

## Aplicación de un modelo matemático de ruteo de vehículos para la recolección de envases vacíos de fitosanitarios en la provincia de Buenos Aires

A.E. Sorichetti<sup>1,2</sup>[0000-0002-2650-2207], M. González Prieto<sup>1,2,4</sup>[0000-0002-9123-5301], M.S. Moreno<sup>3,4</sup>[0000-0001-5744-5586], A.M. Blanco<sup>3,4</sup>[0000-0003-2190-8619], J.A. Bandoni<sup>1,3,4</sup>[0000-0002-9475-3825] y A.A. Savoretti<sup>1,2</sup>[0000-0001-5098-8641]

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, 8000, Argentina

<sup>2</sup> Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible -CEDETS (UPSO-CIC), Bahía Blanca, 8000, Argentina

<sup>3</sup> Planta Piloto de Ingeniería Química-PLAPIQUI (UNS - CONICET), Bahía Blanca, 8000, Argentina

<sup>4</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

antonela.sorichetti@upso.edu.ar, mariana.prieto@upso.edu.ar,  
smoreno@plapiqui.edu.ar, ablanco@plapiqui.edu.ar,  
abandoni@plapiqui.edu.ar, savoretti@upso.edu.ar

**Resumen.** Se presenta un modelo matemático de optimización para el diseño y operación de los recorridos de las campañas de recolección de envases vacíos de fitosanitarios en la provincia de Buenos Aires. El modelo consta de un conjunto de ecuaciones algebraicas y lógicas que determinan los recorridos óptimos que deben realizarse a lo largo de toda la red de centros de acopio transitorio, puntos de recolección y plantas de procesamiento durante un mes, incluyendo las reglas de visita a los diferentes nodos, así como las restricciones relacionadas a las rutas. El modelo permite estimar el número de campañas a realizar entre centros de acopio y puntos de recolección, así como traslados entre centros de acopio y plantas de procesamiento. Adicionalmente permite estimar indicadores valiosos para la toma de decisiones tales como los km recorridos por envase transportado y el número óptimo de vehículos por planta de reciclado.

**Palabras clave:** Envases vacíos de fitosanitarios, logística inversa, modelado matemático.

## 1 Introducción

### 1.1 La problemática de los envases vacíos de fitosanitarios

Los envases vacíos de fitosanitarios (EVFs) son los residuos más comunes de la agricultura y representan un peligro potencial para la salud humana y el medio ambiente, ya que contienen residuos del producto que contuvieron [1], motivo por el cual resulta

crítica su recuperación y reciclado. Los envases vacíos de polietileno de alta densidad (PEAD) constituyen la subcategoría de EVFs que efectivamente se pueden reciclar y por ende, maximizar su recolección y transporte desde los campos a las Plantas de Reciclado de Plástico (PRP) es de suma importancia para el diseño de proyectos orientados a la adecuada gestión de los mismos.

En nuestro país, los EVFs que contienen residuos de producto se clasifican como residuos peligrosos según la Ley Nacional N° 24.051 de 1991 [2]. En septiembre de 2016, se sancionó la Ley Nacional N° 27.279 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para la Gestión de Envases Vacíos de Fitosanitarios [3], la cual establece que los sistemas de gestión de EVFs se articularán en tres etapas:

a) Del Usuario al Centro de Acopio Transitorio (CAT): vaciado un envase contenedor de fitosanitarios, el usuario y el aplicador serán objetivamente responsables de garantizar el procedimiento de reducción de residuos. Asimismo, deberán separar los envases vacíos en las dos clases establecidas en la ley y deberán trasladarlos y entregarlos a un CAT. Para ese traslado no requerirán autorización específica.

b) Del CAT al Operador: en los CATs se clasificarán y acopiarán en espacios diferenciados según los tipos de envases. Luego serán derivados para su valorización o disposición final, según corresponda.

c) Del Operador a la Industria: el material procesado por el operador se deberá enviar a un proceso productivo para su reinserción, respetando lo dispuesto en la ley acerca de los usos prohibidos del material recuperado.

Si bien ya transcurrieron más de 7 años de la sanción de esta ley, el destino final de muchos de los EVFs sigue siendo mayoritariamente el mismo que antes. De acuerdo a las declaraciones juradas presentadas por los registrantes ante la autoridad competente en la provincia de Buenos Aires (pBA), que es el Ministerio de Ambiente (MA) de la provincia (ex Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible - OPDS), se conoce que se han puesto en el mercado durante el año 2019 en la pBA, 13.151.873 envases de fitosanitarios. Los valores de recolección de envases del año 2020 que surgen de los sistemas informáticos de OPDS, alcanzan un total de 1.081.710 de envases. Del análisis de estos valores, surge que el porcentaje de recolección de EVFs fue de tan solo el 8,22%.

De esos 1.081.710 envases, el 61% fue gestionado a través de los CATs habilitados en la pBA y el 39% restante a través de 94 Campañas de Recolección Itinerante (CRIs) [4]. Las CRIs son un mecanismo para recolectar envases que consiste en CATs móviles montados en camiones con acoplado, cuyo objetivo es recibir los envases que lleven los usuarios de fitosanitarios a un punto específico en una fecha determinada. Es una alternativa conveniente para recolectar EVFs en aquellas regiones donde no hay CATs.

Estos resultados indican que aún queda mucho por hacer en relación a la implementación de la ley en toda su magnitud en el territorio de la pBA. Es por ello, que en este trabajo se abordará la problemática de la recolección de EVFs desde la programación matemática a partir del desarrollo de herramientas de optimización para apoyo a la toma de decisiones, y de esta manera aportar soluciones para el diseño de estrategias con el fin de lograr procesos productivos más sustentables, respondiendo al necesario paradigma de la economía circular.

### 1.2 El VRP y su aplicación a la recolección de EVFs

El problema de generar rutas óptimas para las redes de logística es uno de los desafíos más difíciles que las empresas de logística enfrentan hoy en día. Múltiples autores han estudiado el problema de ruteo de vehículos (*Vehicle Routing Problem - VRP*) y el modelado matemático de entregas de bienes y productos. Los primeros fueron Dantzig y Ramser [5] que introdujeron el problema de despacho de camiones. Desde entonces, se han incorporado diversos aspectos que influyen en el problema, como la variación en las capacidades de los vehículos, restricciones relacionadas con el tiempo (ventanas operativas para los clientes) y la existencia de múltiples depósitos involucrados en la distribución [6]. Ante esta diversidad de variaciones del problema VRP, a los efectos de este trabajo resulta relevante el modelo MILP integrado presentado en [7] el cual se acompaña además con una implementación del modelo en Excel que puede resolver más de 64 variantes del VRP, relacionadas con visitas selectivas a clientes, recolección y entrega simultáneas, ventanas de tiempo, composición de la flota, restricción de distancia y destino final de los vehículos.

En la Fig. 1 se muestran las rutas que sigue un producto fitosanitario, desde su fabricación hasta el destino final del envase que lo contuvo. Las rutas de distribución del producto, desde las industrias fabricantes hacia los distribuidores, cooperativas, productores agropecuarios y otros consumidores, es lo que se denomina logística directa. El camino que sigue el EVF desde el productor agropecuario hasta las PRP e incineradoras comprende la logística inversa (LI).

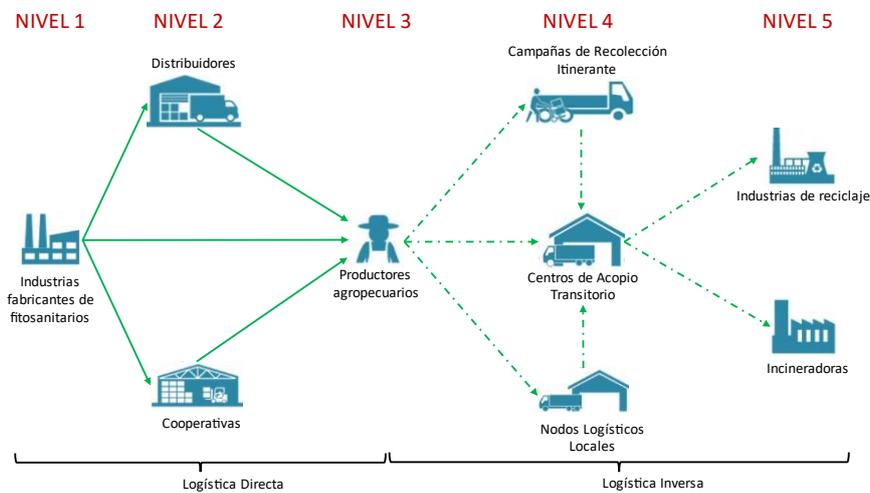


Fig. 1. Diagrama de flujo de la logística directa e inversa de los fitosanitarios.

Al pensar en el diseño de un VRP aplicado a los EVFs para su LI, se deben tener en cuenta ciertas particularidades. Una de ellas es que el servicio que se requiere es solo el de recolección, es decir, no hay servicio de entrega que es lo más usual en los VRP. En cuanto a la flota de vehículos apropiada para este caso, los mismos deben ser

camiones autorizados por la autoridad competente para el transporte de residuos peligrosos, de los cuales se conoce su capacidad, tanto en envases enteros como compactados, aunque no la cantidad de vehículos que se requieren. La Ley Nacional N° 27.279 permite que los EVFs puedan transportarse desde los campos de los productores agropecuarios (nivel 3) hacia los sitios donde se realicen las CRIs, a los CATs y/o hacia los nodos logísticos locales (nivel 4), en los vehículos particulares de los productores agropecuarios. Estos circuitos no se asumen parte del problema en este trabajo, de modo que solo se diseña el ruteo óptimo de los camiones autorizados para el transporte de residuos peligrosos, es decir, las rutas entre las CRIs y los CATs, y entre los CATs y las industrias de reciclaje.

La logística de recolección representa un costo significativo en cualquier plan de gestión de residuos, particularmente en las regiones en las que hay mucha distancia entre las áreas agrícolas y las zonas de reciclaje y eliminación [8]. Esta es precisamente una particularidad de la recolección de EVFs en la pBA, ya que las distancias a recorrer entre partidos son muy grandes (las más frecuentes se encuentran entre los 325 y 350 km, pudiendo llegar a casi 900 km). Por otra parte, el costo de recolección de un producto, el cual tiene una componente fija y una variable, constituye un gran porcentaje del costo del sistema. La parte fija se origina principalmente por los gastos de personal y por la inversión en la flota de vehículos, y constituyen una carga para la empresa distribuidora del producto, que es independiente de la ruta y del número de clientes que se atienden. Por su parte, los costos variables se originan mayoritariamente por los gastos en combustible, lo que se relaciona con el tiempo de viaje por cada ruta. Como resultado, los costos variables se ven afectados por la extensión y la duración de la ruta [6]. De lo anterior se infiere que siendo la pBA una región de gran extensión territorial, estos costos son muy altos y por ende la logística de recolección de EVFs puede ser muy onerosa.

Tal como se indica en el Código Internacional de Conducta sobre la Distribución y Utilización de Plaguicidas [8], transportar envases vacíos es ineficiente debido a la alta relación entre el volumen y el peso de los mismos. Transportar bidones enteros consigue movilizar apenas un 20% de los kilos de plástico que pueden transportarse con los envases compactados. Los pretratamientos más utilizados para la disminución del volumen de los EVFs son la compactación y/o el triturado. A diferencia del triturado de los envases, su compactado no afecta el proceso de reciclado que se lleva a cabo posteriormente en las PRP. Es por ello que en este trabajo se asume que se realiza compactación, pero solo en los CATs, donde se instalan equipos de prensado (enfardadoras). A los fines de este estudio se asume entonces que los bidones se transportan compactados en los tramos CATs – PRP y enteros desde los puntos de CRIs hasta los CATs.

## 2 Metodología

A partir del análisis de la literatura revisada, se toma como base el modelo general presentado por [7], ya que incluye muchas de las alternativas de problemas VRP. Sin embargo, dado que ese modelo no se adapta exactamente a las necesidades del

problema de recolección de EVFs, en este trabajo se incorporan restricciones necesarias para abordarlo y se realiza su implementación en la plataforma GAMS.

El modelo en [7] considera un problema VRP con múltiples depósitos y clientes, múltiples tipos y cantidades de vehículos, contempla ventanas de tiempo para cada cliente, incorpora límites diarios (en horas trabajadas y de conducción, en distancias máximas a recorrer) y la posibilidad de realizar circuitos abiertos o cerrados. Optimiza una función objetivo que es maximizar ganancias, calculadas como los ingresos por cada cliente atendido menos los costos fijos y operativos de la flota de vehículos y costos por penalización en caso de incumplimiento a clientes.

El modelo matemático propuesto, denominado OptiRUT [9], que se explicará a continuación, difiere del presentado en [7] en los siguientes aspectos específicos:

1. En todos los casos de estudio se tiene un solo depósito.
2. No se obtienen ingresos por la recolección de EVFs.
3. No se conoce a priori la cantidad de vehículos disponibles en cada depósito.
4. Se requiere planificar el ruteo de vehículos en períodos de varios días, con una cantidad fija de horas de trabajo diarias (8 horas).
5. Se requiere que cada nodo cliente tenga un solo arco de entrada.
6. Se requiere que de cada nodo cliente pueda salir un solo arco o ninguno.
7. Se requiere que si existe el arco  $i$ - $j$ - $k$  donde  $i$  es un cliente, el vehículo  $k$  debe atender al cliente  $i$ .

Para resolver el punto 1 basta con fijar en 1 el número de depósitos, mientras que para el 2 se puede, o bien, fijar en 0 los ingresos por recolectar envases, o eliminar el término correspondiente en la función objetivo del modelo. Para los puntos 3 y 4, si bien se conoce a priori el tipo de vehículos a usar y por lo tanto, su capacidad, no se dispone de la cantidad que se requieren. El número de vehículos se calcula entonces sobre la base de una ventana de horas continuas trabajadas, como un dato para luego en un cálculo postsolve determinar el número real de vehículos que se requerirán considerando la restricción operativa de que los mismos tienen que trabajar como máximo una cierta cantidad de horas por mes. Se incorporaron 3 restricciones para los puntos 5, 6 y 7.

## 2.1 Modelo OptiRUT

El modelo consta de una serie de conjuntos para representar: el depósito (CAT o PRP, según corresponda), los clientes (PRI o CAT, según corresponda), los arcos que representan las rutas directas entre un nodo  $i$  y un nodo  $j$ , la red dirigida completa en la que resuelve el VRP, los vehículos y los depósitos de origen y llegada de los vehículos. Se define la variable binaria  $x_{ijk}$  que vale 1 si el vehículo  $k$  recorre el arco  $(i,j)$  e  $y_{ik}$  que vale 1 si el vehículo  $k$  visita y atiende al cliente  $i$ . Se definen variables positivas para: la cantidad de envases recolectados por el vehículo  $k$  en el arco  $(i,j)$   $w_{ijk}$ , la cantidad de envases entregados por el vehículo  $k$  en el arco  $(i,j)$   $z_{ijk}$ , el tiempo en que el vehículo  $k$  llega al vértice  $i$   $t_{ik}$ , y el tiempo en que se excede la ventana de tiempo del vértice  $i$   $v_i$ .

**Modelo matemático.** Por cuestión de espacio solo se mostrará la función objetivo y las restricciones incorporadas para abordar la recolección de EVFs. Por detalles de modelado e implementación consultar [9]. La función objetivo en la Ec. (1) consiste en minimizar el costo de la operación de la red de clientes teniendo en cuenta los costos de los vehículos (variable y fijo, respectivamente) y la penalización económica si se incurre en la violación de la ventana operativa de atención a los clientes.

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{i,j}^k x_{i,j}^k + \sum_{j \in Vc} \sum_{k \in K} f_k x_{o^k,j}^k + \Pi \sum_{i \in V} v_i \quad (1)$$

La Ec. (2) fuerza que a cada cliente entre un solo arco, ya sea desde otro cliente o desde un depósito. La Ec. (3) asegura que de cada cliente pueda salir un solo arco o ninguno. La Ec. (4) asegura que si existe el arco  $(i,j,k)$  donde  $i$  es un cliente, la variable binaria  $y_{i,k}$  debe tomar el valor 1.

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall j \in Vm \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \leq 1 \quad \forall i \in Vm \quad (3)$$

$$x_{i,j}^k \leq y_i^k \quad \forall i \in Vm, j \in Vc, \quad k \in K \quad (4)$$

#### Cálculos postsolve

$$tt^k = \sum_{i \in Vc} s_i y_i^k + \sum_{(i,j) \in A} \hat{d}_{i,j} x_{i,j}^k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$nVEH = \sum_{k \in K} \frac{tt^k}{hm} \quad (6)$$

Para poder calcular el número real de vehículos que se requerirán por mes para efectuar la recolección de EVFs se necesita del parámetro  $hm$ , el cual se refiere a la cantidad máxima de horas que un vehículo habilitado para el transporte de residuos peligrosos podría trabajar por mes. Por el Convenio Colectivo de Trabajo de Camioneros la jornada de trabajo no puede superar las 8 h/día (lunes a viernes) y las 4 h/día los sábados, lo que implica que por mes no podrá exceder las 176 h. Mediante la Ec. (5) se calcula el tiempo total del circuito realizado por el vehículo ( $tt_k$ ) como la suma en cada vehículo  $k$  de la cantidad de horas de viaje por atender a cada cliente, más las horas de servicio en cada uno. Finalmente, con la Ec. (6) se calcula el número mínimo de vehículos requeridos ( $nVEH$ ).

### 3 Aplicación de OptiRUT a la pBA

En esta sección se obtienen los recorridos óptimos que deben realizar los camiones para el transporte de EVFs en cada tramo de la red (PAR-CAT, PAR-PRP, CAT-PRP) (ver Fig. 2), durante un mes de trabajo. Los casos desarrollados, denotados con E#, son los siguientes:

- E1 a E33. Optimizan las rutas de recolección de EVFs en el tramo PAR-CAT.
- E34 y E35. Diseño de la ruta óptima para realizar las CRIs en el tramo PAR-CAT.
- E36 y E37. Optimizan las rutas de recolección de EVFs en el tramo PAR-PRP.
- E38 y E39. Optimizan las rutas de recolección de EVFs en el tramo CAT-PRP.

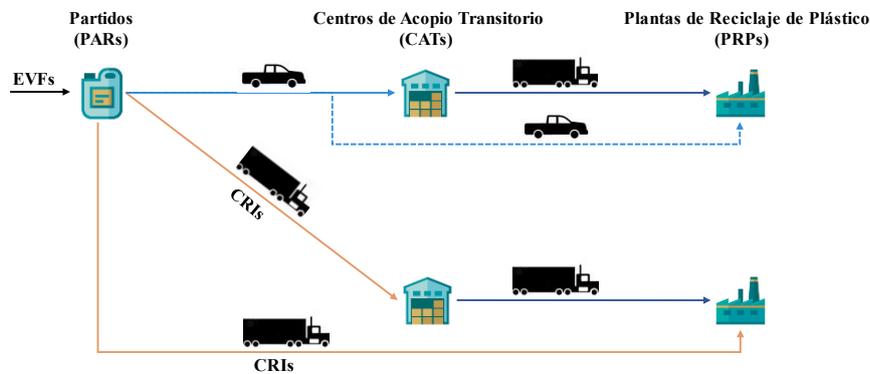


Fig. 2. Flujos de EVFs en el esquema de la red de LI.

Como datos para estos casos de estudio se usa parte de los resultados obtenidos en [9] al aplicar un modelo matemático de localización de CATs, PRPs y Puntos de Recolección Itinerante (PRIs). De allí surge que, 42 partidos de la pBA requieren de PRIs para la gestión de sus EVFs durante el primer mes del horizonte. En particular, 25 de ellos son PRIs que enviarán sus envases a un CAT y 17 a una PRP. Solo 22 partidos que generan EVFs no requieren de un CAT o un PRI, es decir que, todo el transporte de EVFs lo realizan los productores agropecuarios con sus vehículos a CATs de otros partidos situados a menos de 50 km. Por otra parte, hay 9 partidos que, teniendo un CAT, necesitan gestionar parte de sus EVFs por CRIs. Esto sucede porque es más económico realizar las CRIs de esos envases que ampliar los CATs existentes.

Los parámetros más importantes de los casos de estudio modelados, consisten básicamente en la cantidad de EVFs a recolectar por mes ( $q_i$ ) en cada nodo cliente (PRI/CAT), el tiempo de servicio en cada PRI/CAT ( $s_i$ , proporcional a la cantidad de envases), la distancia por ruta entre los nodos ( $d_{ij}$ ) y la duración del tiempo de viaje entre los mismos ( $d^A_{ij}$ ). En cuanto a los vehículos, el parámetro más importante es su capacidad ( $Q_k$ ), tanto en envases enteros como compactados.

Con el fin de diseñar ruteos mensuales, tanto la ventana de tiempo de los PRIs/CATs, como los límites en horas al tiempo de manejo y de trabajo de los conductores del vehículos y la distancias máxima de cada ruta, se establecieron en valores lo

suficientemente grandes de tal forma que no constituyan una restricción del problema. La única restricción real que tienen los casos estudiados es la capacidad de los vehículos ya que, en muchos casos es menor que la cantidad de EVFs a recolectar en los nodos. En los casos en que esto suceda, se optó por dividir la cantidad de EVFs en el nodo en fracciones enteras de la capacidad del vehículo. Por ejemplo, si la cantidad de envases enteros a recolectar por mes en el nodo 11 es 6.500 y la capacidad del vehículo para el transporte de EVFs enteros es de 3.600, se procedió a duplicar el nodo 11 de tal forma que  $q_{11}$  sea 3.600 y  $q_{11'}$  2.900. El detalle de todos los parámetros utilizados para los 39 casos de estudio de esta sección se presenta en [9]. A continuación, se presenta el desarrollo de cada caso de estudio.

### 3.1 Rutas de recolección de EVFs en el tramo PAR-CAT

De los 57 CATs necesarios en la pBA, 33 requieren del servicio de las CRIs para recolectar EVFs en los PRIs. En este tipo de CRIs (tramo PAR-CAT) se pueden identificar 3 tipos de estructuras de circuitos como se muestra en la Fig. 3: (i) 1 CAT - 1 PRI, (ii) 1 CAT - 2 PRIs, (iii) 1 CAT - 3 PRIs. Es decir, en ningún caso, un CAT recibe EVFs de más de 3 partidos distintos.

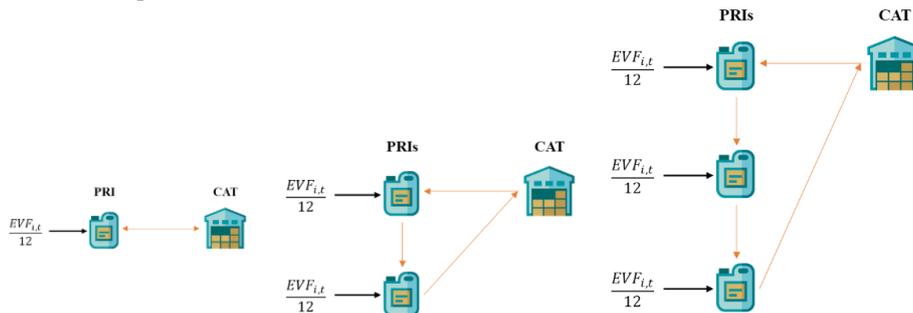


Fig. 3. Tipos de estructuras de las CRIs en los tramos PAR-CAT.

Para configurar los 33 casos de estudio de los tramos PAR-CAT, a cada CAT se lo define como depósito y a los PRIs asociados a cada uno de ellos como clientes (por cuestiones de espacio se omite su detalle). Para ejemplificar las soluciones, los resultados de los recorridos óptimos en el tramo PAR-CAT para los CATs correspondientes a la PRP de Cnel. Brandsen se muestran en la Tabla 1. En todas las tablas de esta sección, se detalla el recorrido de las rutas óptimas, la distancia total recorrida en km, el tiempo total en horas reloj que demanda el recorrido (tanto por el tiempo de viaje como por el tiempo de carga de los envases), la cantidad de EVFs recolectados, el GAP relativo de GAMS en porcentaje y el tiempo de CPU en segundos u horas. Para mostrar de forma condensada los resultados de cada uno de los casos de estudio, los 135 partidos de la provincia se numeraron de acuerdo a su ordenamiento alfabético.

**Tabla 1.** Circuitos óptimos PAR-CAT para los CATs asignados a la PRP 19 (Cnel. Brandsen).

Caso	CAT	Solución	Distancia (km)	Tiempo (h)	EVFs	GAP (%)	CPU (s)
E1	1	1-45-124-1	281,7	5,3	3.296	0	< 1
E2	11	11-93-11 11-134-11	568,2	9,6	4.444	0	< 1
E3	111	111-60-111 111-60-111	321,2	6,3	4.161	0	< 1
E4	115	115-91-115	179,9	2,4	379	0	< 1
E5	123	123-9-105- 123	406,0	8,3	5.859	0	< 1
E6	129	123-10-123 129-4-129 129-4-33- 129	885,0	18,1	12.692	0	< 1
E7	14	129-33-129 129-33-129 14-4-14 14-10-14 14-10-14 14-10-14	798,7	16,3	11.433	0	< 1
E8	3	3-60-3 3-60-3	235,8	5,7	5.114	0	< 1
E9	34	34-60-34	137,3	3,3	2.948	0	< 1
E10	44	44-91-44	208,2	2,9	467	0	< 1
E11	55	55-82-55 55-12-55 61-17-61	285,7	6,2	4.731	0	< 1
E12	61	61-106-128- 61	539,8	9,9	5.635	0	< 1
E13	68	68-79-68 70-50-70	101,2	1,6	492	0	< 1
E14	70	70-50-70 70-33-70	454,9	10,0	7.743	0	< 1
E15	75	75-91-75 75-91-75 80-90-80	205,0	5,5	5.249	0	< 1
E16	80	80-90-80 80-49-80	552,0	11,3	7.957	0	< 1
E17	92	92-10-92	101,0	2,1	1.405	0	< 1
TOTAL			6.261,6	124,8	84.005		
N° TOTAL DE CIRCUITOS			34				

De los resultados obtenidos para las 2 PRP radicadas en la pBA (Cnel. Brandsen y Lanús) se concluye que se requieren 58 CRIs por mes solo en el tramo PAR-CAT, para dar servicio a los 25 PRIs que gestionan sus EVFs enviándolos a un CAT con capacidad disponible. Como se puede observar, la mayoría de los circuitos son de ida y vuelta a un solo PRI y esto se debe a que, como se anticipó al inicio de esta sección, la mayor restricción es la capacidad del vehículo.

### 3.2 Ruta óptima para realizar las CRIs del tramo PAR-CAT

Una vez obtenidas cada una de las rutas de las CRIs en el tramo PAR-CAT, se debe realizar el ruteo desde cada PRP a los CATs listados en la Tabla 1 (segunda columna), para obtener el itinerario que brinde el orden en el que se deben realizar las CRIs. Es decir, un dado vehículo parte de una PRP, viaja al CAT que indique su itinerario óptimo, y allí realiza las CRIs por los PRIs de la zona de influencia del mismo (determinado por los resultados anteriores). Cumplimentadas las CRIs, procede a viajar el segundo CAT de su itinerario óptimo y se repite el procedimiento hasta completar su circuito y regresar a la PRP de salida.

Para configurar los 2 casos de estudio se define como depósito a cada una de las PRPs y como clientes a los CATs asociados a cada una de ellas para la realización de CRIs, que son 17 para la PRP de Cnel. Brandsen y 16 para la PRP de Lanús. Los resultados se muestran en la Tabla 2. En la segunda columna se muestra el itinerario de cada PRP y entre paréntesis el circuito de PRIs obtenido en la sección anterior.

**Tabla 2.** Itinerario para realizar las CRIs del tramo PAR-CAT.

Caso	Solución	Distancia (km)	Tiempo (h)	GAP (%)	CPU (s)
E34	19-68(79)-1(45-124)-61(17-106-128)-111(60-60)-3(60-60)-34(60)-11(93-134)-129(4-4-33-33-33)-115(91)-14(4-10-10-10)-70(50-50-33)-92(10)-123(9-105-10)-75(91-91)-44(91)-55(82-12)-80(90-90-49)-19	8.769,9	156,2	0	0,141
E35	69-122(90)-7(96)-65(59)-58(2)-54(59-59)-43(59-59-59-59-59)-24(106)-95(33)-131(128-128)-109(60-127-127)-94(59-106)-23(128)-18(2)-5(2)-110(124)-6(85)-69	6.148,6	107,1	0	0,204

### 3.3 Rutas de recolección de EVFs en el tramo PAR-PPR

Si bien este tipo de rutas también son CRIs, se diferencian de las anteriores en que el punto de origen y llegada de estos circuitos es la PRP (destino final de todos los EVFs). En este tipo de CRIs, donde un vehículo sale de una PRP para recolectar EVFs por los distintos PRIs, resultan 2 estructuras de circuitos: (i) 1 PRP - 14 PRIs, (ii) 1 PRP - 3 PRIs. Para configurar estos casos de estudio se define como depósito a cada una de las

PRPs y como clientes a los PRIs asociados a cada una de ellas, que son 14 para la PRP de Cnel. Brandsen y 3 para la PRP de Lanús. Los resultados del ruteo en el tramo PAR-PRP se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Circuitos óptimos del tramo PAR-PRP.

Caso	PRP	Solución	Distancia (km)	Tiempo (h)	EVFs	GAP (%)	CPU (s)
E36	19	19-1-35-19	341,6	6,0	3.121	0	6,9
		19-14-19	144,4	3,5	3.068		
		19-61-19	136,9	3,6	3.382		
		19-11-19	108,9	3,3	3.288		
		19-55-32-19	271,0	5,3	3.355		
		19-70-75-34-12-3-68-44-19	585,5	9,3	3.352		
E37	69	69-83-56-98-69	201,1	3,2	1.241	0	< 1
TOTAL			1.789,4	34,2	20.807		
N° TOTAL DE CIRCUITOS			7				

Las CRIs en este tramo son 7 en total entre las 2 PRPs, muchas menos que en el tramo PAR-CAT. Los partidos que utilizan estas CRIs se caracterizan por no ser grandes generadores de envases y/o por estar cerca de las PRPs. Si bien las CRIs pueden hacerse de PAR a CAT o de PAR a PRP, las CRIs que se realizan de PAR a PRP mueven un 13% de los envases totales que se gestionan a través de CRIs. Gracias a esta aplicación del modelo, se puede concluir que se requieren 65 CRIs por mes, para los 42 PRIs que gestionan sus EVFs enviándolos a un CAT/PRP con capacidad disponible. Mediante estas CRIs se logran recolectar 138.122 envases, recorriendo 14.918 kilómetros, es decir 0,11 km/EVF. Además, es interesante remarcar que del total de los kilómetros que se recorren para realizar las CRIs, 4.434,7 km se deben al itinerario que recorren los vehículos entre cada CAT (E34 y E35), lo que representa el 30% de la distancia. Este resultado sugiere que quizás sea conveniente que algunos CATs, sobre todo los de mayor recepción de envases, tengan su propio vehículo a disposición para la realización de sus CRIs.

### 3.4 Rutas de recolección de EVFs en el tramo CAT-PRP

Finalmente, una vez que los CATs recibieron los EVFs llevados por los productores agropecuarios en sus propios vehículos y por las CRIs diagramadas en las secciones anteriores, debe realizarse el ruteo desde las PRPs a los CATs y de regreso a las PRPs, para proceder al tratamiento de los EVFs antes de su inserción a la industria del plástico. Para el caso de la PRP de Cnel. Brandsen se obtuvo la estructura 1 PRP – 22 CATs y para la PRP de Lanús, se obtuvo 1 PRP – 35 CATs. Para configurar estos escenarios cada PRP se define como depósito y a los CATs asociados como clientes. En estos circuitos los EVFs se transportan compactados. De acuerdo a los cálculos cada camión tiene una capacidad de 90 fardos y cada fardo contiene 204 envases de 20L.

Desde el punto de vista computacional, estos fueron los casos más complejos de resolver, debido a que son los que tienen más cantidad nodos y, en consecuencia, más variables y ecuaciones, por lo que en tiempos de CPU razonables (< 7 h) solo se alcanzaron resultados con 12% y 20,5% de GAP. En la Tabla 4 se muestran los resultados del ruteo en el tramo CAT-PRP para la PRP de Cnel. Brandsen.

**Tabla 4.** Circuitos óptimos del tramo CAT-PRP para la PRP 19 (Cnel. Brandsen).

Circuito	Solución	Distancia (km)	Tiempo (h)	Fardos EVFs	GAP (%)	CPU (h)
1	19-3-19	1.074,7	17,4	90		
2	19-14-19	745,4	13,4	90		
3	19-75-115-19	1.001,3	15,0	57		
4	19-68-34-3-111-19	1.347,8	19,5	63		
5	19-1-19	466,7	9,8	90		
6	19-80-19	416,9	7,4	49		
7	19-1-61-19	877,5	13,8	63		
8	19-93-32-19	1.571,2	23,5	87		
9	19-129-19	916,8	15,4	90	11,97	6,75
10	19-34-19	1.018,0	16,8	90		
11	19-129-14-123-19	929,9	14,9	79		
12	19-11-70-19	1.243,2	19,5	87		
13	19-75-19	788,0	13,8	90		
14	19-92-19	612,2	9,8	49		
15	19-123-19	566,9	11,0	90		
17	19-35-19	805,5	12,2	49		
17	19-91-44-19	924,6	15,3	83		
18	19-55-12-19	740,8	13,0	85		
TOTAL		16.047,4	261,5	1.381		

### 3.5 Análisis de resultados

Una vez obtenidos todos los circuitos, se deben sumar las horas necesarias para recorrerlos, a fin de estimar el número vehículos que se necesitarán a lo largo de un mes para llevar a cabo la recolección de los EVFs en la pBA. Así resulta que, realizar todo el ruteo de la PRP Cnel. Brandsen (19) demandará 448,7 h y el de la PRP de Lanús (69), 384,7 h. Teniendo en cuenta que el total de horas de trabajo por mes no podrá exceder las 176h/ vehículo, para cumplir con los recorridos de cada PRP, cada una deberá disponer de 2,55 y 2,19 vehículos, respectivamente, o en números enteros, 3 vehículos cada una, como se muestra en la Tabla 5.

Así, al realizar el ruteo con OptiRUT entre todos los nodos que tendrán EVFs para recolectar, y teniendo en cuenta no solo el tiempo de manejo sino también el tiempo de carga y asumiendo que el límite mensual para realizar ambas tareas es de 176 horas, resulta que se necesitarían 6 vehículos. Cabe aclarar, que esta estimación no considera

que los descansos de los choferes de los vehículos deben hacerse en las ciudades, sino que asume que los descansos se realizan cuando finalizan las 8 horas de trabajo.

**Tabla 5.** Distancias y tiempos necesarios para la recolección de EVFs en toda la pBA.

PRP 19	Itinerario de CRIs (PAR-CAT)	PAR-PRP	CAT-PRP	Total	Vehículos necesarios
Tiempo (h)	156,2	31,0	261,5	448,7	3
Distancia (km)	8.769,9	1.588,3	16.047,4	26.405,6	
PRP 69	Itinerario de CRIs (PAR-CAT)	PAR-PRP	CAT-PRP	Total	Vehículos necesarios
Tiempo (h)	107,1	3,2	274,4	384,7	3
Distancia (km)	6.148,6	201,1	16.127,4	22.477,1	

## 4 Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo matemático de optimización para el diseño y operación de los recorridos que deben realizarse para recolectar los EVFs en los PRIs y CATs, para luego ser transportados a las PRPs. Previamente se realiza un breve resumen de los diferentes tipos de problemas VRP y luego se presenta la implementación del modelo seleccionado, que resulta lo suficientemente general para aplicarlo al problema concreto de recolección de EVFs.

El modelo presentado consta de un conjunto de ecuaciones algebraicas y lógicas que determinan los recorridos óptimos que deben realizarse a lo largo de toda la red, mediante las reglas de visita a los clientes, las restricciones que establecen los requisitos de los clientes y las restricciones relacionadas a las rutas, implementado a lo largo de un mes. Se reportan resultados de aplicarlo a toda la pBA. Los principales resultados indican que, de los 57 CATs de la pBA, más de la mitad (33) utilizan las CRIs para acopiar envases. Además, se requieren 65 CRIs por mes, para los 42 PRIs que gestionan sus EVFs enviándolos a un CAT/PRP con capacidad disponible. Mediante estas CRIs se logran recolectar 138.122 envases, recorriendo 14.918 km, es decir 0,11 km/EVF. En la última etapa de la recolección (tramo CAT-PRP) se requieren de 41 circuitos para recolectar 614.522 EVFs para lo cual se recorren 32.175 km. Se evidencia la eficiencia de la compactación ya que en este caso se recorren 0,05 km/EVF. A partir de las horas necesarias para poder realizar todos los circuitos y considerando que cada chofer tiene a cargo un vehículo con el cual no debe trabajar más de 176 h/mes, se estimó que se necesitarían 3 vehículos en cada PRP.

Como aspecto positivo, el modelo matemático desarrollado se considera suficientemente flexible como para ser aplicado a los distintos partidos de la provincia de Buenos Aires, a pesar de la diferencia en la tasa de generación de envases que existe entre ellos. Por otra parte, la temporalidad de aplicación de fitosanitarios, la frecuencia de ingreso de los envases al sistema de gestión y la gran diversidad de tipos de contenedores en que se presentan, son variables del problema en estudio que implican incertidumbre respecto de la cantidad exacta de envases que llegan a los Puntos de Recolección

Itinerante, a los Centros de Acopio Transitorio y a las Plantas de Reciclado de Plástico. Es por este motivo que, como trabajos futuros, se explorará la posibilidad de incorporar estos aspectos al modelo matemático a fin de obtener los resultados más realistas posibles.

## Referencias

1. Ben Salem, A., Chaabane, H., Lahbib, N., Salghi, R., Fattouch, S.: Management of phytosanitary effluent: Rinsing and decontamination of empty pesticide containers by bio-detergent. *Crop Protection* **116**, 142-155 (2019)
2. Argentina: Ley Nacional N° 24.051 - Residuos Peligrosos (1991)
3. Argentina: Ley Nacional N° 27.279 - Presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión de los envases vacíos de fitosanitarios (2016)
4. Giraldes, J., Poma, J., y Merlo, A.: Implementación de la Ley Nacional 27.279 de envases vacíos de fitosanitarios en la provincia de Buenos Aires. *Ambiente en Diálogo* **2**, 131-147 (2021)
5. Dantzig G. B. y Ramser J. H.: The Truck Dispatching Problem. *Manage. Sci.* **6**(1), 80-91 (1959)
6. Konstantakopoulos, G. D., Gayialis, S. P. y Kechagias, E. P.: Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Oper. Res.* **22**(3), 2033-2062 (2022)
7. Erdoğan, G.: An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers & Operations Research* **84**, 62-72 (2017)
8. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Organización Mundial de la Salud. Código internacional de conducta sobre la distribución y utilización de plaguicidas. Directrices sobre opciones de manejo de envases vacíos de plaguicidas, [https://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests\\_Pesticides/Code/Containers08SP.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/agphome/documents/Pests_Pesticides/Code/Containers08SP.pdf), ultimo acceso 08/04/2024
9. Sorichetti, A.E.: Desarrollo de estrategias de optimización para la gestión de redes de recolección de envases vacíos de fitosanitarios. Tesis de doctorado (2023) <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/6701>