

SIIO, Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa

## Gestión de envases vacíos de agroquímicos, dos propuestas para el Sudoeste Bonaerense

Antonela Sorichetti<sup>1</sup>, Laura Mammini<sup>1</sup>, Andrea Savoretti<sup>1</sup> y Alberto Bandoni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UNS, Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS) – Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO) – Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC), Argentina {antonela.sorichetti, laura.mammini, savoretti}@upso.edu.ar

<sup>2</sup> Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI), Universidad Nacional del Sur (UNS) – CONICET, Camino La Carrindanga km 7, Bahía Blanca 8000, Argentina abandoni@plapiqui.edu.ar

**Resumen.** Con la reciente reglamentación de la Ley Nacional 27.279, se establecen los lineamientos para la aplicación del Sistema de Gestión Integral de los Envases Vacíos de Fitosanitarios y/o Domisanitarios en la República Argentina. Dicha Ley y su respectiva Resolución N° 327/17 motivan el presente trabajo donde se presentan dos propuestas para la logística general de la gestión integral de los envases vacíos, aplicadas en el Sudoeste Bonaerense. En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos aplicando un modelo de localización y asignación de rutas minimizando los costos de transporte de la recolección de envases, y un modelo de localización-ruteo minimizando los kilómetros totales a recorrer, fijando las localizaciones y tamaños de los Centros de Acopio Transitorios habilitados hasta el momento. En segundo lugar, se implementan ambos modelos permitiendo la posibilidad de optimizar las localizaciones de los Centros y se comparan ambos resultados. Los resultados muestran que optimizando la localización de Centros y asignación de rutas se logra disminuir los costos totales, mientras que en el modelo de localización-ruteo se disminuyen en 304 km la distancia a recorrer.

### 1 Introducción

Los agroquímicos, principalmente los plaguicidas, tienen uso difundido en la agricultura y en programas de control de vectores en todo el mundo; se utilizan ampliamente en el hogar, la escuela y la industria. La incidencia de las intoxicaciones por plaguicidas es significativa en los países en desarrollo e incluye, entre otras, las exposiciones accidentales de niños, las de tipo laboral a jóvenes trabajadores agrícolas, y las debidas a plaguicidas en desuso. Característicamente, los países en desarrollo han sido los más grandes usuarios de fitosanitarios, con un consumo del 75% de la producción mundial. La exposición a plaguicidas es motivo particular de preocupación con respecto a los países en desarrollo, donde las personas pueden verse doblemente expuestas en circunstancias en las cuales la salud se ha visto socavada por otros factores como la desnutrición [1].

El problema se acentúa cuando se produce el manejo inadecuado de los agroquímicos y sus envases, tanto de fertilizantes como de plaguicidas. En el caso específico de los envases de agroquímicos, los mismos constituyen un serio y creciente problema para el ambiente. En nuestro país, Argentina, la creciente generación de envases obsoletos y la falta de propuestas para su minimización y disposición final adecuada se trasluce en un problema incontrolado. La reutilización y el lavado de estos residuos en fuentes naturales provocan una doble contaminación de recursos naturales (suelo y agua), como así la exposición directa del productor y su familia con daño indirecto para la salud humana y del ambiente en general. La importancia del problema impone un abordaje urgente para completar el diagnóstico que permita diseñar una gestión adecuada de los agroquímicos en todo su ciclo de vida, producción, envasado, distribución, aplicación por parte del productor y el tratamiento del residuo y la disposición final adecuada de los plaguicidas y envases obsoletos. Es fundamental minimizar los riesgos de los efectos nocivos e irreversibles sobre la salud del trabajador rural y su familia, del consumidor y de la población en general [2].

El Sudoeste Bonaerense (SOB, Figura 1), región de estudio del presente trabajo, no escapa de dicha problemática ya que tiene como principal actividad económica la producción agropecuaria, que genera permanentemente envases vacíos de fitosanitarios, siendo ésta una problemática que sólo se ha tratado de manera aislada y poco eficiente en los distintos municipios.



**Fig. 1.** Localización del área de estudio: Sudoeste Bonaerense. (Elaboración propia)

Con el fin de solucionar la creciente problemática sobre la disposición final de los envases vacíos de fitosanitarios, a fines del mes de febrero del año 2018 se reglamentó la Ley Nacional 27.279 [3] donde se establecen los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión de los envases vacíos de fitosanitarios, en virtud de la toxicidad del producto que contuvieron, requiriendo una gestión diferenciada y condicionada. Específicamente en el Art. 11 inciso d) se menciona que se debe establecer la logística general para la gestión integral de los envases vacíos de fitosanitarios, y en el

Art. 13 se especifica que el sistema se articulará en tres etapas: a) del Usuario al Centro de Almacenamiento Transitorio (CAT), b) del CAT al Operador (OP), c) del OP a la Industria. En base a los lineamientos de la mencionada ley, en este trabajo se implementan dos tipos de logística para la recolección de envases vacíos agroquímicos en el SOB.

## 2 Revisión bibliográfica

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), emitieron en mayo de 2008 el documento titulado Directrices sobre opciones de manejo de envases vacío de plaguicidas como parte del Código Internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas [4]. En este instrumento se incluyen ejemplos de planes de manejo de envases que operan en el mundo en países industrializados y en desarrollo:

“El plan australiano de manejo de envases, drumMUSTER, es un programa completo de servicio al cliente desarrollado por empresas industriales. Los agricultores y los fabricantes de químicos veterinarios pagan una tarifa de \$ 0,04 australianos (€ 0,024) por litro o kilogramo para la mayoría de los productos vendidos en envases no retornables, para financiar el programa drumMUSTER. En 2003, el programa recolectó el 35 por ciento del total de los envases (principalmente envases de 20 litros), con los que se distribuía aproximadamente el 70 por ciento del volumen total de agroquímicos y químicos veterinarios vendidos en Australia. Entre 1999 y abril de 2004, aproximadamente 5.600 recolecciones de envases limpios de uso único resultaron en 4,85 millones de envases levantados de las unidades de producción agrícola, representando más de 7.400 toneladas de residuos transportados hacia las áreas controladas de material de relleno. El costo reportado del programa es de € 759/tonelada.

El plan belga de manejo de envases es administrado por Phytifar-Recover. A los miembros se les factura anualmente el financiamiento del plan de manejo de envases, en proporción al volumen real de material de empaque que ingresa al mercado. La operación está dividida en tres tipos de usuarios de plaguicidas: i) productores agrícolas y horticultores, ii) empresas de fumigación, y iii) usuarios de grandes barriles de más de 60 litros. En 2003, 483,36 toneladas de envases de plaguicidas fueron recolectadas, lo que representa más del 92 por ciento del peso total estimado de envases puestos en el mercado en ese año. El costo del programa en 2003 fue de € 704.229, sin embargo, el costo por kilogramo ha bajado con los años.

En Canadá existe un gravamen fiscal que se cobra a todos los fabricantes de plaguicidas, de un monto de CAD 0,54 (aproximadamente USD 0,36) por cada envase puesto en el mercado, para financiar el plan de recolección y reciclaje. Los usuarios llevan los envases vacíos limpios a unos 1.250 centros receptores a lo largo de Canadá. El plan de manejo de envases recolecta y elimina anualmente 658 toneladas. En 2003, 5,4 millones de envases fueron recolectados, agregando más de 55 millones de envases desde 1989. En 2008, los productores de Canadá recolectan sobre una base

voluntaria aproximadamente 70 por ciento de todos los envases puestos en el mercado. El costo total anual del programa es de CAD 4 millones (USD 2,9 millones).

Con respecto a la situación en Latinoamérica, en Brasil la recolección y el reciclaje de envases usados de plaguicidas comenzó como una iniciativa industrial, que luego fue fortalecida con la introducción de una nueva ley requiriendo que los agricultores, los distribuidores y los fabricantes de plaguicidas recolectaran, retornaran y garantizaran un destino final (reciclaje e incineración) para los envases usados. En 2002, se aprobó una ley para regular el destino final de los envases vacíos de agroquímicos. En 2003, la recolección total era del orden de 7.800 toneladas, representando 35 por ciento del total de envases vendidos. En 2004, se recolectaron 15.300 toneladas, lo cual representó un aumento de 65 por ciento de la tasa de recolección.

En Chile, el programa comenzó en 2001 con cuatro centros receptores. Luego creció de manera constante desde 13 centros en 2004 hasta 25 a comienzos de 2008, cubriendo entonces un alto porcentaje de las necesidades de recolección del país". (FAO, 2008).

### 3 Estudio del caso

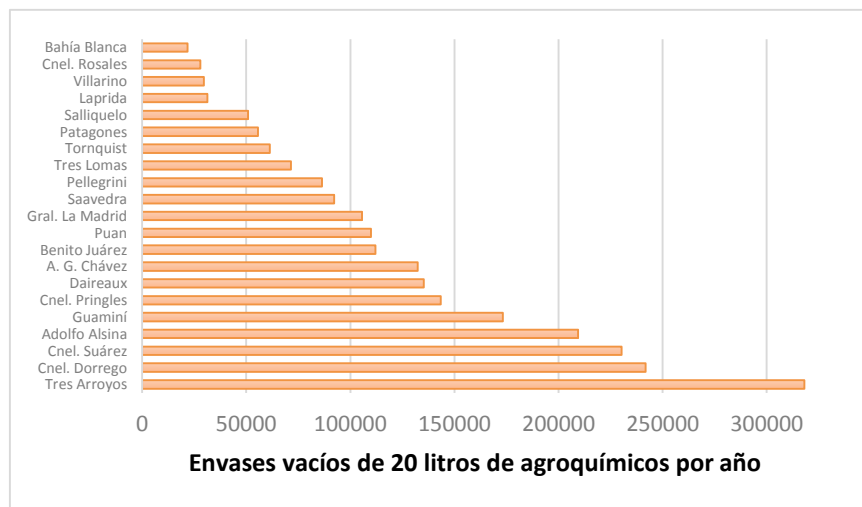
Al evaluar las opciones para desarrollar una gestión adecuada en el manejo de envases en el SOB, el primer paso es analizar los tipos y cantidades de envases de agroquímicos que habrá que manejar. Según el Código Internacional de Conducta sobre la Distribución y Utilización de Plaguicidas, la evaluación debería comenzar con una revisión de la información de plaguicidas disponible en el registro existente, registros de aduanas y otros sistemas de recolección de datos. El objetivo de la revisión es analizar la distribución geográfica, el tipo y las cantidades de envases que se distribuyen a los usuarios. Para conocer la cantidad de envases que se generan en el SOB se calcula la dosis promedio para los diferentes cultivos, de 12 litros de agroquímicos por hectárea implantada<sup>1</sup>, y con información primaria publicada por la Confederación de Asociaciones Rurales de Buenos Aires y La Pampa (CARBAP) de área sembrada por cultivo en la Campaña 2015/2016 [5] se calcula cuántos envases vacíos de 20 litros de agroquímicos se generan por año en la región de estudio como se muestra en la Figura 2.

El Código Internacional de Conducta sobre la Distribución y Utilización de Plaguicidas establece también que al determinar la estructura de un plan de manejo de envases se debe considerar su base legal, cómo estará financiado e incentivado, y la parte práctica de su infraestructura y logística. En la Pcia. de Buenos Aires se aprobó recientemente la Ley 27.279 de Gestión de Envases Vacíos de Fitosanitarios (Resolución N° 327/17) mediante la cual se establecen los lineamientos y etapas del sistema de gestión integral de envases vacíos de fitosanitarios. En dicha Ley, se especifica que el sistema se articulará en tres etapas: a) del Usuario al CAT, b) del CAT al OP, c) del OP a la Industria. Además, en el Art. N°5 apartado b) especifica que el tránsito inter-

---

<sup>1</sup> Dato obtenido por medio de entrevistas a distintos aplicadores de agroquímicos.

jurisdiccional no podrá ser prohibido por las provincias, pero si razonablemente reglamentado. Con estas herramientas que provee la legislación se valida la estrategia propuesta en este trabajo de presentar dos soluciones para la recolección de envases vacíos de agroquímicos integrando a 21 partidos del SOB. Si bien la región está constituida por 22 partidos, Monte Hermoso no se incluye en el problema ya que no genera envases vacíos de agroquímicos.



**Fig. 2.** Cantidad de envases vacíos de agroquímicos de 20 litros generados por año en cada partido del SOB. (Elaboración propia)

En el apartado 3.3 del Código Internacional de Conducta sobre la Distribución y Utilización de Plaguicidas se detallan distintas logísticas para desarrollar un plan de manejo de envases: “Existen dos maneras de llevar a cabo un programa de recolección de envases, a través de la distribución invertida o con una red de centros de recolección. La distribución invertida utiliza la infraestructura que fue establecida para distribuir los productos a los usuarios, como un mecanismo para recuperar materiales en sentido inverso. Como una alternativa al modelo de distribución invertida, un plan puede establecer una red de centros de recolección con puntos en los que los usuarios puedan entregar los envases vacíos. Los centros de recolección pueden ser utilizados para realizar la segregación de los distintos materiales de cada envase y el pre-tratamiento, como la trituración y las pacas, para aumentar la densidad y mejorar la eficiencia del posterior transporte” (FAO, 2008). La alternativa de red de centros de recolección es la que prevé la legislación existente y es la que se propone en los modelos matemáticos presentados en este trabajo.

“Un aspecto muy importante en la logística es el pre-tratamiento de los envases para mejorar ya sea la eficiencia del transporte o el proceso de reciclaje y eliminación.

Los factores limitantes para la carga que un vehículo puede transportar son el volumen y el peso. Al transportar envases vacíos, los vehículos alcanzan su límite de volumen sólo con una fracción de su máxima capacidad de carga. Al incrementar la densidad de los materiales con procesos como la trituración y la compactación en pacas, el peso que transportan los vehículos aumenta significativamente.

Estos procesos de pre-tratamiento pueden ser realizados con equipos fijos o móviles. Los equipos fijos permanecen en los centros de recolección y procesan los envases que son llevados allí. El equipo móvil de pre-tratamiento puede ser transportado a los diferentes puntos de recolección para procesar las pilas de envases y prepararlas para su posterior transporte hacia los centros de reciclaje. Como una alternativa, el equipo móvil de pre-tratamiento puede ser incorporado a los vehículos de recolección. Generalmente no es la opción preferida en los planes existentes en otros países debido al tiempo que toma la trituración de los envases y su compactación en pacas, tiempo que el vehículo permanece inactivo". (FAO, 2008). Actualmente, ningún CAT habilitado en el SOB cuenta con equipos para el pre-tratamiento de los envases que se almacenen allí, con lo cual se considera para este trabajo que el transporte sea realizado en vehículos acondicionados con un equipo móvil de pretratamiento.

El Decreto N° 79/98 de Tránsito y Seguridad Vial [6] de nuestro país establece las dimensiones máximas autorizadas y pesos máximos transmisibles a la calzada y las tolerancias en los pesos por eje para los diferentes tipos de transporte. En este marco, el peso máximo permitido en ruta no puede superar las 45 toneladas. Si se considera que la recolección será llevada a cabo con un vehículo que cuente con un triturador móvil de 4 toneladas aproximadamente, más las 29 toneladas propias del vehículo debido a los pesos del chasis, semirremolque y acoplado; la capacidad del vehículo se estima en 10.130 envases en promedio dado que el recipiente más utilizado es el de glifosato de 20 litros de polietileno de alta densidad de asa simple. El vehículo que realice el transporte desde los CAT a los OP podrá trasladar hasta 19.300 envases ya que este vehículo no tendrá el triturador móvil, trasladará los envases ya triturados. La escala de tiempo usada para los modelos matemáticos es semanal y la oferta de envases de cada partido en ese periodo de tiempo se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Oferta semanal de envases en cada partido del SOB.

Partido	N° de envases	Partido	N° de envases
(1) A. Alsina	4.026	(12) Laprida	602
(2) A. G. Chávez	2.546	(13) Patagones	1.071
(3) B. Blanca	420	(14) Pellegrini	1.660
(4) B. Juárez	2.155	(15) Puan	2.114
(5) C. Dorrego	4.651	(16) Saavedra	1.773
(6) C. Pringles	2.757	(17) Salliqueló	980
(7) C. Rosales	538	(18) Tornquist	1.180
(8) C. Suarez	4.428	(19) Tres Arroyos	6.118
(9) Daireaux	2.603	(20) Tres Lomas	1.373
(10) Gral. la Madrid	2.030	(21) Villarino	569
(11) Guaminí	3.331		

El objetivo es desarrollar y comparar dos propuestas para la logística de recolección de envases vacíos de fitosanitarios. En la primera se implementa un modelo de localización donde se determinan las ubicaciones óptimas de los CAT y de los OP en función de la oferta de envases de cada partido por semana y en el caso de los partidos donde no se instalen CAT, se determina a cuáles CAT instalados es conveniente que lleven sus envases. Dicho modelo minimiza los costos por kilómetros recorridos y por la carga a transportar. En la segunda propuesta se aplica un modelo de localización-ruteo donde se identifican las localizaciones óptimas para la instalación de los CAT y además se diseña el circuito de recolección entre los CAT seleccionados. A diferencia del modelo anterior, solo se minimiza los kilómetros a recorrer. Ambas propuestas se implementan en primera instancia con los CAT habilitados hasta el momento según la información disponible en el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) [7], y luego se comparan los resultados optimizando las localizaciones y el ruteo. El presente problema tiene como campo de estudio los veintiún partidos del SOB generadores de envases. Se identificó como punto de recolección, para el caso de los partidos con CAT habilitado, la ubicación exacta del CAT. En los partidos que no cuentan con un CAT instalado aún, se identificó la ciudad cabecera como lugar para la recolección.

La capacidad máxima de cada CAT habilitado fue obtenida de la página web del OPDS [7]. Dado que la mayoría de los partidos del SOB no poseen aún CAT habilitados se estimó su capacidad en 5.000 envases ya que es el tamaño intermedio de CAT dentro de los habilitados hasta el momento, y para el partido de Tres Arroyos por ser un gran generador de envases, se estimó su capacidad en 8.000. En la actualidad existen cuatro Plantas Operadoras en la Pcia. de Buenos Aires [7], las mismas están ubicadas en los partidos de Tigre, Pergamino, Gral. Arenales y Zárate.

#### **4 Metodología**

Como metodología de trabajo para abordar el problema de la red de recolección y disposición de envases de agroquímicos en el SOB, se utiliza la programación matemática planteando, resolviendo y verificando resultados de dos modelos de optimización del diseño y operación de la red, en base a información de campo recolectada en los distritos de dicha región. El análisis de los resultados se llevará a cabo comparando las conclusiones de los modelos con información cuantitativa y cualitativa obtenida a partir de fuentes secundarias, tales como páginas web de instituciones públicas y privadas con injerencia en el área de la agricultura y en el área medioambiental, así como de fuentes primarias como las Secretarías de Ambiente de distintos distritos del SOB.

#### 4.1 Modelo A: Propuesta de localización de los CAT y asignación de rutas

El objetivo del modelo es minimizar el costo de transporte de los envases involucrados en el Sistema de Gestión Integral de Envases Vacíos de Fitosanitarios. Para ello el modelo debe determinar la cantidad óptima de CAT a instalar en los distintos partidos del SOB como así también la cantidad necesaria de OP y sus localizaciones con el fin de tratar todos los envases vacíos de fitosanitarios que se generan en el SOB.

Nomenclatura:

##### Conjuntos:

i: partidos del SOB,  $i: 1, \dots, 21$ .

j: CAT a instalar en los partidos del SOB.

k: OP instalar en los partidos del SOB.

##### Parámetros:

$d_{ij}$ : distancia desde el partido i al CAT j (km).

$r_{jk}$ : distancia desde el CAT j al OP k (km).

$h_i$ : cantidad de envases que se generan en el partido i (env).

CE: costo de transporte por envase ( $\$6/\text{env}$ )<sup>2</sup>.

CT: costo de transporte por kilómetro ( $\$21,04/\text{km}$ )<sup>3</sup>.

CCAT<sub>j</sub>: capacidad de almacenamiento en el CAT j (env).

COPR<sub>k</sub>: capacidad de almacenamiento en el OP k (env).

MI: cantidad mínima de envases que se pueden transportar en las rutas i-j, j-k (300 env)<sup>4</sup>.

MSC: cantidad máxima de envases que se pueden transportar en las rutas i-j de acuerdo a la capacidad del vehículo. (10.130 env).

MSO: cantidad máxima de envases que se pueden transportar en las rutas j-k de acuerdo a la capacidad del vehículo. (19.300 env).

NC: cantidad máxima de CAT que se desea instalar (centros).

NOP: cantidad máxima de OP que se desea instalar (plantas).

##### Variables:

---

<sup>2</sup> Dato obtenido mediante una entrevista con el personal de una de las empresas transportistas autorizadas para el transporte de envases vacíos de agroquímicos.

<sup>3</sup> Dato reportado por la Universidad Católica de Córdoba actualizado a noviembre de 2017.

<sup>4</sup> Política adoptada por los autores para que no se realice el transporte entre nodos, por cantidades mínimas de envases.



-Binarias:

$x_j$ : toma el valor de 1 si el CAT  $j$  se instala en  $j$ , 0 si no se instala en  $j$ .

$y_k$ : toma el valor 1 si el OP  $k$  se instala en  $k$ , 0 si no se instala en  $k$ .

$v_{ij}$ : toma valor 1 si se recorre la ruta desde el partido  $i$  al CAT  $j$ , 0 si no.

$w_{jk}$ : toma valor 1 si se recorre la ruta desde el CAT  $j$  al OP  $k$ , 0 si no.

-Positivas:

$e_{ij}$ : cantidad de envases que se transportan desde el partido  $i$  al CAT  $j$  (env).

$f_{jk}$ : cantidad de envases que se transportan desde el CAT  $j$  al OP  $k$  (env).

$z$ : variable a minimizar (\$).

$$\text{Min } z = \text{CE} \cdot \left( \sum_{i,j} \sum_{j \neq i} e_{ij} + \sum_{j,k} \sum_{k \neq j} f_{jk} \right) + \text{CT} \cdot \left( \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ij} + \sum_j \sum_k r_{jk} \cdot w_{jk} \right) \quad (1)$$

$$\sum_j e_{ij} = h_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i e_{ij} = \sum_k f_{jk} \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_i e_{ij} \leq \text{CCAT}_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_j f_{jk} \leq \text{COPR}_k \quad \forall k \quad (5)$$

$$v_{ij} - x_j = 0 \quad \forall i, \forall j \quad (6)$$

$$w_{jk} - y_k = 0 \quad \forall j, \forall k \quad (7)$$

$$\text{ML} \cdot v_{ij} \leq e_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (8)$$

$$\text{MSC} \cdot v_{ij} \geq e_{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (9)$$

$$\text{MSO} \cdot w_{jk} \geq f_{jk} \quad \forall j, \forall k \quad (10)$$

$$\sum_j x_j = \text{NC} \quad (11)$$

$$\sum_k y_k \leq \text{NOP} \quad (12)$$

$$x_j = 1, \text{ con } j \in \{4, 9, 13, 14, 15, 16, 21\} \quad (13)$$

$$x_j, y_k, v_{ij}, w_{jk} \in \{0,1\} \quad (14)$$

$$e_{ij}, f_{jk} \in \{E\} \quad (15)$$

La función objetivo (1) minimiza los costos de transporte involucrados en la gestión de envases vacíos de fitosanitarios. Estos incluyen el costo de transporte por envase desde los partidos a los CAT (primer término), el costo de transporte por envase desde los CAT a los OP (segundo término), el costo de transporte por kilómetro recorrido desde los partidos a los CAT (tercer término) y el costo de transporte por kilómetro recorrido desde los CAT a los OP (cuarto término).

La ecuación (2) garantiza que la cantidad de envases que se envíen hacia los diferentes CAT  $j$  desde cada partido  $i$  sea igual a la oferta de envases en ese partido. La ecuación (3) asegura que la cantidad de envases que llegue a cada CAT  $j$  desde los distintos partidos  $i$ , debe ser igual a la cantidad de envases que sale desde ese CAT hacia cada OP  $k$ . La ecuación (4) garantiza que la cantidad de envases que llegue a cada CAT  $j$  desde los distintos partidos  $i$  debe ser menor o igual a su capacidad. La ecuación (5) garantiza que la cantidad de envases que llegue a cada OP  $k$  desde los distintos CAT  $j$  debe ser menor o igual a su capacidad. La ecuación (6) permite la instalación de un CAT en  $j$  si se recorre la ruta entre el partido  $i$  y el CAT  $j$ . La ecuación (7) permite la instalación de un OP en  $k$  si se recorre la ruta entre el CAT  $j$  y el OP  $k$ . La ecuación (8) establece un límite mínimo para la cantidad de envases que se pueden transportar si se recorre la ruta entre el partido  $i$  y el CAT  $j$ . La ecuación (9) limita la cantidad de envases que se pueden transportar si se recorre la ruta entre el partido  $i$  y el CAT  $j$ . La ecuación (10) limita la cantidad de envases que se pueden transportar si se recorre la ruta entre el CAT  $j$  y el OP  $k$ .

La ecuación (11) indica la cantidad de CAT a instalar. La ecuación (12) indica que se puede instalar como máximo una cantidad NOP de OP. La ecuación (13) determina que CAT deben instalarse sí o sí, dicha ecuación se utiliza para identificar como sería la logística de recolección con los CAT existentes en la actualidad. La ecuación (14) establece la naturaleza binaria de las variables. La Ecuación (15) establece la naturaleza entera de las variables.

#### 4.2 Modelo B: Propuesta para la localización y ruteo

Dicho modelo es el presentado por Muñoz-Villamizar y col [8]. Se implementa permitiendo la instalación de los 7 CAT habilitados hasta el momento para diseñar el ruteo, y luego optimizando la localización de 7 CAT y el ruteo entre los CAT que se decida instalar.

Nomeclatura:

Conjuntos:

$i, j, h, f$ : partidos del SOB,  $i: 1, \dots, 21$ .

k, l: vehículos, k: 1, ..., 5.

Parámetros:

Cij: distancia real por ruta del nodo i al j (km).

C: número de CAT a abrirse (centros).

V: número de vehículos disponibles (vehículos).

Dj: oferta del partido j (env.).

CAPk: capacidad de vehículo k (env.).

N: Número de partidos

Variables:

-Binarias:

Ai: toma el valor de 1 si el CAT i se instala en el partido i, 0 si no se instala en i.

Xijk: toma el valor 1 si el vehículo k parte del CAT localizado en i a un partido j, 0 de otra manera.

Yjik: toma el valor 1 si el vehículo k va desde un partido j a un CAT localizado en i, 0 de otra manera.

Bjhk: toma el valor 1 si un vehículo k viaja desde un partido j a otro partido h, 0 de otra manera.

$$\text{Min } z = \sum_i \sum_j \sum_k C_{ij} \cdot X_{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k C_{ij} \cdot Y_{jik} + \sum_i \sum_j \sum_k C_{ij} \cdot B_{jhk} \quad (16)$$

$$\sum_i A_i \leq C \quad (17)$$

$$\forall i, A_i \geq \sum_j \sum_k X_{ijk} \quad \forall i \quad (18)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k X_{ijk} \geq \frac{\sum_j D_j}{\text{CAP}_k} \quad (19)$$

$$\sum_i X_{ijk} \leq \sum_h B_{jhk} \quad \forall j, \forall k \quad (20)$$

$$\sum_i X_{ijk} + \sum_h B_{hjk} = \sum_i Y_{jik} + \sum_f B_{jfk} \quad \forall j, \forall k \quad (21)$$

$$\sum_i \sum_k X_{ihk} + \sum_j \sum_k B_{jhk} = 1 \quad \forall h \quad (22)$$

$$\sum_h \sum_k B_{ihk} + \sum_i \sum_k Y_{jik} = 1 \quad \forall j \quad (23)$$

$$\sum_j X_{ijk} \leq \sum_h Y_{hik} \quad \forall i, \forall k \quad (24)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} \cdot D_j + \sum_j \sum_h B_{hjk} \cdot D_j \leq CAP_k \quad \forall k \quad (25)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \quad (26)$$

$$\sum_j \sum_h B_{jhk} \leq \left( \sum_j \sum_h B_{jhk} \right) + 1 \quad \forall k, \forall l \quad (27)$$

$$u_j - u_h + N \cdot B_{jhk} \leq N - 1 \quad \forall j, \forall h, \forall k \quad (28)$$

La ecuación 16 expresa la función objetivo. La misma minimiza la distancia total para satisfacer el objetivo de recolectar la totalidad de los envases que genera cada partido, de acuerdo a la localización de los CAT. La ecuación 17 especifica el número máximo de CAT que se desean abrir o localizar. La ecuación 18 garantiza que las rutas de los vehículos solo se pueden definir si proviene de un CAT abierto. La ecuación 19 calcula el número mínimo de rutas requeridas para satisfacer la oferta total de envases. La ecuación 20 garantiza que, si un partido es visitado desde un CAT, el vehículo debe ir a otro partido, comenzando por el mismo partido visitado y el mismo vehículo. Esta restricción inicializa la ruta y relaciona el primer partido visitado con la secuencia de partidos que debería visitar.

La ecuación 21 establece la secuencia de ruta completa para todos los partidos estableciendo que, si un partido es visitado, debe ir a otro partido o regresar al CAT en el mismo vehículo que realiza la ruta. La ecuación 22 garantiza que todos los partidos sean visitados una sola vez desde un CAT o desde otro partido. La ecuación 23 permite que después de que un vehículo visite un partido, se dirija a otro partido o vuelva a un CAT. La ecuación 24 obliga a todas las rutas de vehículos a comenzar y finalizar en el mismo CAT. La ecuación 25 restringe la capacidad de los vehículos para que la misma no sea superada. La ecuación 26 limita como máximo una ruta por vehículo. La ecuación 27 asegura que el tamaño de las rutas sea similar y la ecuación 28 elimina las subrutas que puedan formarse.

## 5 Resultados

Los modelos matemáticos fueron programados en el lenguaje GAMS (General Algebraic Modeling System) [9]. Como método de resolución se empleó el solver CPLEX. Ambos algoritmos fueron implementados en una computadora con procesador Intel(R) Core(TM) i3-5005U, 2,00 GHz y una memoria RAM de 4GB.

### 5.1 Resultados de modelo A

Al ejecutar el modelo A permitiendo solamente la instalación de los 7 CAT habilitados actualmente, y la instalación de un OP, la función objetivo resulta en \$622.970. Los CAT se instalan en los partidos predeterminados y el único OP que se necesita localizar, se localiza en Gral. Arenales recibiendo todos los envases recolectados en los 7 CAT. El detalle de los resultados se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Resultados del Modelo A con los CAT habilitados en la actualidad.

Partidos donde se instalan los CAT	Partidos asignados al CAT j	Porcentaje de ocupación del CAT j
4	2, 4, 8, 12, 19	100,0
9	9, 10, 11, 17	100,0
13	5, 13	100,0
14	11, 14, 20	99,4
15	1, 6, 8, 15,16, 18	99,5
16	8, 16	100,0
21	3, 5, 7, 18, 21	100,0

Como se puede observar, 5 de los CAT alcanzan el 100% de su ocupación y los 2 restantes alcanzan algo más del 99% de ocupación. Esto sucede porque la oferta total de envases por semana asciende a 46.925 y la suma de la capacidad de todos los CAT habilitados es de 47.000. Con lo cual es esperable que todos los CAT estén operando al máximo de su capacidad. La cantidad total de kilómetros a recorrer para completar la logística de la recolección de envases vacíos de agroquímicos es de 6.166 km. Dicha cantidad es elevada por tener que transportar los envases desde los distintos CAT hasta la planta operadora ubicada en Gral. Arenales, que es, de las que operan actualmente, la más cercana al SOB.

Cuando se optimiza el modelo sin determinar donde instalar la misma cantidad de CAT que en el caso anterior (7, para que los resultados sean comparables), la optimización de la función objetivo ocurre cuando se instalan los CAT en Adolfo Alsina, Benito Juárez, Cnel. Dorrego, Cnel. Suárez, Guaminí, Puán y Tres Arroyos. La función objetivo da \$ 404.720, el único OP que se necesita instalar, se localiza en Benito Juárez y los resultados se muestran en la Tabla 3. Dicho resultado es esperable ya que los 7 partidos seleccionados para instalar los 7 CAT, poseen la característica de generar más de 2.000 envases por semana, y como la función objetivo contempla el costo por kilómetro recorrido y también el costo por envase, la minimización de la función prioriza transportar menos envases a costa de recorrer más kilómetros y de esta manera la función objetivo disminuye en \$220.000 aproximadamente. Además, se puede observar que el porcentaje de ocupación de los CAT supera en todos los casos el 72%

de ocupación. La cantidad total de kilómetros a recorrer para completar la logística de la recolección de envases vacíos de agroquímicos es de 4.383 km. Dicha cantidad disminuye considerablemente respecto al caso anterior dado que los envases se transportan desde los distintos CAT hasta la planta operadora cuya localización óptima sería en Benito Juárez.

**Tabla 3.** Resultados del Modelo A optimizando las localizaciones de los CAT.

Partidos donde se instalan los CAT	Partidos asignados al CAT j	Porcentaje de ocupación del CAT j
1	1	80,5
4	2, 4, 6, 9, 10, 12, 13,18	99,6
5	5	93,0
8	8	88,6
11	11, 14	99,8
15	3, 15, 16, 17, 20, 21	72,3
19	7, 19	83,2

## 5.2 Resultados de modelo B

En primera instancia se le indica al modelo qué CAT deben estar instalados, y el resultado del mismo es el circuito de recolección minimizando la distancia total a recorrer. Dichos circuitos y la capacidad total alcanzada por cada vehículo se muestran en la Tabla 4. La función objetivo resultó en 2.550 km.

**Tabla 4.** Resultados del Modelo B con los CAT habilitados en la actualidad.

N.º DE VEHÍCULO	RUTA	Porcentaje de ocupación del vehículo
1	9-10-4-9	67,0
2	14-20-17-14	39,6
3	4-19-2-12-4	91,5
4	13-21-3-13	20,3
5	21-6-5-7-21	78,4
6	16-8-16-18-16	72,9
7	15-1-11-15	93,5

En segunda instancia, el modelo determina donde instalar los CAT, y diseña los nuevos recorridos minimizando la distancia total a recorrer. La optimización del recorrido se da cuando se instalan los CAT en Adolfo González Chávez, Bahía Blanca, Guaminí, Laprida, Saavedra, Tres Lomas y Villarino. Los circuitos y la capacidad

total alcanzada por cada vehículo se muestran en la Tabla 5. La función objetivo da 2.246 km.

De los resultados obtenidos del modelo B, se puede concluir que la localización actual de los CAT no es óptima ya que están situados en los partidos que se encuentran al sur o sobre los límites geográficos del SOB y la mayoría no son los grandes generadores de envases. Por este motivo el Modelo B decide instalar los CAT en Adolfo González Chávez, Bahía Blanca, Guaminí, Laprida, Saavedra, Tres Lomas y Villarino. Cinco de ellos, son partidos ubicados en la franja central del SOB que es la zona que más genera envases. La función objetivo disminuye en 304 km respecto al resultado anterior. En ninguno de los dos casos, la mayoría de los vehículos alcanzan un porcentaje de ocupación mayor al 95%. Esto se debe a que la oferta total de envases por semana es de 46.925 envases y la sumatoria de la capacidad de los vehículos asciende a 70.910.

**Tabla 5.** Resultados del Modelo B optimizando las localizaciones de los CAT.

N.º DE VEHÍCULO	RUTA	Porcentaje de ocupación del vehículo
1	3-18-5-7-3	62,9
2	11-9-11-1-11	98,3
3	12-2-4-10-12	66,4
4	20-17-20-14-20	39,6
5	21-3-21-13-21	20,3
6	2-12-6-19-2	93,5
7	16-8-16-15-16	82,1

## 6 Conclusiones y trabajos a futuro

La programación matemática resulta de mucha utilidad a la hora de resolver problemas concernientes a la logística de distribución o recolección de productos ya que permite simular diferentes contextos combinando diversas variables para predecir múltiples resultados con la finalidad de resolver algún problema de la vida real solo con el uso de una computadora y un software de programación. En este trabajo se utilizó el software GAMS para predecir cuáles serán las localizaciones óptimas de los CAT y de los OP con el fin de contribuir desde el ámbito científico a la toma de decisiones por parte de los intendentes de la región, ya que actualmente la implementación de un Sistema de Gestión Integral de Envases Vacíos de Fitosanitarios en la Pcia. de Buenos Aires, no se ha llevado a cabo en la mayoría de los partidos.

Como resultado de este trabajo se concluye que el modelo B no da como resultado las mismas localizaciones de los CAT que el modelo A ya que el B solo minimiza kilómetros y no tiene en cuenta el costo por el peso de la carga que se traslada de un

partido a otro, por lo que un modelo que solo minimice kilómetros no es suficiente en este tipo de logísticas ya que existe un costo por envase asociado.

Por lo tanto, se propone localizar nuevos Centros de Acopio Transitorios en los partidos de Adolfo Alsina, Cnel. Dorrego, Cnel. Suárez, Guaminí y Tres Arroyos (ya que en Benito Juárez y Puán ya están instalados), y una Planta Operadora en Benito Juárez para así disminuir los costos de transporte al tener que tratar los envases en las Plantas Operadoras ubicadas al norte de la Pcia. de Buenos Aires.

Como trabajo a futuro para lograr un modelo que se aproxime lo más posible a la realidad, se debe incorporar una expresión que calcule el costo en función de la superficie de los CAT y los OP a partir de conocer los costos precisos de los CAT habilitados hasta el momento y así estimar el valor por m<sup>2</sup> de los que aún no fueron construidos. Así, con dicha expresión, se podría modelar la logística de recolección y construcción de los CAT en el tiempo. Por otra parte, se debe incorporar al modelo A ecuaciones que diseñen el ruteo de la logística contemplando los costos por kilómetros recorridos y por peso de carga transportada.

## Referencias

1. Mott, L.: Our children at risk: The five worst environmental threats to their health. Natural Resources Defense Council, New York (1997)
2. Ministerio de Salud. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable: La problemática de los agroquímicos y sus envases, su incidencia en la salud de los trabajadores, la población expuesta por el ambiente. 1a ed. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable: OPS: AAM-MA, Buenos Aires (2007) 14-16
3. Ministerio de Salud y Derechos Humanos, Presidencia de La Nación. República Argentina: PRODUCTOS FITOSANITARIOS Ley 27279  
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/265000-269999/266332/norma.htm> (2016)
4. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: Código internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas. Directrices sobre opciones de manejo de envases vacíos de plaguicidas, Roma (2008)
5. Confederación de Asociaciones Rurales de Buenos Aires y La Pampa (CARBAP). <http://www.carbap.org/Sitio/Servicios/Estadisticas.asp>
6. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos, Presidencia de La Nación. República Argentina: TRÁNSITO Y SEGURIDAD VIAL Decreto 79/98  
<http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/45000-49999/48817/norma.htm> (1998)
7. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS). <http://sistemas.opds.gba.gov.ar/Establecimientos/Envases/MapaEnvases.php>
8. Muñoz-Villamizar, A. F., Montoya-Torres, J. R., and Herazo-Padilla, N.: Mathematical Programming Modeling and Resolution of the Location-Routing Problem in Urban Logistics. Ingeniería y Universidad. Vol. 18, no. 2. (2014) 271-289.
9. Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R.: GAMS, A User's Guide. GAMS Development Corporation Washington, DC. (2012)
10. Universidad Católica de Córdoba. <http://icda.ucc.edu.ar/contenido/pagina/90>