo. Rango de presiones presentado corresponde a la presiones normales del ensayo y los parámetros de resistencia al corte corresponden al los valores pico.

Trabajos como el de Youwai y Bergado (2003), se orientan a determinar las propiedades de la goma triturada mezclada con arena, con el fin de que sea usada como material para rellenos. Para esto se realizaron ensayos triaxiales usando mezclas con diferentes proporciones de goma y arena. Al incrementar la proporción de arena en la mezcla, se observó un aumento en la densidad, el peso unitario y el esfuerzo de corte, mientras que la compresibilidad de la mezcla se redujo. Este comportamiento resultó significativo en mezclas cuya proporción de arena sobrepasó el 30%.

## **LA UNIVERSIDAD Y SU PAPEL EN LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA AMBIENTAL**

Los esfuerzos tanto privados como gubernamentales no han logrado revertir completamente la tendencia a la acumulación de neumáticos, aún de goma triturada. Se percibe en el contexto de Puerto Rico una tendencia a la inestabilidad de la sustentabilidad de la presente circunstancia.

La universidad como generadora de conocimiento no ha tenido un papel preponderante en la resolución de este problema ambiental. En este trabajo se presenta únicamente un estudio científico sobre el potencial uso de goma para la absorción de sustancias contaminantes, llevado a cabo en la Universidad de Puerto Rico-Mayagüez (UPRM). Aunque no es el único, es posible indicar que los esfuerzos actuales y pasados han tenido un carácter celular. Esto es, no existe un esfuerzo programático integrado que fuerce a estas investigaciones institucionales a converger para plantear una solución (o un conjunto de soluciones) definitiva. En resumen, la institución no ha tenido una participación estructural y/o efectiva en estos esfuerzos. Resulta de particular interés la participación de instituciones con áreas de investigación científico-tecnológicas con una componente central de la ingeniería dada la ubicuidad de dicha rama del conocimiento en el desarrollo de tecnología.

La Universidad de Puerto Rico-Mayagüez representa una institución ideal para liderar el apoyo académico a desarrollos técnicos o tecnológicos en el tema de reciclado de materiales. En efecto, dicha institución es la única universidad estatal en Puerto Rico con programas de ingeniería. A éstos se le suman programas graduados y en otras áreas científicas, como Química, Física y Biología, con interés y potencial impacto en el tema del reciclado.

La UPRM provee un ambiente apropiado para realizar esta revisión de información basada en la experiencia propia de los ambientes universitarios. Este trabajo intelectual es congruente tanto con la actividad del profesorado como la de estudiantes idóneos, graduados y subgraduados, con conocimientos esenciales de materiales de ingeniería.

Además del aporte específicamente científico, la universidad debe ofrecer tanto a las agencias reguladoras (gubernamentales) como a las empresas un ámbito o foro de discusión sobre las diversas iniciativas de reciclado de neumáticos. Es en ese contexto científico que las áreas críticas sustentables pueden ser evaluadas en forma rigurosa.

El presente estudio es un paso en la dirección correcta. Es la primera iniciativa, sustentada con fondos gubernamentales, con la participación de profesores y estudiantes de la institución y el apoyo logístico de las empresas más comprometidas en el reciclado de neumáticos. A continuación se presentan algunas conclusiones resumidas de este trabajo.

## **CONCLUSIONES**

- La actuación de las autoridades gubernamentales frente al problema de acumulación de neumáticos desechados ha sido beneficiosa en el sentido en que ya no se están desechando neumáticos en los vertederos. Sin embargo, casi la mitad de los neumáticos están siendo exportados enteros y no se están aprovechando como materia prima para diversas aplicaciones.
- Aunque ya no se siguen acumulando en los vertederos, todavía existe una gran cantidad de neumáticos que reposan en éstos. Es necesario no sólo evitar la acumulación, sino también eliminar los neumáticos que aún permanecen en vertederos.
- Empresas como REMA han demostrado que el negocio de reciclar y triturar goma en Puerto Rico puede ser rentable. Sin embargo, es necesario estimular la demanda para que nuevas empresas entren al mercado y las que ya existen se fortalezcan.
- El caucho-asfalto es un producto que podría ser beneficioso en muchos sentidos, principalmente económicos, a largo plazo, y de mejoramiento de las propiedades y características del asfalto convencional. Aunque el volumen de goma triturada que consume esta aplicación es mediano, su posible uso en Puerto Rico debe ser estudiado con mayor detalle y sin intereses fijados. Existen estudios locales previos que no recomiendan su uso en la Isla. Sin embargo, por la literatura consultada se conoce que en estados con características similares a las de Puerto Rico, como Florida y California, este producto ha sido utilizado con éxito desde hace muchos años.

- El hormigón con goma triturada usado para bloques y barreras de sonido es una alternativa que presenta un mediano beneficio económico y un mediano consumo de goma. Sin embargo, las características y propiedades de los productos fabricados con ésta se mejoran notablemente. Por lo dicho anteriormente, ésta se convierte en una de las aplicaciones a apoyar y estimular. Además su campo de acción se puede diversificar trasladándose a la construcción de aceras y usándose en hormigón arquitectónico, entre otras.
- Sobre la goma triturada como material de relleno en terraplenes, no se tuvo conocimiento sobre experiencia a nivel local. Sin embargo, la literatura existente es muy extensa y se sabe que investigadores en Puerto Rico tienen interés en desarrollar estudios en este campo. Esta alternativa resulta beneficiosa al demandar grandes volúmenes de goma triturada. El producto fabricado con ésta mejora las características frente al fabricado con otros y, económicamente, resulta más ventajoso, principalmente en muros de retención.
- El uso de la goma triturada para absorción de contaminantes es un campo de estudio que se encuentra en etapa de nacimiento. Los beneficios económicos o de demanda de material no son conocidos con certeza, aunque hay expectativas generadas. Lo que es reconocido es la buena capacidad de este material para absorber compuestos altamente contaminantes. Las investigaciones llevadas a cabo en la UPRM pueden profundizar más sobre el tema y podrían ampliarse a evaluaciones sobre los beneficios adicionales (economía y consumo de material).
- El vertedero en el municipio de Humacao demuestra que el uso de goma triturada en el sistema de recolección de lixiviados resulta beneficioso al consumir grandes cantidades de material. Los beneficios económicos que este uso genera se consideran medianos. Sin embargo, el uso de este material mejora notablemente el sistema para el cual es usado. El uso de esta alternativa implica tener buenos controles en los vertederos y cumplir con toda la reglamentación existente, situación que no siempre se presenta en Puerto Rico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen en primer lugar a la Legislatura de Puerto Rico por el apoyo brindado para la elaboración de este proyecto mediante la Resolución Conjunta 1526. La accesibilidad brindada por la Autoridad de Desperdicios Sólidos (ADS), REMA, Bloques Essan, Terralina Environmental y Techniques Recycling es particularmente reconocida. La valiosa ayuda de Aurelix González Martínez y Omayra Santos Ortiz en la edición final de este artículo y su correspondiente informe técnico es reconocida por los autores.

## REFERENCIAS

- Ahmed, I. (1993). "Laboratory study on Properties of Rubber-soils", Joint Highway Research Project, Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, Purdue University, Indiana.
- Andrews, D. W. y Guay, M. A. (1996). "Tire Chips in a Superfund Landfill Cap: A Case History of the First Use of a Tire Chip Drain Layer", Nineteenth International Madison Waste Conference, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison.
- ARPG (1991). "Noise Reduction with Asphalt Rubber", Asphalt Rubber Producers Group, Washington, D.C.
- Benda, C. C. (1995). "Engineering Properties of Scrap Tires Used in Geotechnical Applications", Report 95-1, Materials and Research Division, Vermont Agency of Transportation, Montpelier, Vermont.
- Biel, T. D. y Lee, H. (1994). "Use of Recycled Tire Rubbers in Concrete", *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*, Third Materials Engineering Conference, San Diego, California.
- Bosscher, P. J., Edil, T. B. y Kuraoka, S. (1997). "Design of Highway Embankments Using Tire Chips", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 295-304.
- Carlson, E. (2004) "Golfing toward a greener environment", *Perspective*, University of Wisconsin-Madison College of Engineering, Vol. 30, No. 2.
- Cecich, V., Gonzales L., Hoisaeter, A., Williams, J. y Reddy, K. (1996). "Use of Shredded Tires for Retaining Structures", *Waste Management and Research*, Vol. 14, pp. 433-451.
- Cosgrove, T. A. (1995). "Interface Strength Between Tire Chips and Geomembrane for Use as a Drainage Layer in a Landfill Cover", *Geosynthetics*, Industrial Fabrics Association, St. Paul, Maine, Vol. 3, pp. 1157-1168.
- Eldin, N. N. y Senouci, A. B. (1993). "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 4, pp. 478-496.
- Edil, T. B. y Bosscher, P. J. (1994). "Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 453-464.
- Edil, T. B., Park, J. K. y Kim, J. Y. (2004). "Effectiveness of Scrap Tire Chips as Sorptive Drainage Material", *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 7, pp. 824-831.
- GeoSyntec Consultants Inc. (1998a). "Guidance Manual – Tire Shreds as Final Cover Foundation Layer Material at Municipal Solid Waste Landfill", preparado para California Integrated Waste Management Board.

- GeoSyntec Consultants Inc. (1998b). "Guidance Manual – Tire Shreds as Gas Collection Material at Municipal Solid Waste Landfill", preparado para California Integrated Waste Management Board.
- GeoSyntec Consultants Inc. (1998c). "Guidance Manual – Tire Shreds as Operations Layer Material at Municipal Solid Waste Landfill", preparado para California Integrated Waste Management Board.
- GeoSyntec Consultants Inc. (1998d). "Guidance Manual – Shredded Tires as Alternative Daily Cover at Municipal Solid Waste Landfill", preparado para California Integrated Waste Management Board.
- GeoSyntec Consultants Inc. (1998e). "Guidance Manual – Tire Shreds as Leachate Drainage Material at Municipal Solid Waste Landfill", preparado para California Integrated Waste Management Board.
- Ghazani, M. (2004). "Shear Strength Characteristics of Sand-Mixed With Granular Rubber", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 22, No. 3, pp. 401-416.
- Gunasekara, A. S., Donovan, J. A. y Xing, B. (2000). "Ground Discarded Tires Remove Naphtalene, Toluene and Mercury from Water", *Chemosphere*, Vol. 41, pp.1151-1160.
- Gutiérrez, E., Cataño, J. and Pando, M.A. (2004). "Evaluation of Mechanical Properties of Puerto Rican Shredded Tires for Application of Embankment and Retaining Wall Fill", Undergraduate Research Report, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Puerto Rico at Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico, May.
- Hernández-Olivares, F. y Barluenga, G. (2004). "Fire Performance of Recycled Rubber-Filled High-Strength Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp.109-117.
- Hicks, R. G., Lundy, J. R. y Epps, J. A. (1998). "Life Cycle Costs for Asphalt-Rubber Paving Materials", Rubber Recycling 98, Toronto, Canada, October 22/23.
- Hossain, M., Sadeq, M. A., Funk, L. P. y Maag, R. G. (1997). "A Study of Tire Chips as Road Construction Material", Department of Civil Engineering, Kansas State University, <http://www.ctre.iastate.edu/pubs/semiseq/proceedi/session4/hossain>.
- Humphrey, D. N., Sandford, T. C., Cribbs, M. M. and Manion, W. P. (1993) "Shear Strength and Compressibility of Tire Chips for Use of Retaining Wall backfill", *Transportation Research Record*, No. 1422, pp. 29-35.
- Humphrey, D. N. y Blumenthal, M. (1998). "Civil Engineering Applications of Scrap Tires: An Emerging Market", Resource Recycling, Portland, Oregon, Diciembre, [www.resource-recycling.com](http://www.resource-recycling.com)
- Humphrey, D. N. y Nickels, W. L. (1997). "Effect of Tire Chips as Lightweight Fill on Pavement Performance", Proc. of the XIV Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundations Engineering, A.A Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Huynh, H. y Raghavan, D. (1997). "Durability of Simulated Shredded Rubber Tire in Highly Alkaline Environments", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, pp. 138-143.
- Khatib, Z. K. y Bayomy, F. M. (1999). "Rubberized Portland Cement Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 206-213.
- Kershaw, D. S., Kulic, B. C. y Pamukcu, S. (1997). "Ground Rubber: Sorption Media for Ground Water Containing Benzene and O-xylene", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 4, pp. 324-334.
- Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. y Novell. C.W. (1999). "Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 2, pp. 132-141.
- Masad, E., Taha, R., Ho, C. y Papagiannakis, T. (1997). "Engineering Properties of Tire/soil Mixtures as a Lightweight Fill Material", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 19, No. 3, pp. 297-304.
- Nehdi, M. y Khan, A. (2001). "Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications", *Cement, Concrete, and Aggregates*, CCAGDP, Vol. 23, No. 1, pp.3-10.
- Perales, P. O., Arocha, M. A. y Román, F. (2003). "Waste Tire Crumb Rubber as Sorbent to Remove Inorganic and Organic Contaminants from Aqueous Solutions", comunicación privada.
- Raghavan, D., Huynh, H., y Ferraris, C. F. (1998). "Workability, Mechanical Properties, and Chemical Stability of a Recycled Tire Rubber-Filled Cementitious Composite", *Journal of Materials Science*, Vol. 33, No. 7, pp. 1745-1752.
- Rinck, G. y Napier, D. (1991). "Exposure of Paving Workers to Asphalt Emissions (When Using Asphalt-Rubber Mixes)", Asphalt Rubber Producers Group, Washington, D.C.
- Rubber & Plastic News (1998a). "Asphalt Rubber Passes the Test, Here to Stay", *Rubber and Plastic News*, The Rubber Industry's International Newspaper, Crain Publications.
- Rubber & Plastic News (1998b). "Road Work Ahead", *Rubber and Plastic News*, The Rubber Industry's International Newspaper, Crain Publications.
- Schimizza, R. R., Nelson, J. K., Amirkhanian, S. N. y Murden, J. A. (1994). "Use of Waste Rubber in Light-Duty Concrete Pavements", *Infrastructure: New Materials and Methods of Repair*, Third Materials Engineering Conference, San Diego, California.
- Van Kirk, J. L. (1997). "Caltrans Pavement Rehabilitation Using Rubberized Asphalt Concrete", *RPA News*, Rubber Pavement Association, presentado a American Chemical Society, Rubber Division.

- Velar, J. F. (1997). "Characterization of Hot Mix Asphalt Using Crumb Rubber", MSc. Thesis, University of Puerto Rico at Mayagüez, Civil Engineering and Surveying Department, Mayagüez, Puerto Rico.
- Velásquez, E. (2001). "Reciclaje de Neumáticos: Una Gran Industria", *Dimensión*, Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, CIAPR, Vol.4, pp. 29-32.
- Way, G. B (1999). "Asphalt Rubber – The Arizona Experience", Arizona Department of Transportation-Materials Group, *Asphalt Rubber 1999: A Global Summary of Practices*, Rubber Pavements Association International Symposium, Tempe, Arizona, February.
- Yang, S., Lohnes, R.A. y Kjartanson, B.H. (2002). "Mechanical Properties of Shredded Tires", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 25, No. 1, pp. 44-52.
- Youwai, S. y Bergado D. T. (2003). "Strength and Deformation Characteristics of Shredded Rubber Tire-Sand Mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 2, pp. 254-264.

## APÉNDICE A

**Tabla A.1: Transportadores de Neumáticos Desechados Autorizados de Puerto Rico**

Compañía	Dirección Física	Dirección Postal	Administrador Teléfonos
K&V Tire Collector	Calle Argentina 221 Comunidad las Dolores Río Grande	Calle Argentina 221 Comunidad las Dolores Río Grande, PR 00745	Sra. Virginia Castellano Cel. 635-1846
Solid Waste Solution (Fast Move Transport Inc.)	Carr. PR-775, Km 7.8 Bo. Rabanal, Cidra	PO Box 1243 Cidra, PR 00739	Sr. Eduardo Ojeda 714-4265 -Fax 739-9771 Cel 318-2371
Transporte Los Matos	Barrio Cuyón Sector Rincón. Carr. 716 Aibonito	Apartado 1232 Aibonito, PR 00705.	Sr. Luis Matos Tel 735-2278
R4 Enterprises Corp.	Carr. #2 Km 6.8 Edif. M 220 Villa Caparra Guaynabo.	Garden Gills Plaza MSC 309. 1353 Carr. 19 Guaynabo, PR. 00966	Sr. Julio González Tel 783-7721 396-0405
Chris & John	Bo. Laguna, Carr. 403 km 1.1 Aguada	Apartado 1208 Aguada, PR 00602	Sr. Samuel Morales Tel 868-7621. Cel 647-4608
CN Recycling	Carr. 486 KM 12.1 Bo. Quebrada Camuy	HC 02 Box 8300 Camuy, PR 00627	Sr. César Pérez Pérez 262-3468 409-4121
RDB Recycle	Calle Fernández García 101 Luquillo	Box 423 Luquillo, PR 00773	Sr. Rafael Díaz Bonano Tel. 889-3209
JR Recycling	Carr. 859 Km, 2.6 HC Bo. Santa Cruz Calle Robles Carolina	PO Box 6011 STE 142 Carolina, PR 00984	Sr. Johnny Rodríguez Tel. 750-4972
PR Safety Transport	Calle 26 x x39 Ponce	PO Box 276 Mercedita Ponce, PR 00715-0276	Sr. Neil Borrero 844-9018, 647-0452 378-4466
Transportadores de Neumáticos Inc.	Carr # 1, Km 25.2 Bo Mameyes Guaynabo	PO Box 443 112-286 Los Paseos ,SJ Guaynabo, PR.	Sr. Juan Ubarri 790-0190, 287-9334 731-2680
REMA Inc.	Carr. #1, Km. 28.8 Barrio Río Cañas, Caguas	PO Box 31068 San Juan, PR 00910.	Ing. Edgardo Velásquez 645-7381

Compañía	Dirección Física	Dirección Postal	Administrador Teléfonos
Próspero Tire Recycle	Calle Providencia 251 Villa Palmeras	Calle Providencia 251 Villa Palmeras San Juan PR 00936	Sr. Jorge Rodríguez 728-5722, 726-1740
Estructuras Ambientales Inc.	Ave. Américo Miranda, San Juan	PO Box 360977	Sr. Enrique Ruiz
El Nuevo Ciclo	Carr. 779 Km., 4.9 Comerio	HC02 PO Box 5176 Comerio, PR 00780.	Sr. Edwin Ortiz 875-3574, 875-2130
Comercial Incineración / Comercial Recycling	Urb. Industrial Canovanilla Carr. PR -3 Km 13.6	PO Box 9086 Plaza Carolina Station Carolina PR 00988- 086.	Sr. Carlos Rodríguez 257-7370, 750-0738.

**Tabla A.1: (Cont.) Transportadores de Neumáticos Desechados Autorizados de Puerto Rico**

Orellanes Transport	Urb. Rosa María Calle 4 E-1 Carolina, PR 00985	Urb. Rosa María Calle 4 E-1 Carolina PR 00985	Sr. Orellanes Maldonado 757-8897
Super Tire Collector System	Bo. Cambalache Bella Vista Canóvanas, PR.	Box 3001 # 279 Río Grande PR. 00745	Sra. Margarita Castellanos Cel: 635-3492
William Rivera Sánchez	Urb. Villa Rosa 2 B- 24 Guayama, PR 00784.	Urb. Villa Rosa 2 B-24 Guayama PR. 00784.	Sr. William Rivera Sánchez 866-5846
CO Contractor	Calle Barbosa # 11 Bo. Coquí Aguirre, PR 00705	PO Box 737 Aibonito, PR 00705.	Sr. Orlando Díaz Vázquez 735-1447
Transportadores de Neumáticos Inc.	Carr # 1, Km 25.2 Guaynabo, PR.	PO Box 443 Guaynabo, PR.	Sr. Juan Ubarri Tel. 790-0190 Cel. 287-9334
Gema Oil Services Inc.	Carr. 635, Km 0.6 Bo Mameyes, Guaynabo	100 Grand Blvd. Suite 112-286 Los Paseos SJ	Sr. Rafael Cannabal Tel. 731-2680
Skit Service	Box 371810 Cayey, PR 00737	Box 371810 Cayey, PR 00737	Sra. Dianellis Rodríguez

**Nota:** Todos los teléfonos tienen código de área 787.