

## Aplicación del algoritmo recocido simulado en un caso real discreto de planeación de la producción

Dr. Sergio M. Ramírez Campos<sup>1</sup>, Ing. Mayra Isabel Avilés García<sup>2</sup>, M. C. Rogelio Sánchez Rodríguez<sup>3</sup>, M.C. Claudia M. Fraustro Gaona<sup>4</sup>, M.A. Ana L. Ramírez Jaramillo<sup>5</sup>

**Resumen:** Se presenta el diseño y aplicación del método recocido simulado (RS) en un caso real de planeación de la producción de guantes de látex, en el que se incrementó la utilización de la capacidad instalada de una línea de producción logrando la convergencia hacia un menor número de ciclos. Este caso fue considerado anteriormente por Ramírez et al. (2022) donde se aplicó el algoritmo colonia de hormigas (CH). Se consideran 28 pedidos que van desde 650 pares de guantes hasta 158,068 pares; cada producto requiere ciertas características ya que pueden ser para uso doméstico o para uso industrial; se dispone solo de tres tanques (contenedores) para las mezclas que requiere cada producto; cada lugar de la línea se ocupa por un plato (plataforma donde se colocan los moldes) y el número de pares de guantes por plato varía en términos de la medida (o talla) del guante que pueden ser hasta 6 diferentes tamaños; el número de platos para cada molde de cierta talla, está limitado. Otra limitante fuerte es la configuración de los tres tanques, ya que, dependiendo de qué mezcla se coloca en cada contenedor, se podrán procesar uno o más productos diferentes en la línea en uno o más ciclos (un plato que realiza un ciclo, genera producto terminado). Los resultados obtenidos en este escenario muestran claramente la convergencia del método RS. Además, al identificar una mejor solución, es decir, la secuenciación en que se van a procesar los productos (trabajos), permite conocer de antemano, las necesidades de cada mezcla en cuanto a volumen y momento, evitando así, el desperdicio por excedentes y la insatisfacción de los clientes por atraso en las entregas. El hallazgo más importante fue que se obtuvo el mismo resultado, en cuanto al número de ciclos, que el logrado con CH, lo cual es un indicio de un resultado óptimo.

**Palabras clave:** Recocido simulado, secuenciación de trabajos, utilización de la capacidad

### Introducción

El método de recocido simulado (RS) primero fue propuesto por Metropolis et al. (1953) y luego utilizado por Kirkpatrick et al. (1983) para resolver problemas de optimización combinatoria. Recientemente, Sroka et al. (2021) utilizan RS en conjunto con un algoritmo genético para resolver un problema NP difícil (así llamado por la expresión *non-deterministic polynomial-time hardness*, en inglés) que consiste en determinar el orden en que se deben llevar a cabo varios proyectos de construcción y las mejores variantes de trabajo. Toman en cuenta duraciones y costos de los trabajos, la posibilidad de escoger modos de ejecución alternos además de restricciones específicas (por ejemplo, fechas de entrega impuestas por los inversionistas). Los autores demuestran una alta efectividad de su modelo para lograr resultados óptimos.

Kalaki et al. (2021) consideran el problema de programación de máquinas paralelas idénticas con deterioro exponencial dependiente del tiempo, en el cual buscan minimizar el tiempo requerido en una secuencia de trabajos. Debido a que en grandes escalas este problema es NP difícil, aplican, por separado, un algoritmo genético (AG), RS y un sistema inmunológico artificial (SIA). Demuestran que RS tiene un alto desempeño en relación al AG y al SIA.

Tavakoli (2020) aborda un problema de optimización multicriterio que incluye la minimización de tres objetivos importantes: (a) monto total de las multas por la producción extemporánea de pedidos; (b) el tiempo total de abastecimiento de las estaciones así como los tiempos de preparación de las mismas; y (c) costo total de alimentación fuera del plan de estación de trabajo. Este escenario se considera un problema polinomial complejo no determinista no resuelto antes. Utiliza RS y búsqueda Tabú (BT) por separado y en conjunto (un híbrido). Encuentra que el modelo híbrido presenta una ventaja significativa en la convergencia en relación a RS y BT por separado.

Yang et al. (2018) presentan un modelo de mejora del algoritmo de optimización de la mariposa (OM) utilizando RS para resolver problemas de aprendizaje máquina y de optimización continua. RS es incorporado a OM para escapar

<sup>1</sup>El Dr. Sergio M. Ramírez Campos es jefe de proyectos de investigación en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, [sergio.rc@saltillo.tecnm.mx](mailto:sergio.rc@saltillo.tecnm.mx) (autor corresponsal)

<sup>2</sup>La maestra Mayra I. Avilés García es docente en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, [mayra.ag@saltillo.tecnm.mx](mailto:mayra.ag@saltillo.tecnm.mx)

<sup>3</sup>El maestro Rogelio Sánchez Rodríguez es jefe del departamento de Ciencias Económico Administrativas del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, [rogelio.sr@saltillo.tecnm.mx](mailto:rogelio.sr@saltillo.tecnm.mx)

<sup>4</sup>La maestra Claudia M. Fraustro Gaona es docente en el departamento de Ingeniería Industrial del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, [claudia.fg@saltillo.tecnm.mx](mailto:claudia.fg@saltillo.tecnm.mx)

<sup>5</sup>La maestra Ana L. Ramírez Jaramillo es docente en el departamento de Ciencias Económico Administrativas del Tecnológico Nacional de México campus Saltillo, [ana.ri@saltillo.tecnm.mx](mailto:ana.ri@saltillo.tecnm.mx)

de un óptimo local (OMRS). Abordan uno de los problemas más desafiantes, como lo es, el enrutamiento de vehículos. Comparan un algoritmo genético, OM y OMRS y demuestran que éste último es más efectivo.

Como se observa en los antecedentes ya mostrados, RS representa un método vigente para atender problemas de optimización combinatoria como es el caso atendido en la presente investigación. Considerando que un evento es un lote de guantes a procesar, la secuenciación de dichos eventos, representa la variable a estudiar, ya que se puede programar desde un par de guantes hasta 157,500 como se muestra más adelante. Por ello, el objetivo de esta investigación es determinar la cantidad de guantes (tamaño del lote) en cada evento y el orden en que es procesado, a fin de reducir los ciclos de producción necesarios.

### Metodología

El caso real se refiere al proceso de fabricar guantes de látex de diversas medidas que van de la talla 6 a la talla 11 y que pueden ser para uso doméstico o industrial. Utiliza el modelo por inmersión mediante un transportador. Primero se precalientan los moldes y se sumergen, en un primer contenedor, en el látex de manera lenta para luego retirarlos aún más lentamente. Los moldes calientes recubiertos de látex se sumergen, en un segundo contenedor, con un segundo compuesto, el coagulante, del que luego se eliminará el solvente que lo compone. Puede haber o no, una tercera inmersión para agregar otro componente, como por ejemplo, un ingrediente químico que determina alguna característica del guante dependiendo si es de uso doméstico o industrial. Después de la inmersión, se envían al horno para el secado preliminar, se agrega la funda interior de fibra y el agua caliente y se envían al horno para la vulcanización, el secado y el moldeado. Después de desmoldar los guantes, se inflan para su inspección, se moldean a baja temperatura, se secan a temperatura media, se lavan con agua, se deshidratan, se secan y luego se empaquetan y se envían al almacén de productos terminados.

Antes de mostrar los pasos del algoritmo de Recocido Simulado (RS), es necesario considerar la siguiente nomenclatura:

1. Producto a ser procesado (**p**). Se refiere a un cierto tipo de guante sin importar la medida en relación a una demanda a satisfacer.
2. Demanda de un producto (**dp**). Es la cantidad total que se decide procesar de un cierto producto **pp**.
3. Producto programado para ser procesado (**pp**). Se refiere a una cierta cantidad de cierto tipo de guante y talla (medida del guante). Dicha cantidad puede ser menor o igual a **dp**.
4. Número de **pp**'s a procesar (**np**). En las tablas 8 y 9 se observa que son 28.
5. Número de platos (**pt**) y ciclos (**ct**) requeridos para procesar la producción de cada **pp**.
6. Configuración de mezclas (**cm**). Conjunto de mezclas de químicos requerido para procesar uno o más productos **p**.

Cabe aclarar que una configuración de mezclas (**cm**) se refiere a un cierto número de tanques, con una cierta mezcla contenida en cada uno de ellos. A partir de una demanda **dp** se identifica una configuración de tanques (entra varias posibles) para procesar dicha demanda.

#### *Pasos del Algoritmo Recocido Simulado (RS) Diseñado*

En el desarrollo de RS, se utiliza el concepto de cromosoma y de gen que se utilizaron en Ramírez et al. (2009), ya que ello facilita el diseño de RS, lo cual permitiría identificar también el diseño como un algoritmo híbrido. Su origen es debido a que uno o más productos utilizan una cierta configuración de tanques de inmersión, por lo que un gen será el conjunto de productos que tienen una misma configuración de tanques. Por lo tanto, un cromosoma estará compuesto por los genes necesarios para cubrir toda la demanda de un periodo, y de aquí que la longitud de un cromosoma sea variable.

El objetivo es minimizar el número total de ciclos (**ntc**). Enseguida se describen los pasos del método aplicado.

**Paso A:** Fijar los parámetros iniciales. En la tabla 1 se muestran dichos parámetros.

Temperatura inicial	Temperatura final	Velocidad de enfriamiento	Número de sub-iteraciones	Factor de perturbación
<b>T<sub>0</sub></b>	<b>T<sub>f</sub></b>	<b>S</b>	<b>n</b>	<b>α</b>

Tabla 1. Parámetros de RS

**Paso B:** Determinar la cantidad total de platos y ciclos necesarios para cada **pp<sub>j</sub>**. Dado que la demanda (**dp**) no es un múltiplo del número de **pp**'s por plato, se realiza el siguiente procedimiento.

La cantidad del total de platos inicial ( $pti$ ) se calcula de acuerdo a la ecuación 1.

$$pti = \frac{dp}{5mb}(1 + fp) \quad (1)$$

Donde,

$mb$  = Número de moldes por cada barra  
 $fp$  = Factor porcentual por pérdidas en producción

En cada plato se insertan 5 barras para moldes mano izquierda y 5 moldes para moldes mano derecha. Debido al tamaño del guante,  $mb$  puede variar. Se considera un porcentaje adicional ( $fp$ ) a lo programado para compensar los productos rechazados por diversas causas.

La cantidad total de ciclos inicial necesarios (sin redondear) se calcula como se indica en la ecuación 2.

$$cti = pti/ip \quad (2)$$

Donde,

$ip$  = Cantidad total de platos disponibles en inventario

Al redondear  $cti$  al entero inferior,  $[cti]$ , o al entero superior,  $\lceil cti \rceil$ , los platos requeridos pueden ser  $pr_1$  o  $pr_2$ , como se indica en las ecuaciones 3 y 4.

$$pr_1 = pti/\lceil cti \rceil \quad (3)$$

$$pr_2 = pti/[cti] \quad (4)$$

Al redondear  $pr_1$  o  $pr_2$  al entero más próximo y comparar con  $ip$ , se puede decidir al respecto como se indica en la tabla 2.

Condición	Cantidad total de platos a procesar ( $pt$ )	Cantidad total de ciclos a procesar ( $ct$ )
$[pr_1] \leq ip$	$[pr_1]$	$[cti]$
$[pr_1] > ip$	$[pr_2]$	$[cti]$

Tabla 2. Cantidad a producir en platos y ciclos.

Este procedimiento arrojó un promedio de 0.97% de variación absoluta respecto a la producción total deseada en términos de pares de guantes.

**Paso C:** Si es la iteración 1, ir al paso **D**. En caso contrario, continuar con la siguiente iteración e ir al paso **E**.

**Paso D:** Generar una solución al azar. Para ello, formar al azar una configuración de mezclas  $cm_i$  e identificar los productos que pueden ser procesados con dicha  $cm_i$ . Este paso se repite las veces que sea necesario hasta que toda la demanda (todos los productos) estén incluidos en alguna  $cm_i$ . Cada  $cm_i$  corresponde a un gen. En otras palabras, para cada  $cm_i$  se identifica un subconjunto  $U_j$  de productos  $pp_j$ . El número de  $cm$  que fue necesario, es el total de genes ( $tg$ ) de la solución en turno. A partir de las  $cm$  y los conjuntos  $U$  ya determinados, llevar a cabo la programación detallada para determinar el número total de  $ntc$ . El procedimiento es como sigue.

1. Se actualiza la matriz de lugares disponibles,  $mld$ . A través de esta matriz, se lleva el control de los lugares libres y ocupados. En la figura 1 se muestran los lugares disponibles (columnas) por ciclo (renglones). Al inicio, todos están libres, lo cual se indica con ceros. En esta matriz se marcan ocupados los lugares que se indican en la tabla 3 columnas 8 y 9 (lugares que están ocupando) y columnas 11 y 12 (ciclos que se están ocupando). Además, cuando se cambia de un gen al siguiente, lo cual se observa en la tabla 3 columna 13 renglones 12 y 13, todos los lugares no ocupados del evento 1 al evento 13 y hasta el ciclo mayor (indicado en la columna 19) del evento 13, se marcan “ocupados” para que no se utilicen. Esto es, para evitar que los productos con la  $cm$  actual no se mezclen con los productos que requieren la nueva

cm.

Ciclo	Lugares				
	1	2	...	30	31
1	0	0	...	0	0
2	0	0	...	0	0
⋮			...		
120	0	0	...	0	0
⋮			...		

Fig. 1. Matriz de lugares disponibles por ciclo (**ml**d).

2. Actualizar la matriz de eventos, **me**. A través de esta matriz se van registrando los eventos en el orden en que se suceden. En la tabla 3 se muestran, parcialmente, los eventos 1 al 15 de la mejor solución encontrada por el algoritmo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Demanda					Programación								Variación		Moldes	Platos	Clave	ciclo
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No. gen	pares	%	por barra	en inventario	del molde	mayor
1	490	9	4248	4587	4680	8	1	8	3	1	3	1	-93	-1.99	13	34	12	3
2	490	9				3	9	11	3	1	3	1						3
3	490	9				4	12	15	3	1	3	1						3
4	490	9				8	16	23	3	1	3	1						3
5	490	9				1	24	24	3	1	3	1						3
6	490	11	5328	5754	5670	1	25	25	18	1	18	1	84	1.48	9	7	12	18
7	490	11				3	26	28	18	1	18	1						18
8	490	11				2	29	30	18	1	18	1						18
9	490	11				1	31	31	18	1	18	1						18
10	490	10	2160	2332	2280	8	1	8	2	4	5	1	52	2.28	12	20	12	18
11	490	10				10	9	18	2	4	5	1						18
12	490	10				1	19	19	2	4	5	1						18
13	491	8	7450	8045	7980	1	20	20	6	19	24	2	65	0.81	14	20	12	24
14	491	8				13	1	13	6	19	24	2						24
15	491	8				4	14	17	6	19	24	2						24

Tabla 3. Despliegue de eventos de una solución (**me**).

En el renglón 1, que corresponde al evento 1, se indica lo que previamente determinó el algoritmo, es decir, qué **pp** procesar (columnas 2 y 3), cuántos platos (columna 7) y cuántos ciclos (columna 10). Esto está sujeto a los platos en inventario (columna 17) y a los lugares disponibles en el transportador (lo cual se determina a partir de la **ml**d). También, se observa que de los 34 platos disponibles (renglón 1, columna 17) se programaron 24 en cinco eventos (renglones 1 al 5 columna 7).

En las columnas 8 y 9 se indican los lugares ocupados; en el evento 1 (renglón 1) se utilizan los lugares 1 al 8. En las columnas 11 y 12 se indican los ciclos utilizados, es decir, los 8 platos van a estar 3 ciclos (columna 10) del ciclo 1 al 3.

Para abundar en la explicación, en la tabla 4 se muestra parte de la información de los eventos 1 al 4 de la tabla 3.

Se observa en la tabla 4 que, en tanto no se saturan los 31 lugares del ciclo 1, se pueden seguir asignando productos del ciclo 1 en adelante. En la tabla 3 se observa que en el evento 9 ya se saturaron los lugares, por lo cual los 8 platos del evento 10 se programan en los lugares 1 a 8, del ciclo 4 en adelante, ya que dichos lugares se desocupan en el ciclo 3.

Evento	Producto			Platos			Lugares			Ciclos		
	Tipo	Talla	Disponibles	utilizados	Inventario	Disponibles	Utilizados			Utilizados	del	al
							Total	del	al			
1	490	9	34	8	26	31	8	1	8	3	1	3
2			26	3	23	23	3	9	11	3	1	3
3			23	4	19	20	4	12	15	3	1	3
4			19	8	11	16	8	16	23	3	1	3
5			11	1	10	8	1	24	24	3	1	3

Tabla 4. Desglose de algunos eventos de la tabla 3.

Una vez que se terminaron de procesar todos los productos, se calcula la desviación estándar (**d\_e**) de cada **pp**, en relación a la columna 12 de la **me** (tabla 3). Esto permite reducir el impacto de los cambios de gen. La columna 12 de la tabla 3 se refiere al número de ciclo en que se termina cada evento. Para ilustrarlo, en las ecuaciones 5 y 6 se muestran los cálculos de la **d\_e** de los eventos 1 al 5 de la tabla 3 que corresponden al producto 490 talla 9 y cuyos valores de la columna 12 son 3 en todos los casos.

$$\bar{x} = \frac{3+3+3+3+3}{5} = 3 \quad (5)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (x_i - 3)^2}{5-1}} = 0.00 \quad (6)$$

La  $d_e$  de cada  $pp$  se utiliza para fijar el nivel de atractividad asociado, de acuerdo a la ecuación 7.

$$\eta = \frac{1}{d_e} \quad (7)$$

Si  $d_e$  es cero entonces  $\eta = 1$ .

Para efectos del nivel de utilización, se calculan los ciclos-plato vacíos ( $cpv$ ) atribuidos a cada  $pp$  y que se generan al cambiar de un gen a otro en la solución en turno. En la tabla 3 se puede observar el cambio de gen en los eventos 12 y 13 y columna 13. En la columna 19 del evento 12 el ciclo mayor incurrido en el gen 1 (columna 13) es 18 ( $c_{may}$ ). Así, los  $cpv$  se del producto 490 talla 9, se obtienen restando al  $c_{may}$  el ciclo (columna 12) en que se terminan de procesar los platos de los eventos 1 al 5 y multiplicando por los platos procesados (columna 7). En la tabla 5 se resume este ejemplo.

	Evento					Total
	1	2	3	4	5	
( $c_{may}$ -columna 12)	(18-3)	(18-3)	(18-3)	(18-3)	(18-3)	
Columna 7	8	3	4	8	1	
$cpv$	120	45	60	120	15	360

Tabla 5. Ejemplo del cálculo de los  $cpv$ .

La suma del renglón 4 de la tabla 5 da 360. El nivel de utilización asociado a cada producto está definido de acuerdo a la ecuación 8.

$$\tau = \left( \frac{1}{cpv} \right) \quad (8)$$

Si  $cpv = 0$  entonces  $\tau = 1$

Con lo anterior se calculan las probabilidades ( $p_i$ ) para cada  $pp$  de acuerdo a la ecuación 9.

$$p_i = [\alpha\tau_i + (1 - \alpha)\eta_i] / \left( \sum_{k=0}^n [\alpha\tau_k + (1 - \alpha)\eta_k] \right) \quad (9)$$

En la iteración 1 de cada corrida, se obtiene una solución al azar, la cual se identifica como  $R_0$ . A partir de la iteración 2, se utilizan las probabilidades derivadas de los niveles de utilización y de atractividad para perturbar la mejor solución obtenida hasta la  $i$ -ésima sub-iteración. Se registra la aptitud de  $R_0$ , la cual es el número de ciclos totales requeridos. Se identifica la aptitud de la solución al azar como  $V_0$ .

**Paso E.** Inicializar tres parámetros adicionales. En la tabla 6 se muestran dichos parámetros.

Temperatura de la $i$ -ésima sub-iteración	La mejor solución en la $i$ -ésima sub-iteración	Aptitud de $R$
$T_i = T_0$	$R = R_0$	$V = V_0$

Tabla 6. Inicialización de tres parámetros

**Paso F.** Si  $(T_i \geq T_r)$  inicializar  $k = 1$  (contador de las sub-iteraciones) e ir al paso **G**. En caso contrario, continúa en el paso **N**.

**Paso G:** Se procede a la perturbación de la solución actual, identificando los **pp**'s de cada gen en la solución anterior, de manera que se forman  $q$  conjuntos, donde  $q$  es el número total de genes de la solución anterior. Cada conjunto  $S$ , originalmente presenta un ordenamiento de los **pp**'s, así como los genes. En este paso, se reordenan al azar ambos aspectos.

Para reordenar los **pp**'s de cada conjunto  $S$ , se utiliza el método de la ruleta que consiste en lo siguiente. Primero se calcula la suma ( $P$ ) de las probabilidades ( $p_k$ ) de cada **pp** del conjunto  $S$  (donde  $c_s$  es la cardinalidad del conjunto), como se indica en la ecuación 10.

$$P = \sum_{k=1}^{c_s} p_k \quad (10)$$

Enseguida, se calcula la probabilidad relativa ( $f_j$ ) de cada **pp** de acuerdo a la ecuación 11.

$$f_j = \frac{p_k}{P} \quad (11)$$

Se acumulan las probabilidades relativas ( $f_j$ ) obteniendo los intervalos abiertos para cada  $pp_j$  como se muestra en la tabla 7.

pp <sub>1</sub>	pp <sub>2</sub>	...	pp <sub>k</sub>
F <sub>1</sub> = f <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> = F <sub>1</sub> + f <sub>2</sub>	...	F <sub>k</sub> = F <sub>k-1</sub> + f <sub>k</sub>
(0 - F <sub>1</sub> )	(F <sub>1</sub> - F <sub>2</sub> )	...	(F <sub>k-1</sub> - F <sub>k</sub> )

Tabla 7. Intervalos para  $d_j$

Se genera un número uniforme aleatorio continuo,  $r_i$  como se muestra en la ecuación 12.

$$r_i \sim U(0,1) \quad (12)$$

Se identifica el intervalo  $j$  que contiene a  $r_i$  y se selecciona  $pp_j$  terminando así, el método de la ruleta. Con este nuevo ordenamiento, se consideran los productos para una nueva solución.

Se continúa con los pasos 1 y 2 del paso C hasta completar las iteraciones deseadas. La solución así alcanzada se identifica como **R<sub>1</sub>**.

Se registra la aptitud de la solución perturbada, la cual es el número de ciclos totales requeridos. Se identifica esta aptitud como **V<sub>1</sub>**.

**Paso H.** Si  $(V_1 < V_0)$  calcular la probabilidad  $P = e^{-\frac{(V_0 - V_1)}{T_i}}$ , en caso contrario hacer  $P = 1$ .

**Paso I.** Generar un número aleatorio uniforme  $r \sim U$ .

**Paso J.** Si  $(V_1 < V_0)$  o  $(r > P)$  hacer  $R_0 = R_1$  y  $V_0 = V_1$  e ir al paso **J**. En caso contrario ir al paso **K**.

**Paso K.** Si  $(V_1 < V)$  hacer  $V = V_0$  y  $R = R_0$

**Paso L.** Hacer  $k = k + 1$ .

**Paso M.** Si  $(k > n)$  se disminuye la temperatura de acuerdo a la ecuación 13 y se continúa en el paso **F**. En caso contrario, ir al paso **G**.

$$T_i = s * T_i \quad (13)$$

**Paso N:** Se registra la mejor solución de la  $i$ -ésima corrida, **R**, **V**.

**Paso O:** Para cada corrida se repiten los pasos C a N. Una vez que se ejecutan las corridas deseadas, identificar y mostrar la mejor corrida y con ello termina el proceso.

Se desarrolló la programación en Microsoft Visual Basic for Applications VBA en Excel 2016 y las corridas se realizaron en un procesador Intel Core i7-4790 de 64 bits, 3.60 Ghz y 8 GB en RAM. El tiempo promedio por corrida fue de 1.6490 minutos. A continuación, se desarrollan los resultados y el análisis.

### Resultados y Análisis

La información de entrada al modelo desarrollado se muestra a continuación. En las tablas 8 y 9 se incluye la demanda considerada (pedidos) en la investigación y que corresponde a un mes. Esta demanda se satisface completamente ya que se considera una restricción dura.

1	3	4	5
No.	cantidad	referencia	Talla
1	6696	485	6
2	4536	485	7
3	5760	485	8
4	114696	485	9
5	48960	485	10
6	15768	485	11
7	5900	487	6
8	3744	487	11
9	4248	490	9
10	2160	490	10
11	5328	490	11
12	1350	491	6
13	650	491	7
14	7450	491	8

Tabla 8. Demanda original de los productos

1	3	4	5
No.	cantidad	referencia	talla
15	20150	491	9
16	55092	492	7
17	73964	492	8
18	135884	492	9
19	146360	492	10
20	4704	492	11
21	12300	495	6
22	4600	495	7
23	4900	495	8
24	1100	495	10
25	1000	497	7
26	4900	497	8
27	3700	497	9
28	3900	497	10

Tabla 9. Demanda original de los productos (continuación)

En la tabla 10, se encuentra la información de los moldes requeridos por producto y los ingredientes posibles de las mezclas. Se puede ver que se dispone de diversas alternativas en cuanto a los ingredientes de las capas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
No.	referencia	código molde	coagulante	capa1a	capa1b	capa1c	capa1d	capa2a	capa2b	capa2c	capa2d
1	485	12	730001	730093	0	0	0	730094	0	0	0
2	487	10	730001	730009	730008	730023	730010	0	0	0	0
3	490	12	730001	730009	730008	730023	730010	730009	730008	730023	730010
4	491	12	730001	730009	730023	730010	0	730013	0	0	0
5	492	27	730001	730009	730023	730010	0	730013	0	0	0
6	495	12	730001	730011	730016	730018	0	730018	0	0	0
7	497	12	730001	730011	730016	730018	0	730013	0	0	0

Tabla 10. Moldes requeridos e ingredientes posibles de los productos.

En las tablas 11 y 12, se encuentran los datos de los moldes por barra e inventario de platos. En cada barra se colocan los moldes y en cada plato se insertan 5 barras. En las tablas 13 y 14, se muestran las configuraciones posibles de las mezclas. Por ejemplo, el producto 485 solo tiene una configuración posible. Sin embargo, el producto 487 tiene 16 posibles configuraciones.

1	2	3	4	5
No.	código molde	talla	moldes/barra	inv. platos
1	10	6	14	9
2	10	7	14	5
3	10	8	14	12
4	10	9	13	21
5	10	10	12	26
6	10	11	9	7
7	11	6	14	2
8	11	7	14	3
9	11	8	14	6
10	11	9	13	8
11	11	10	12	5
12	11	11	9	3
13	12	6	14	9
14	12	7	14	18

Tabla 11. Moldes por barra e inventario de platos.

1	2	3	4	5
No.	código molde	talla	moldes/barra	inv. platos
15	12	8	14	20
16	12	9	13	34
17	12	10	12	20
18	12	11	9	7
19	27	7	14	5
20	27	8	14	12
21	27	9	13	20
22	27	10	12	25
23	27	11	9	10
24	25	7	14	3
25	25	8	14	7
26	25	9	13	23
27	25	10	12	16
28	25	11	9	5

Tabla 12. Moldes por barra e inventario de platos.

1	2	3	4	5	6	7
No.	referencia	código molde	No.	Coagulante	capa1	capa 2
1	485	12	1	730001	730093	730094
2	487	10	1	730001	730009	
3	487	10	2	730001	730008	
4	487	10	3	730001	730023	
5	487	10	4	730001	730010	
6	490	12	1	730001	730009	730009
7	490	12	2	730001	730009	730008
8	490	12	3	730001	730009	730023
9	490	12	4	730001	730009	730010
10	490	12	5	730001	730008	730009
11	490	12	6	730001	730008	730008
12	490	12	7	730001	730008	730023
13	490	12	8	730001	730008	730010
14	490	12	9	730001	730023	730009
15	490	12	10	730001	730023	730008
16	490	12	11	730001	730023	730023
17	490	12	12	730001	730023	730010

Tabla 13. Configuraciones posibles de las mezclas.

1	2	3	4	5	6	7
No.	referencia	código molde	No.	Coagulante	capa1	capa 2
18	490	12	13	730001	730010	730009
19	490	12	14	730001	730010	730008
20	490	12	15	730001	730010	730023
21	490	12	16	730001	730010	730010
22	491	12	1	730001	730009	730013
23	491	12	2	730001	730023	730013
24	491	12	3	730001	730010	730013
25	492	27	1	730001	730009	730013
26	492	27	2	730001	730023	730013
27	492	27	3	730001	730010	730013
28	495	12	1	730001	730011	730018
29	495	12	2	730001	730016	730018
30	495	12	3	730001	730018	730018
31	497	12	1	730001	730011	730013
32	497	12	2	730001	730016	730013
33	497	12	3	730001	730018	730013

Tabla 14. Configuraciones posibles de las mezclas.

Después de algunas pruebas preliminares, se escogieron los parámetros mostrados en la tabla 15.

$T_0 = 90$	$T_f = 10$	$S = 0.94$	$n = 6$	$\alpha = 0.5$
------------	------------	------------	---------	----------------

Tabla 15. Parámetros para las corridas

Se llevaron a cabo 100 corridas y los resultados promedio se muestran en la figura 2, en donde se puede apreciar que el algoritmo es consistente y tiende a estabilizarse.

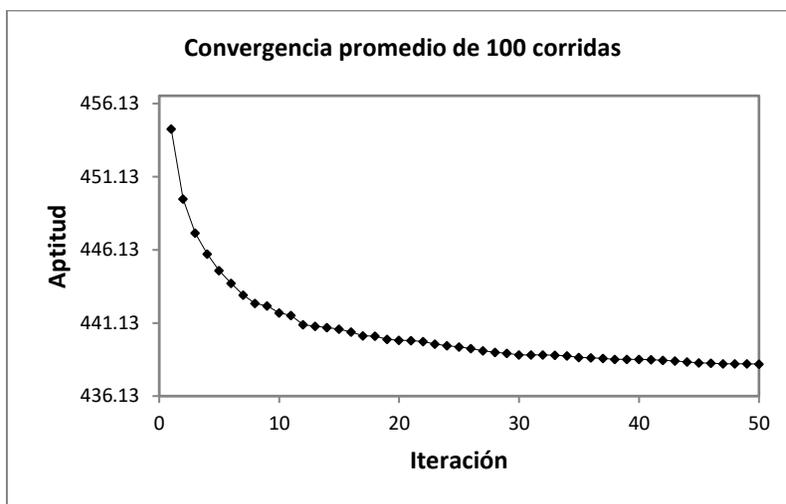


Figura 2. Resultados promedio

Todas las soluciones son factibles, es decir, se respetan las restricciones duras: no se excede el inventario de platos de cada talla, no se exceden los 31 lugares del transportador, no hay traslapes en los ciclos, se satisface la cantidad programada a procesar de cada producto y se respeta la configuración de mezclas de cada producto incluido en cada gen.

En la solución completa que se incluye en las tablas 17 – 19, se puede leer, en el último evento (tabla 19), que el número total de ciclos es de 435 (columna 19). Las soluciones al azar que corresponden a la iteración 1 de cada corrida requieren cerca de 470 ciclos. Esto implica una mejora de 7.5% en cuanto al uso de las instalaciones. Por otro lado, al conocer de antemano las necesidades de cada mezcla en cuanto a volumen y momento, se evita el desperdicio por excedentes o la insatisfacción de los clientes por atraso en las entregas.

Las configuraciones de mezclas de la mejor solución se muestran en la tabla 16.

No. de gen	Coagulante	Capa 1	Capa 2	cpv
1	730001	730023	730008	607
2	730001	730010	730013	14631
3	730001	730018	730013	248
4	730001	730009		18
5	730001	730018	730018	912
6	730001	730093	730094	2471

Tabla 16. Configuración de mezclas de cada gen.

Consultando la tabla 16 para el gen 1 (renglón 1), se sabe la configuración de mezclas que se requiere y en la tabla 17 (columna 13) se observa que el gen 1 abarca del evento 1 al evento 12. Lo mismo puede leerse respecto a los demás genes. Esto permite planear los volúmenes de cada ingrediente y conocer el momento en que se van a requerir.

Demanda					Programación										Variación		Moldes por barra	Platos en inventario	Clave del molde	ciclo mayor
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No. gen	pares	%						
						Total	de	a	Total	de	a									
1	490	11	5328	5754	5670	7	1	7	18	1	18	1	84	1.48	9	7	12	18		
2	490	9	4248	4587	4680	4	8	11	3	1	3	1	-93	-1.99	13	34	12	18		
3	490	9				4	12	15	3	1	3	1						18		
4	490	9				3	16	18	3	1	3	1						18		
5	490	9				3	19	21	3	1	3	1						18		
6	490	9				10	22	31	3	1	3	1						18		
7	490	10	2160	2332	2280	16	8	23	2	4	5	1	52	2.28	12	20	12	18		
8	490	10				3	24	26	2	4	5	1						18		
9	491	6	1350	1457	1470	3	27	29	3	19	21	2	-13	-0.88	14	9	12	21		
10	491	6				4	1	4	3	19	21	2						21		
11	492	8	73964	79881	79800	10	5	14	95	19	113	2	81	0.10	14	12	27	113		
12	492	8				1	15	15	95	19	113	2						113		
13	492	8				1	16	16	95	19	113	2						113		
14	492	9	135884	146754	145600	2	17	18	112	19	130	2	1154	0.79	13	20	27	130		
15	492	9				1	19	19	112	19	130	2						130		
16	492	9				4	20	23	112	19	130	2						130		
17	492	9				3	24	26	112	19	130	2						130		
18	492	9				2	30	31	112	19	130	2						130		
19	492	9				2	1	2	112	22	133	2						133		
20	492	9				1	3	3	112	22	133	2						133		
21	492	9				1	4	4	112	22	133	2						133		
22	492	9				2	27	28	112	22	133	2						133		
23	492	9				1	29	29	112	22	133	2						133		
24	492	9				1	5	5	112	114	225	2						225		
25	492	7	55092	59499	59150	2	6	7	169	114	282	2	349	0.59	14	5	27	282		
26	492	7				2	8	9	169	114	282	2						282		
27	492	7				1	10	10	169	114	282	2						282		
28	492	11	4704	5080	4950	2	11	12	11	114	124	2	130	2.63	9	10	27	282		
29	492	11				4	13	16	11	114	124	2						282		
30	492	11				3	11	13	11	125	135	2						282		
31	492	11				1	14	14	11	125	135	2						282		
32	491	9	20150	21761	21450	2	15	16	10	125	134	2	311	1.45	13	34	12	282		
33	491	9				7	17	23	10	131	140	2						282		
34	491	9				1	24	24	10	131	140	2						282		
35	491	9				2	25	26	10	131	140	2						282		
36	491	9				1	30	30	10	131	140	2						282		
37	491	9				1	31	31	10	131	140	2						282		
38	491	9				4	1	4	10	134	143	2						282		
39	491	9				2	27	28	10	134	143	2						282		
40	491	9				1	29	29	10	134	143	2						282		
41	491	9				1	15	15	10	135	144	2						282		
42	491	9				1	16	16	10	135	144	2						282		
43	491	9				2	11	12	10	136	145	2						282		
44	491	9				1	13	13	10	136	145	2						282		
45	491	9				1	14	14	10	136	145	2						282		
46	491	9				2	17	18	10	141	150	2						282		
47	491	9				2	19	20	10	141	150	2						282		
48	491	9				1	21	21	10	141	150	2						282		
49	491	9				1	22	22	10	141	150	2						282		
50	492	10	146360	158068	157500	2	23	24	105	141	245	2	568	0.36	12	25	27	282		
51	492	10				2	25	26	105	141	245	2						282		
52	492	10				2	30	31	105	141	245	2						282		
53	492	10				2	1	2	105	144	248	2						282		
54	492	10				1	3	3	105	144	248	2						282		
55	492	10				1	4	4	105	144	248	2						282		
56	492	10				3	27	29	105	144	248	2						282		

Tabla 17. Solución completa (continúa)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Demanda					Programación								Variación		Moldes	Platos	Clave	ciclo
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No.	pares	%	por barra	en inventario	del molde	mayor
						Total	de	a	Total	de	a	gen						
57	492	10				2	15	16	105	145	249	2						282
58	492	10				1	11	11	105	146	250	2						282
59	492	10				1	12	12	105	146	250	2						282
60	492	10				2	13	14	105	146	250	2						282
61	492	10				2	17	18	105	151	255	2						282
62	492	10				2	19	20	105	151	255	2						282
63	492	10				1	21	21	105	151	255	2						282
64	492	10				1	22	22	105	151	255	2						282
65	491	8	7450	8045	7980	1	5	5	6	226	231	2	65	0.81	14	20	12	282
66	491	8				1	5	5	6	232	237	2						282
67	491	8				1	5	5	6	238	243	2						282
68	491	8				1	5	5	6	244	249	2						282
69	491	8				1	23	23	6	246	251	2						282
70	491	8				2	24	25	6	246	251	2						282
71	491	8				1	26	26	6	246	251	2						282
72	491	8				2	30	31	6	246	251	2						282
73	491	8				2	1	2	6	249	254	2						282
74	491	8				2	3	4	6	249	254	2						282
75	491	8				2	27	28	6	249	254	2						282
76	491	8				1	29	29	6	249	254	2						282
77	491	8				1	5	5	6	250	255	2						282
78	491	8				1	15	15	6	250	255	2						282
79	491	7	650	701	700	1	16	16	1	250	250	2	1	0.14	14	18	12	282
80	491	7				2	11	12	1	251	251	2						282
81	491	7				2	13	14	1	251	251	2						282
82	491	7				1	16	16	1	251	251	2						282
83	491	7				1	11	11	1	252	252	2						282
84	491	7				3	12	14	1	252	252	2						282
85	497	10	3900	4211	4320	1	16	16	4	283	286	3	-109	-2.52	12	20	12	286
86	497	10				6	1	6	4	283	286	3						286
87	497	10				9	7	15	4	283	286	3						286
88	497	10				1	17	17	4	283	286	3						286
89	497	10				1	18	18	4	283	286	3						286
90	497	9	3700	3995	4030	4	19	22	2	283	284	3	-35	-0.87	13	34	12	286
91	497	9				9	23	31	2	283	284	3						286
92	497	9				3	19	21	2	285	286	3						286
93	497	9				7	22	28	2	285	286	3						286
94	497	9				2	29	30	2	285	286	3						286
95	497	9				1	31	31	2	285	286	3						286
96	497	9				2	1	2	2	287	288	3						288
97	497	9				2	3	4	2	287	288	3						288
98	497	9				1	5	5	2	287	288	3						288
99	497	8	4900	5291	5320	10	6	15	4	287	290	3	-29	-0.55	14	20	12	290
100	497	8				1	16	16	4	287	290	3						290
101	497	8				5	17	21	4	287	290	3						290
102	497	8				3	22	24	4	287	290	3						290
103	497	7	1000	1079	1050	3	25	27	1	287	287	3	29	2.76	14	18	12	290
104	497	7				4	28	31	1	287	287	3						290
105	497	7				1	25	25	1	288	288	3						290
106	497	7				1	26	26	1	288	288	3						290
107	497	7				2	27	28	1	288	288	3						290
108	497	7				1	29	29	1	288	288	3						290
109	497	7				1	30	30	1	288	288	3						290
110	497	7				1	31	31	1	288	288	3						290
111	497	7				1	1	1	1	289	289	3						290
112	487	6	5900	6371	6300	3	2	4	10	291	300	4	71	1.13	14	9	10	300
113	487	6				1	1	1	10	291	300	4						300
114	487	6				4	5	8	10	291	300	4						300
115	487	6				1	9	9	10	291	300	4						300
116	487	11	3744	4043	3780	3	10	12	12	291	302	4	263	6.96	9	7	10	302
117	487	11				2	13	14	12	291	302	4						302
118	487	11				1	15	15	12	291	302	4						302
119	487	11				1	16	16	12	291	302	4						302
120	495	7	4600	4967	5040	2	17	18	4	303	306	5	-73	-1.45	14	18	12	306
121	495	7				1	1	1	4	303	306	5						306
122	495	7				9	2	10	4	303	306	5						306
123	495	7				4	11	14	4	303	306	5						306
124	495	7				1	15	15	4	303	306	5						306
125	495	7				1	16	16	4	303	306	5						306
126	495	6	12300	13283	13230	7	19	25	21	303	323	5	53	0.40	14	9	12	323

Tabla 18. Solución completa (continúa)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Demanda					Programación								Variación		Moldes	Platos	Clave	ciclo
Evento	Tipo	Talla	Pedido	Solicitado	Producir	Platos			Ciclos			No.	pares	%	por barra	en inventario	del molde	mayor
						Total	de	a	Total	de	a	gen						
127	495	6				2	26	27	21	303	323	5						323
128	495	10	1100	1187	1200	3	28	30	1	303	303	5	-13	-1.08	12	20	12	323
129	495	10				1	31	31	1	303	303	5						323
130	495	10				1	28	28	1	304	304	5						323
131	495	10				1	29	29	1	304	304	5						323
132	495	10				1	30	30	1	304	304	5						323
133	495	10				1	31	31	1	304	304	5						323
134	495	10				1	28	28	1	305	305	5						323
135	495	10				1	29	29	1	305	305	5						323
136	495	10				1	30	30	1	305	305	5						323
137	495	10				1	31	31	1	305	305	5						323
138	495	10				1	28	28	1	306	306	5						323
139	495	10				1	29	29	1	306	306	5						323
140	495	10				1	30	30	1	306	306	5						323
141	495	10				1	31	31	1	306	306	5						323
142	495	10				2	1	2	1	307	307	5						323
143	495	10				1	3	3	1	307	307	5						323
144	495	10				1	4	4	1	307	307	5						323
145	495	8	4900	5291	5320	3	5	7	4	307	310	5	-29	-0.55	14	20	12	323
146	495	8				9	8	16	4	307	310	5						323
147	495	8				2	17	18	4	307	310	5						323
148	495	8				2	28	29	4	307	310	5						323
149	495	8				1	30	30	4	307	310	5						323
150	495	8				1	31	31	4	307	310	5						323
151	495	8				1	1	1	4	308	311	5						323
152	485	9	114696	123871	123760	1	2	2	56	324	379	6	111	8.97	13	34	12	379
153	485	9				1	1	1	56	324	379	6						379
154	485	9				20	3	22	56	324	379	6						379
155	485	9				9	23	31	56	324	379	6						379
156	485	9				3	1	3	56	380	435	6						435
157	485	11	15768	17029	17010	5	4	8	54	380	433	6	19	0.11	9	7	12	435
158	485	11				2	9	10	54	380	433	6						435
159	485	10	48960	52876	52800	4	11	14	44	380	423	6	76	0.14	12	20	12	435
160	485	10				6	15	20	44	380	423	6						435
161	485	10				6	21	26	44	380	423	6						435
162	485	10				1	27	27	44	380	423	6						435
163	485	10				2	28	29	44	380	423	6						435
164	485	10				1	30	30	44	380	423	6						435
165	485	7	4536	4898	4760	1	31	31	4	380	383	6	138	2.90	14	18	12	435
166	485	7				1	31	31	4	384	387	6						435
167	485	7				1	31	31	4	388	391	6						435
168	485	7				1	31	31	4	392	395	6						435
169	485	7				1	31	31	4	396	399	6						435
170	485	7				1	31	31	4	400	403	6						435
171	485	7				1	31	31	4	404	407	6						435
172	485	7				1	31	31	4	408	411	6						435
173	485	7				1	31	31	4	412	415	6						435
174	485	7				1	31	31	4	416	419	6						435
175	485	7				1	31	31	4	420	423	6						435
176	485	7				4	11	14	4	424	427	6						435
177	485	7				1	15	15	4	424	427	6						435
178	485	7				1	16	16	4	424	427	6						435
179	485	6	6696	7231	6930	1	17	17	11	424	434	6	301	4.34	14	9	12	435
180	485	6				1	18	18	11	424	434	6						435
181	485	6				4	19	22	11	424	434	6						435
182	485	6				2	23	24	11	424	434	6						435
183	485	6				1	25	25	11	424	434	6						435
184	485	8	5760	6220	6300	1	26	26	5	424	428	6	-80	-1.27	14	20	12	435
185	485	8				4	27	30	5	424	428	6						435
186	485	8				1	31	31	5	424	428	6						435
187	485	8				4	11	14	5	428	432	6						435
188	485	8				1	15	15	5	428	432	6						435
189	485	8				1	16	16	5	428	432	6						435
190	485	8				5	26	30	5	429	433	6						435
191	485	8				1	31	31	5	429	433	6						435

Tabla 19. Solución completa (termina)

Los eventos de la solución completa son parecidos (no iguales) a la solución obtenida con el algoritmo colonia de hormigas en Ramírez et al. (2022). Los parámetros que sí fueron iguales son el número total de ciclos, que es 435 y el número total de genes, que son 6. El número total de eventos es 191 con recocido simulado y 176 con colonia de hormigas. Esta última diferencia pudiera representar una ventaja en la solución de colonia de hormigas.

### Conclusiones

En esta investigación, se logró incrementar la productividad al reducir el número de ciclos de producción necesarios. La conveniencia del método en cuestión utiliza una simulación a la medida que permite replicar las condiciones relevantes del escenario real y por medio de RS llevar a cabo una búsqueda apropiada en un universo grande de soluciones. En la práctica, esta metodología híbrida, facilita abordar problemas complejos y realizar un análisis adecuado sin la necesidad de hacer pruebas de campo, lo cual normalmente es costoso. Asimismo, el análisis previo de posibles cambios en el escenario real, también es posible con esta técnica.

Una de las dificultades que se presentan en una investigación que utiliza esta metodología es la necesidad de modelar correctamente el caso real a fin de realizar la simulación respectiva. Otra dificultad es encontrar el diseño correcto de RS a las particularidades del caso. Sin embargo, una vez que se ha abordado esta clase de problemas, es posible replicarlo en escenarios similares llevando a cabo las adecuaciones necesarias.

Finalmente, como trabajo futuro, se piensa aplicar un algoritmo genético (AG) a este mismo caso para comparar el desempeño de los tres métodos: colonia de hormigas, recocido simulado y AG. Aunque ya se aplicó AG en un artículo anterior, la necesidad de volverlo a desarrollar es con el fin de hacer una comparación válida, es decir, utilizando el mismo lenguaje, el mismo CPU y la misma información.

### Referencias

- Kalaki J., Kalaki S. & Hasanzadeh R. (2021). *Parallel machines scheduling with time-dependent deterioration, using meta-heuristic algorithms*, SN Applied Sciences (2021) 3:333. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04333-w>.
- Kirkpatrick S., Gelatt C. & Vecchi M. (1983). *Optimization by Simulated Annealing*, Science 1983, **220**: 671–680. [10.1126/science.220.4598.671](https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671)
- Metropolis N., Rosenbluth A., Rosenbluth M., Teller A. & Teller E. (1953). *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*, <http://dx.doi.org/10.1063/1.1699114>
- Ramírez S., Jiménez X., López M. & Contreras K. (2009). *Aplicación de un Algoritmo Genético Simple con Reparación en un Caso Real de Planeación de Producción Discreta: Fase I*, Revista de la Ingeniería Industrial, Vol. 3 no. 1 AcademiaJournals.com.
- Ramírez S., Flores J., Córdova C., Arias R., Cárdenas F. & Ramírez A. (2022). *Aplicación del algoritmo colonia de hormigas en un caso real discreto de planeación de la producción*, Revista de la Ingeniería Industrial, Vol. 16 no. 1 AcademiaJournals.com.
- Sroka B., Roston J., Podolsky M., Bozejko W., Burduk A. & Wodecki M. (2021). *Profit optimization for multi-mode repetitive construction Project*, Archives of Civil and Mechanical Engineering (2021) 21:67. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00218-2>.
- Tavakoli A. (2020). *Multi-criteria optimization of multi product assembly line using hybrid Tabu-SA algorithm*. SN Applied Sciences (2020) 2:151. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1863-8>
- Yang D., Wang X., Tiang X. & Zhang Y. (2018). *Improving monarch butterfly optimization through simulated annealing strategy*, Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-01702-y>