

Logística inversa de residuos agroquímicos en Argentina: resolución heurística y exacta

Antonella Cavallin¹, Diego G. Rossit¹, Andrea A. Savoretti², Antonela E. Sorichetti² y Mariano Frutos¹

Resumen—Argentina es uno de los principales exportadores de productos agrícolas del mundo, localizándose gran parte de esta producción en la región pampeana. Debido a su enorme escala, esta actividad, además de generar importantes ingresos a nuestro país, también origina una gran cantidad de residuos especiales, entre ellos, los envases de los agroquímicos. Son conocidos los problemas ambientales y económicos que genera el incorrecto manejo de estos residuos por poseer sustancias que representan un riesgo para la salud y el medio ambiente. Teniendo en cuenta esta problemática, la Universidad Nacional del Sur (UNS) y la Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO), proponen diseñar un sistema de reciclado de dichos envases en la región que comprende los veintiún municipios del sudoeste bonaerense (SOB). En el marco de este proyecto, el presente trabajo consistió en la optimización de la red logística de recolección de los residuos agroquímicos y la evaluación de la localización de la planta de tratamiento de los mismos. El modelado de la red se abordó como un problema CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem). Se consideraron distintas frecuencias de recolección y se resolvió mediante técnicas exactas y heurísticas.

Palabras clave—Logística Inversa, Capacitated Vehicle Routing Problem, Residuos Agroquímicos.

I. INTRODUCCIÓN

EL aumento en la demanda de alimentos a nivel mundial ha generado un incremento en la actividad de países productores de cereales resultando en la necesidad de buscar nuevos métodos para aumentar la productividad de sus tierras. Por ello, se ha observado no sólo el aumento en el consumo de algunos agroquímicos utilizados, sino también, la incorporación de nuevos y más eficientes productos. No obstante, no se ha observado la adopción de prácticas agrícolas adecuadas que permitieran garantizar la sustentabilidad productiva y ambiental de sus recursos naturales, y proteger la salud de la población lo cual representa un importante problema a resolver. En nuestro país, con algo más de 36 millones de hectáreas cultivadas, se utilizan casi 230 millones de litros de herbicidas y cerca de 350 millones de

litros de agroquímicos líquidos. Los envases necesarios para su comercialización generan unas 17.000 tn. de polietileno de alta densidad cada año.

De acuerdo a la Ley Nacional 24.051 [1], los envases que han almacenado agroquímicos son residuos peligrosos, entendiendo como peligroso a “todo residuo que pueda causar daño directa o indirectamente a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general”. Las consecuencias nocivas que produce un mal manejo de los envases de agroquímicos han sido resaltadas en la literatura especializada [2] [3] [4]. Sin embargo, su material es económicamente valioso y técnicamente reciclable [5]. Para su recuperación, primero debe completarse un proceso de descontaminación por la técnica de triple lavado que es una técnica relativamente sencilla, que puede realizarse por parte de los aplicadores y que en general reduce la cantidad de químicos hasta niveles permisibles [6] [7]. En segunda instancia deben procesarse en plantas especializadas para el lavado final y el posterior tratamiento de los efluentes para eliminar los contaminantes. Una problemática aún no resuelta en Argentina es el diseño de una red logística eficiente para la recuperación de la materia prima del proceso, esto es, los envases de los agroquímicos. El sudoeste bonaerense tiene como principal actividad económica la producción agropecuaria, contando con cerca de 10 millones de hectáreas productivas en los veintidós partidos que conforman la región. Por este motivo, la generación permanente de residuos peligrosos es un tema de preocupación de los distintos gobiernos locales.

A. Problemática

Como consecuencia de la actividad agropecuaria, en la provincia de Buenos Aires se producen por año aproximadamente cinco millones de envases de agroquímicos. De un relevamiento realizado en el marco del proyecto que dio origen al presente trabajo se desprende que en la actualidad estos residuos no son gestionados correctamente. En más del 76% de los establecimientos relevados los envases vacíos son acumulados en lugares inapropiados. Este porcentaje está compuesto por un 53% que sólo acumula los envases, un 14% que acumula y comercializa los envases en el mercado informal y un 9% que perfora y acumula los envases, lo cual aumenta el riesgo ambiental de estos residuos especiales. La acumulación en lugares indebidos se realiza mayoritariamente en el mismo establecimiento agropecuario (72,6%) (88,5%

¹ IIESS, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET, Bahía Blanca, Argentina. (e-mail: {antonella.cavallin, diego.rossit, mfrutos}@uns.edu.ar).

² Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS), Universidad Provincial del Sudoeste (UPSO)-Comisión de Investigación Científicas de la Pcia. de Buenos Aires (CIC), Bahía Blanca, Argentina. (e-mail: savoretti@upso.edu.ar, antonelasorichetti@gmail.com).

generalmente a cielo abierto y 11,5% en galpones). Contrariamente, sólo un 9% opta por la disposición final de envases en un basural o centros de acopio transitorio (CAT). La disposición final de envases específicamente en CATs sólo se verificó en un 3,4% de los casos (Fig. 1).

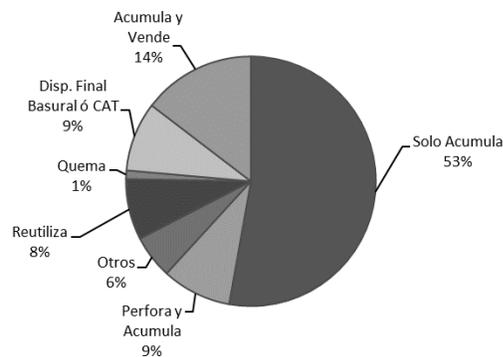


Fig. 1. Disposición de envases vacíos de agroquímicos de la Provincia de Buenos Aires.

Otro dato alarmante está relacionado con la reutilización de envases, práctica que es realizada por el 8% de los establecimientos relevados. De este total, un 43% de los casos le dan a estos envases usos extremadamente peligrosos, como por ejemplo para contener agua de consumo o como bebederos o comederos de animales.

Otra consulta que se desarrolló en el marco del proyecto fue sobre la existencia o no de CATs adecuados. Se encontró que ninguna de las localidades del SOB posee un CAT reglamentado. Sin embargo, según la Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes de Argentina, tres municipios poseen un CAT aún pendiente de habilitación por parte de las autoridades correspondientes. Estos son Carmen de Patagones, Pellegrini y Villarino. Otra comuna, Tornquist, posee una iniciativa para conformar un CAT transitorio pero se registra un grado de informalidad mayor.

Considerando los resultados de los relevamientos se desprende la crucial relevancia de un abordaje integral de gestión de envases de residuos agroquímicos en la zona a los efectos de proteger no solo al medioambiente sino también a la salud de las personas intervinientes. De allí la importancia de la generación de mecanismos que faciliten al productor realizar una disposición responsable y sustentable de este tipo de residuos y que acompañen a los gobiernos municipales a brindar los servicios de apoyo necesarios para tal fin.

B. Logística inversa de los envases de agroquímicos

Pueden encontrarse redes de gestión de envases de agroquímicos consolidadas en varios países europeos como Alemania, Francia y España [2]. También pueden verse intentos de establecer una red similar en Rumania [8] e Italia [9]. En nuestra región, Brasil es uno de los países pioneros en cuanto al desarrollo de sistemas de logística inversa que permitan la recuperación de los envases de agroquímicos a través de su red "Campo Limpo" formada por un entramado de agricultores, industrias productoras de agroquímicos, cooperativas y autoridades gubernamentales [10]. En el país,

también se han realizado varios estudios cualitativos sobre la implementación de este tipo de redes [11] [12] [13].

C. Objetivo

En el marco de esta problemática, se está llevando a cabo un proyecto entre dos universidades del sudoeste bonaerense para el diseño de una red logística para los envases de agroquímicos producidos en la región. En el presente trabajo se intentan diseñar los recorridos de recolección y acopio de envases vacíos para su posterior procesamiento. También en este trabajo se evalúa la posible localización de la planta de procesamiento, ya que actualmente hay en consideración dos localidades de la región como potenciales ubicaciones. Los resultados obtenidos podrían utilizarse para diseñar posteriormente una experiencia piloto de gestión ambiental participativa de envases de agroquímicos en el sudoeste bonaerense y elementos para adecuar las normativas locales, armonizando con la legislación provincial y nacional vigentes. Este elemento colaborará fuertemente con los gobiernos municipales del sudoeste bonaerense en una temática que viene suscitando un elevado nivel de reclamo local.

II. ESTUDIO DEL CASO

El objetivo es diseñar un recorrido óptimo donde un vehículo recoja y triture los envases que serán recolectados en cada CAT de cada distrito. Una vez finalizado el recorrido, los chips de plástico se almacenarán en un depósito donde posteriormente serán lavados en una planta de tratamiento ubicada en un determinado distrito el cual será seleccionado teniendo en cuenta una serie de prioridades. Una vez realizada la trituración, los chips de plástico se lavarán para luego ser reciclados para su utilización de manera de otorgar al proyecto un elemento adicional de rentabilidad.

El presente problema tiene como campo de estudio los veintidós partidos del sudoeste bonaerense. Dentro de los mismos, se identifican las ciudades cabeceras como punto de recolección, las cuales, en caso de no coincidir con la denominación del partido, se muestran entre paréntesis en la Tabla I. Los vehículos de recolección tienen una capacidad de 9630 envases. La cantidad de residuos semanales a recolectar en cada ciudad (Tabla I) fueron estimados en función de la cantidad de cultivos existentes en las mismas. Para el estudio del presente problema, no se considera la capacidad de almacenamiento de cada CAT como un parámetro que pueda significar alguna restricción al modelo. Como se mencionó en la sección I (A), la inexistencia de CATs adecuados en la mayoría de las localidades, y considerando que el diseño y construcción de los mismos también forma parte del proyecto, es que se dispone de flexibilidad en cuanto a la capacidad de almacenamiento.

III. METODOLOGÍAS

La resolución del problema planteado se abordó a partir de tres escenarios base definidos en función de la localización de la planta de procesamiento. En el primero escenario se considera

la instalación de la planta de tratamiento de los residuos agroquímicos, o depósito a los efectos del problema de ruteo, en la ciudad de Pigüe, partido de Saavedra (*escenario Saavedra*). En el segundo escenario se la consideró situada en Tres Arroyos, (*escenario Tres Arroyos*). Y, en el tercer escenario, se evaluó la instalación de ambas plantas, una en cada una de las ciudades mencionadas (*escenario doble*). Ambas ciudades se consideraron como posibles puntos de localización de la planta de tratamiento debido a cuestiones políticas, económicas y geográficas definidas por los decisores del proyecto. A su vez, dentro de estos tres escenarios presentados, se evaluaron dos alternativas en cuanto a las frecuencias de recolección. La primera alternativa es realizar una programación semanal, donde todas las ciudades sean visitadas todas las semanas (*frecuencia simple*). La segunda alternativa, surge al evidenciar las variaciones en las tasas de generación de residuos. De esta forma, se decide agrupar a las mismas en dos perfiles de frecuencia de recolección (Grupo 1 (G1) y Grupo 2 (G2)). Los municipios asignados a cada grupo pueden verse en la Tabla I.

TABLA I
MUNICIPIO / CANTIDAD DE ENVASES GENERADOS POR SEMANA
POR MUNICIPIO. DIVISIÓN EN G1 Y G2

MUNICIPIOS (G1)
1). Adolfo Alsina (Carhué) / 3099
2). Benito Juárez / 1634
3). Coronel Dorrego / 2790
4). Coronel Pringles / 1857
5). Daireaux / 1638
6). Adolfo González Chávez / 2196
7). Coronel Suárez / 3387
8). Pellegrini / 1200
9). Saavedra (Pigüe) / 1585
10). General Lamadrid / 1305
11). Guaminí / 2510
12). Puán / 1375
13). Tres Arroyos / 4741
MUNICIPIOS (G2)
14). Bahía Blanca / 212
15). Carmen de Patagones / 566
16). Coronel Rosales (Punta Alta) / 257
17). Tornquist / 1094
18). Salliqueló / 622
19). Villarino (Médanos) / 758
20). Laprida / 333
21). Tres Lomas / 826

El G1 incluye a las poblaciones con mayor tasa de producción de residuos (mayores a 1100 unidades/semana) y serán visitadas de forma semanal. El G2 incluye las ciudades que tienen una generación de residuos baja (menores a 1100 unidades/semana) y por lo tanto serán visitadas quincenalmente. El objetivo en esta segunda alternativa es determinar dos recorridos que se desarrollarán alternativamente en las distintas semanas. Un

recorrido incluirá todas las ciudades (G1 y G2) (*recorrido global*), y otro recorrido incluirá sólo las ciudades con mayor demanda (G1) (*recorrido de refuerzo*). Por ejemplo, en la primera semana de la planificación se desarrollará el *recorrido global*, en la segunda semana el *recorrido de refuerzo*, y así sucesivamente. Llamaremos a esta alternativa *frecuencia compuesta*.

A. Métodos de resolución

Recientemente en la literatura se ha presentado un software basado en un algoritmo heurístico programado en Visual Basic como una macro de Microsoft Excel [14]. Si bien como señala el autor [14] utilizar este tipo de programación puede ocasionar algunas ineficiencias en los tiempos de resolución con respecto a otros algoritmos, también permite una gran facilidad de uso al presentar una interfaz extremadamente amigable que no requiere de grandes conocimientos de programación ni optimización combinatoria para su uso. En nuestro caso, al ser este trabajo una parte constitutiva de un proyecto más amplio de naturaleza interdisciplinaria, donde confluyen profesionales de distinta índole, esta característica resulta sumamente provechosa. Además, en caso de que podamos validar la heurística y garantizar la obtención de soluciones aceptables, podremos, en un futuro, escalar el problema fácilmente, ya que según el autor esta heurística es capaz de resolver instancias de hasta 200 nodos [14]. Esto es una ventaja frente a métodos de resolución exactos en problemas VRP (Vehicle Routing Problem) donde los tiempos de cómputo tienden a ser elevados para resolver instancias grandes [15]. A los efectos de validar los resultados obtenidos mediante esta heurística resolveremos el problema con CPLEX.

B. Enfoque heurístico

La heurística utilizada fue desarrollada por Erdoğan [14]. Este algoritmo fue adaptado a partir de la heurística conocida como Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) desarrollada por Pisinger y Ropke [16]. Esta heurística tiene su origen en el algoritmo Large Neighborhood Search (LNS) originalmente propuesto por Shaw [17]. El pseudo-código se la heurística puede verse a continuación (Algoritmo 1).

Algorithm 1 Algoritmo LNS implementado en Erdoğan, 2017

```

1: procedure LNS(input)           ▷ Como input se ingresa la información
   correspondiente a los clientes, vehículos y lugares de descarga (depots)
2:   S ← SolInicial()
3:   S' ← LocalSearch(S)
4:   BestS ← S'
5:   repeat
6:     S' ← DestroyAndRebuild(S')
7:     S' ← LocalSearch(S')
8:     if (Cost(S') ≤ Cost(S)) then
9:       BestS ← S'
10:    else
11:      p ← Random(0,1)
12:      if (p ≤ pvalue) then
13:        S' ← BestS
14:      end if
15:    end if
16:  until Timeelapsed ≤ Timelimit
17:  return BestS
18: end procedure

```

De manera sencilla el funcionamiento de la heurística se basa en la construcción de una solución inicial que se forma insertando clientes en las rutas disponibles de acuerdo con el objeto a minimizar (operador *Sol-Inicial*). El operador *Local-Search* aplica cuatro técnicas de búsqueda local. Los primeros tres se denominan *Exchange* (intercambio de dos clientes), *1-OPT* (extracción de un cliente de una ruta y su reinsertión en otra) y *2-OPT* (intercambio de dos porciones de rutas). Los mismos se encuentran explicados detalladamente por Groër, Golden y Wasil [18]. Otro operador utilizado es *Vehicle-Exchange*. Este operador intenta intercambiar los vehículos asignados a dos rutas teniendo eficacia cuando se trabaja con flota heterogénea, es decir, con una flota de vehículos con distinta capacidad, costos de funcionamiento u otra característica medible. El operador *Destroy-And-Rebuild* intenta alterar de manera considerable la solución actual para permitir explorar otra región del espacio de búsqueda. Esto extrae tramos extensos de rutas de la solución actual y vuelven a reinsertarse estos clientes con la intención de minimizar costos. La función *Cost* evalúa los costos de una solución. Una solución es aceptada si tiene un mejor costo que la mejor solución hallada hasta el momento. En caso de que una solución no tenga mejor costo que la solución anterior el algoritmo evalúa, con una probabilidad *p-value*, la posibilidad de reinicializar la búsqueda desde la mejor solución hallada hasta el momento. Este proceso se repite cíclicamente hasta el límite temporal impuesto por el usuario.

C. Enfoque exacto

Se aborda el modelado como un problema CVRP (Capacitated Vehicle Routing Problem) [19]. Numerosos problemas de distinta índole se han modelado mediante este problema [20]. En lo que respecta a su aplicación en logística inversa encontramos también numerosas aplicaciones. Canhong, Choy, Ho, Chung y Lam [21], han realizado una extensa recopilación de este tipo de aplicaciones. El problema aquí planteado consiste en establecer distintas rutas para la recolección de residuos de productos agroquímicos. Se tiene un conjunto finito K de rutas de recolección $\{K_k\}_{k=1}^m$, que deben transitar por las distintas localidades identificadas por nodos $i \in D$. Se definen los siguientes parámetros: C es la capacidad máxima del vehículo (se considera una flota homogénea), d^k que es la distancia total recorrida por el vehículo k como puede verse en la ecuación (2), m que es la cantidad de ciudades a visitar excluyendo el depósito, q_i es la cantidad de residuos a recolectar en el nodo i y d_{ij} es la distancia a recorrer desde el nodo i al nodo j . También se definen las siguientes variables: x_{ij}^k es una variable binaria que vale 1 si el vehículo k transita desde el nodo i al j , 0 en el otro caso, Q^k es la cantidad de envases recolectados por el vehículo k como puede verse en la ecuación (1) y u_i es una variable auxiliar continua para la eliminación de subtours.

$$Q_{min} = \min(Q^k) \quad (1)$$

$$d^k = \sum_{i,j \in D} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \quad (2)$$

El objetivo a resolver es minimizar la distancia total recorrida en la recolección de los envases por todas las localidades establecidas (ecuación 3). En las ecuaciones (4)-(12) se definen las restricciones del modelo.

$$\text{Min} \sum_{i,j \in D} x_{ij}^k \cdot d_{ij} \quad (3)$$

S.t.:

$$Q^k \leq C, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{i \in D \\ k \in K}} x_{ij}^k = 1, \forall j \neq 0 \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{j \in D \\ k \in K}} x_{ij}^k = 1, \forall i \neq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in D} x_{0j}^k = 1, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} x_{i0}^k = 1, \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in D} x_{ij}^k - \sum_{j \in D} x_{ij}^k = 0, \forall k \in K, \forall i, j \neq 0 \in D \quad (9)$$

$$u_i - u_j + m \cdot x_{i,j}^k \leq m - 1, \forall i, j \neq 0 \in D, \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\}, \forall i, j \in D, \forall k \in K \quad (11)$$

$$u_i \geq 0, i \in D \quad (12)$$

La ecuación (4) garantiza que la capacidad del vehículo no sea superada. Las ecuaciones (5) y (6) garantizan que cada ciudad sea visitada una única vez. Las ecuaciones (7) y (8) establecen el número de rutas a utilizar. La ecuación (9) refiere a la conservación del flujo en el recorrido mientras que la (10) impide la formación de subtours. La ecuación (11) establece la naturaleza binaria de las variables. La ecuación (12) indica que la variable u_i debe ser no negativa.

IV. RESULTADOS

Ambos algoritmos fueron implementados en un computador con un procesador Intel Core i7, 3,60GHz y una memoria RAM de 16 GB. Para la heurística LNS se utilizó Microsoft Excel 2010 con un límite temporal de 60 seg. y para el algoritmo exacto se utilizó GAMS 24.2.3 para su modelado y CPLEX 12.5.1 para su resolución, con un tiempo máximo de cómputo establecido de 10000 seg.

En primera instancia se utilizó la heurística mencionada en el apartado III (B) para obtener soluciones ya que en sólo 60

segundos el software arrojaba una solución factible. La heurística se corrió 5 veces y se identificó la mejor solución encontrada en cada caso. Posteriormente, para validar los resultados obtenidos con la heurística, se resolvió el modelo matemático presentado en la sección III (C). A los efectos de limitar los costos fijos asociados a la cantidad de rutas se utilizó como valor inicial para las ecuaciones (7) y (8) el número mínimo de rutas posibles que se obtiene como el valor techo del cociente entre la demanda total de los municipios que se consideran y la capacidad del vehículo. Las distancias entre municipios (d_{ij}) fueron estimadas mediante Google Maps.

En todos los casos se obtuvo la misma solución por lo que se pudo validar la heurística. En las Tablas II, III y IV se muestran los resultados obtenidos para cada escenario evaluado, en cuestión de localización del depósito, cantidad de rutas necesarias, distancias recorridas totales y los tiempos de resolución de LNS y CPLEX. En la Tabla II se muestran los resultados para los tres escenarios con *frecuencia simple*. Se puede observar que el mínimo recorrido se obtiene instalando dos depósitos.

TABLA II
SOLUCIONES PARA LOS TRES ESCENARIOS CON FRECUENCIA SIMPLE

Depósito	Cantidad de Rutas	Recorrido total (km.)	Tiempos de resolución LNS/CPLEX (seg.)
Escenario Saavedra	4	2604	60.00/1589.09
Escenario Tres Arroyos	4	2900	60.00/449.72
Escenario doble	4	2239	60.00/93.78

TABLA III
RECORRIDO REFUERZO PARA LOS MUNICIPIOS DEL

Depósito	Cantidad de Rutas	Recorrido total (km.)	Tiempos de resolución LNS/CPLEX (seg.)
Escenario Saavedra	3	1791	60.00/6.14
Escenario Tres Arroyos	3	1960	60.00/72.19
Escenario doble	3	1360	60.00/1.08

TABLA IV
RECORRIDO GLOBAL PARA TODOS LOS MUNICIPIOS

Depósito	Cantidad de Rutas	Recorrido total (km.)	Tiempos de resolución LNS/CPLEX (seg.)
Escenario Saavedra	4	2711	60.00/3397.19
Escenario Tres Arroyos	4	3104	60.00/10000.00 ^(*)
Escenario doble	4	2333	60.00/883.09

^(*) Obs: el gap informado por GAMS fue de 2.28%

TABLA V
COMPARACIÓN. RECOLECCIÓN MENSUAL PARA TODOS LOS MUNICIPIOS

Depósito	Distancia recorrida con frecuencia simple (km.)	Distancia recorrida con frecuencia compuesta (km.)
Escenario Saavedra	10416	9004
Escenario Tres Arroyos	11600	10128
Escenario doble	8956	7386

En las Tablas III y IV se muestran los resultados para los tres escenarios resueltos considerando *frecuencia compuesta* de recolección. En la Tabla IV se encuentran los resultados de los *recorridos refuerzo*, que incluyen sólo a las localidades con mayor demanda (G1). En la Tabla V se presentan los resultados de los *recorridos globales*, que incluyen tanto a los municipios del G1 como del G2. En el caso del *recorrido refuerzo*, se obtuvo que la cantidad mínima de rutas es 3. Nuevamente, el menor recorrido se obtiene instalando ambos depósitos (*escenario doble*). Debe resaltarse que todas las corridas de CPLEX fueron capaces de encontrar la solución óptima dentro del límite temporal establecido a excepción del *recorrido global* del *escenario Tres Arroyos* en *frecuencia compuesta*. Para determinar la mejor solución es necesario unificar los valores obtenidos en kilómetros recorridos mensualmente. Dicha información se muestra en la Tabla VI. Como puede verse, el menor recorrido lo determina la frecuencia diferenciada instalando 2 depósitos. A modo ilustrativo, en la Tabla VI, se muestran las rutas, los recorridos y las cantidades de envases recolectados, para el *escenario Saavedra* y la *frecuencia simple*.

TABLA VI
SOLUCIÓN PARA FRECUENCIA SIMPLE EN EL ESCENARIO SAAVEDRA

Ruta	Municipios	Recorrido (km.)	Envases recolectados
1	17-14-19-15-16-3-4	1024	7534
2	13-6-2-20	595	8904
3	11-1-12	223	6984
4	7-10-5-8-18-21	762	8978

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El problema de ruteo de recolección de residuos agroquímicos del Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires pudo ser resuelto tanto por un método heurístico como por un método exacto. Si bien los tiempos de ejecución del segundo fueron mucho mayores que el primero, el método exacto sirvió para validar los resultados preliminares obtenidos con la heurística. Luego de la evaluación y análisis de las distintas alternativas de resolución del problema planteado, se obtuvo que el menor recorrido obtenido lo determina la frecuencia diferenciada instalando 2 depósitos.

Aunque dicha conclusión es importante, cabe destacar que esto es sólo una solución del problema centrada en la minimización de la distancia a recorrer. Es decir, no debe soslayarse el efecto de otros factores intervinientes al momento de implementar la planificación como pueden ser los tiempos de realización de recorridos en base a la velocidad del vehículo y los costos de instalación de los depósitos. Si bien este trabajo no es una solución definitiva al problema abordado, permite asesorar a la dirección del proyecto sobre la mejor localización de la planta entre las opciones disponibles y sobre la necesidad de considerar los tiempos de los recorridos. Esto evidenció la importancia de tomar decisiones con respecto a la tecnología de trituración utilizada y la posible instalación de centros de compactación intermedias. En una etapa posterior se intentará ajustar los recorridos para adecuarlos a los requisitos de tiempos de la jornada de trabajo establecida en los convenios laborales, teniendo en cuenta que ya sea aumentar la cantidad de vehículos o extender el horizonte de planificación son medidas que impactan en la viabilidad económica del proyecto. También deben tomarse decisiones sobre si el triturador y compactador de envases que se proyecta ubicar en los vehículos recolectores es capaz de procesar la cantidad de envases recibida en los tiempos de viaje entre localidades. Por otro lado, pensando en la implementación del proyecto, dados los bajos tiempos de cálculo que se reportan, podría realizarse una planificación reactiva semanal o mensual en función de la cantidad de envases acumulada en cada lugar. Claramente, esto requiere de un registro de datos diarios, sincronizados entre depósitos, coordinadores y personal. Finalmente, es importante destacar que este trabajo se encuentra abocado a la solución de una problemática real del sudoeste bonaerense, y que de ser necesario, podría fácilmente extrapolarse a otras áreas de nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto *Diseño de un sistema de gestión integral de envases de agroquímicos para el Sudoeste Bonaerense* que se encuentra siendo llevado a cabo por la Universidad Nacional del Sur y la Universidad Provincial del Sudoeste.

REFERENCIAS

- [1] Ley N° 24051, *Residuos peligrosos*, Congreso de la Nación República Argentina, Argentina, 1991.
- [2] D. Briassoulis, M. Hiskakis, H. Karasali y C. Briassoulis. "Design of a European agrochemical plastic packaging waste management scheme Pilot implementation in Greece". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 87, pp. 72-88, 2014.
- [3] P. Boonyotha y C. B. Iwai. "Environmental Risk Assessment of Agrochemical Packaging Waste in Northeast Thailand". *International Journal of Environmental and Rural Development*, vol. 1, n. 2, pp. 49-53, 2010.
- [4] P. D. Curle, C. D. Emmerson, A. H. Gregory, J. Hartmann, y P. Nixon (1998). "Packaging of agrochemicals". *Chemistry and Technology of Agrochemical Formulations*, Springer, capítulo 9, pp. 264-301, 1998.
- [5] O. Paunović, U. Marčeta, M. Pavlović, M. Zakin y A. Đurić. Financial Effect from the Proper Handling of Pesticide Packaging Waste. Óbuda University e-Bulletin, Budapest, Hungría, 2015.
- [6] J. Eras, J. Costa, F. Vilaró, A. M. Pelacho, R. Canela-Garayoa, y L. Martín-Closas. "Prevalence of pesticides in postconsumer agrochemical polymeric packaging". *Science of The Total Environment*, vol. 580, pp. 1530-1538, 2017.
- [7] U. Marčeta y B. Vujić. "Impact of rinsing in pesticide packaging waste management: Economic and environmental benefits". *Journal of Engineering Management and Competitiveness*, vol. 5, n. 2, pp. 84-89, 2015.
- [8] I. Braşovean, I. Oroian, B. Bordeanu, R. C. Marian, C. Mălinaş y A. Milăşan. "The system for the collection of packaging waste of pesticide residues". *ProEnvironment Promediu*, vol. 5, n. 12, 2012.
- [9] G. Vox, R. V. Loisi, I. Blanco, G. S. Mugnozza y E. Schettini. "Mapping of agriculture plastic waste". *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 8, pp. 583-591, 2016.
- [10] J. C. M. Rando. "The Campo Limpo system reverse logistics for empty containers of crop protection products". *Outlooks on Pest Management*, vol. 24, n. 6, pp. 273-275, 2013.
- [11] F. G. M. Freires y B. Juazeiro. "Reverse Logistics Systems of Empty Packings of Agricultural Pesticides in Brazil" en *21st POMS Annual Conference*, Vancouver, Canada, 2010.
- [12] M. F. Mello y R. Scapini. "Reverse logistics of agrochemical pesticide packaging and the impacts to the environment". *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, vol. 13, n.1, pp. 110-117, 2016.
- [13] G. S. Sato, G. Torres Carbone, y R. Giro Moori. "Reverse logistics of agrochemical packaging in brazil: operational practices". *INTERFACEHS*, vol. 1. n. 1, 2006.
- [14] G. Erdoğan, "An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems". *Computers & Operations Research*, vol. 84, pp. 62-72, 2017.
- [15] G. Laporte, S. Ropke, y T. Vidal. Heuristics for the vehicle routing problem. *Vehicle routing: problems, methods, and applications* (eds P. Toth y D. Vigo). EEUU: SIAM, cap 4, pp. 87-116, 2014.
- [16] D. Pisinger, y S. Ropke, "A general heuristic for vehicle routing problems". *Computers & Operations Research*, vol. 34, n. 8, 2403-2435, 2007.
- [17] P. Shaw, "Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems", en *International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, Springer Berlin Heidelberg, 1998, pp. 417-431.
- [18] C. Groër, B. Golden y E. Wasil. "A library of local search heuristics for the vehicle routing problem". *Mathematical Programming Computation*, vol. 2, n. 2, pp. 79-101, 2010.
- [19] M. Frutos y F. Tohmé. "A new approach to the optimization of the CVRP through Genetic Algorithms". *American Journal of Operations Research*, vol. 2, n. 4, pp. 495-501, 2012.
- [20] S. Irnich, P. Toth y D. Vigo. "The Family of Vehicle Routing Problems". *Vehicle routing: problems, methods, and applications* (eds P. Toth y D. Vigo). EEUU: SIAM, cap. 1, pp. 1-33, 2014.
- [21] L. Canhong, K. L. Choy, G. T. S. Ho, S. H. Chung y H. Y. Lam. "Survey of green vehicle routing problem: past and future trends". *Expert Systems with Applications*, vol. 41, n. 4, pp. 1118-1138, 2014.