

## Influencia del uso de un modelo de programación difusa multiobjetivo en la productividad de la mano de obra en el proceso de cosecha de espárrago blanco

Influence of the use of a fuzzy multi-objective programming model based on the productivity of the workforce in the cropping process of white asparagus

Iván Martín Olivares Espino<sup>1\*</sup>; Edmundo Vergara Moreno<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Profesor Asociado del Dpto. de Ingeniería Industrial, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad Nacional de Trujillo, Profesor Principal de Dpto de Matemáticas, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú

\*Autor Correspondiente: [iolivares@unitru.edu.pe](mailto:iolivares@unitru.edu.pe) (I. Olivares)

---

### RESUMEN

El presente trabajo tuvo como principal objetivo determinar la influencia del uso de un modelo de programación difusa multiobjetivo en la productividad de la mano de obra en el proceso de cosecha del espárrago blanco. Para la contrastación de la hipótesis se empleó el método de diseño pre-experimental transversal, empleándose cálculos para pronosticar el volumen de espárrago proyectándose a partir del muestreo y para obtener la información se empleó la técnica de encuestas y entrevistas. Los resultados mostraron que al emplear un modelo de programación difusa multiobjetivo se puede lograr incrementar la productividad de la mano de obra. La relación obtenida se obtuvo a partir de submodelos de costo, tiempo y producción, empleándose en la solución el programa de optimización de programación matemática Lingo. Con la programación propuesta, la productividad por trabajador se incrementó en promedio 25%.

**Palabras clave:** Programación difusa; productividad; cosecha de espárrago; modelo de decisión.

---

### ABSTRACT

This research was done to determine the influence of a fuzzy multi-objective optimization model in cropping productivity of white asparagus. For hypothesis constraint we employed a transversal pre-experimental design method using models in order to search asparagus amount (projecting by samples), and for getting the information we used surveys and interviews. The results showed that by using a fuzzy multi-objective optimization model it is possible to increase the productivity level of workers. The achieved model was obtained through submodels of cost, time and production used for getting solutions of the optimizer mathematical software Lingo. As a result, the worker's production was increased on average by 25%.

**Keywords:** Fuzzy programming; productivity; asparagus crop; decision model.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, y sobre todo en la parte norte y sur ha incrementado la producción de espárrago sembrado para exportación, constituyéndose en producto bandera de nuestro país.

Por otro lado, el Perú es uno de los dos países en el mundo que logran producir espárrago durante todo el año y es el tercer país con mayor rendimiento por hectárea en producción de espárragos del mundo con 11,4 toneladas por hectárea, detrás de Irán (22,9 por toneladas) y Polonia (15,1 toneladas), según la Organización para la Alimentación y la Agricultura (2005).

En la actualidad en el valle Virú se destinan miles de hectáreas al cultivo de espárrago blanco las cuales deben de cumplir con estrictas características de calidad siendo una de las etapas del proceso menos desarrollada técnicamente la cosecha, debido a que no se cuenta con métodos formales para su realización y programación que deben de seguir los trabajadores a asignar por hectárea y campo a cosechar y el óptimo

recorrido que deben seguir considerando que una mayor cantidad de trabajadores por hectárea incrementa proporcionalmente el costo de producto cosechado.

Según el informe del área de desarrollo de Agrobanco (2007), la cosecha del espárrago constituye el 19% de los costos de mantenimiento, lo que significa uno de los costos importantes a controlar.

El mundo de cambios y exigencias que ha generado la globalización, genera retos en los seres humanos, ya que debemos mejorar y cambiar para adaptarnos con éxito a un mundo que se transforma (Gutiérrez, 2010).

El empleo de un modelo de programación difusa multiobjetivo permitirá incrementar la productividad de la cosecha de espárrago blanco considerando que el problema real puede considerarse dentro de un modelo de optimización multiobjetivo que incluye el costo, calidad y rentabilidad del trabajador (Hillier y Lieberman, 2010).

En condiciones reales la toma de decisiones es imprecisa debido, al menos en parte, a la incertidumbre que rodea a tales situaciones. Es así como, si tenemos la intención de hacer modelos matemáticos razonablemente adecuados al mundo real, se debe ser capaz de introducir la incertidumbre en dichos modelos y sugerir medios para el procesamiento de la información imprecisa. En la industria, por ejemplo, la imprecisión y la incertidumbre están presentes en la información referida a los tiempos de flujo, mano de obra el rendimiento de los materiales, los tiempos de suministros y así sucesivamente; estos datos fáciles de definir e involucrar en un modelo con medidas absolutas, son siempre imprecisos debido en parte a la información incompleta y a la incertidumbre que pueden generar factores internos y externos. Por lo tanto, se hace atractivo resolver este tipo de problemas mediante la aplicación de la teoría de conjuntos difusos (Arango, 2010)

En cuanto a los métodos difusos tiene la característica de representar variables no determinísticas, tal es el caso del volumen de espárrago a cosechar, cada día tiene un valor incierto, lo que complica e imposibilita el uso de cualquier otro modelo convencional para la programación de la mano de obra y determinación del recorrido de estos (Arikan y Gungor, 2001)

Como antecedentes se tienen los trabajos de Zadeh (1965), el cual desarrolló la teoría difusa y tiene aplicación en campos como: investigación de operaciones, ciencias administrativas, sistemas inteligentes/expertos, teoría de control, estadística, etc.

La teoría difusa no constituye una serie de funciones complicadísimas, sino más bien, nos brinda una mejor manera de comunicarnos con el exterior, siendo esto además una nueva concepción manejada en la investigación de operaciones (Ramadan, 1997).

Para resolver problemas de optimización multiobjetivo que involucran información imprecisa, se requiere tener herramientas que permitan evaluar distintos escenarios, alejándose de teoría clásicas de probabilidades y la de los valores determinísticos, para asegurar la aplicabilidad del modelo y por ende la pertinencia de los resultados alcanzados (Lee, 1999)

Es posible llegar a un modelo de programación lineal más robusto y flexible utilizando la teoría difusa como complemento, ya que es posible incorporar el factor incertidumbre y los resultados obtenidos con la programación difusa tiene mayor aplicabilidad en contextos reales (Hillier y Lieberman, 2010)

Actualmente la programación de personal para la cosecha, se hace en base de las costumbres adoptadas por las diferentes empresas, sin usar ninguna herramienta de apoyo a esta difícil decisión (Heizer y Render, 2014).

Desde tiempos de Frederick Taylor, una de las preocupaciones que abordaban en las organizaciones además de la selección de personal, planeación y estudio de tiempos y movimientos, fue la programación de las actividades, teniéndose como objetivo incrementar la productividad.

La mejora de la productividad puede lograrse de dos formas: una reducción en la entrada mientras la salida permanece constante, o bien, el incremento en la salida mientras la entrada permanece constante. Ambas formas representan una mejora en la productividad. En el sentido económico, las entradas son mano de obra, capital y administración, integrados en un sistema de producción (Heizer y Render, 2014).

La medición de la eficiencia se basa en la idea de comparar la actuación real de la empresa con respecto a un óptimo. Según lo expuesto en el epígrafe anterior, lo lógico sería comparar lo que hace la empresa con lo que debería haber hecho para maximizar el beneficio. Sin embargo, esto no es posible dado que el investigador no tiene un conocimiento perfecto del mundo en el que se desenvuelve la empresa y no conoce con exactitud ni la tecnología, ni algunas restricciones que pueden afectar a la obtención del máximo beneficio. Por tanto, lo mejor que puede hacer el investigador es comparar lo que hace la empresa con lo que hacen otras empresas parecidas (Álvarez, 2013).

Al formular un modelo que permita, bajo ciertas condiciones iniciales, resolver el problema de cuanto personal asignar y cómo debe de realizar el patrullaje o recorrido este personal en el campo, se optimizará la solución del conflicto entre recurso y el precio por kilogramo de espárrago blanco.

Históricamente, el soporte matemático suele estar alejado de ser una alternativa para las personas que afrontan problemas de decisión en el día a día en el trabajo, y es una buena oportunidad para dar utilidad práctica al uso de un modelo matemático como soporte en la programación de actividades, que en el área de operaciones se hace uso de métodos heurísticos solamente, tomándose a los modelos de optimización como herramientas demasiado sofisticadas para afrontar este tipo de problemas.

El espárrago para su buena cotización debe de tener características de calidad como: longitud deseada, rectos, sin desarrollo excesivo de fibra, turgentes, fresco deseado, calibre aceptable, punta cerrada y brácteas incipientes, sin mostrar daños físicos, desórdenes biológicos, ataques de plagas y enfermedades.

Los factores que afectan la calidad son los problemas fitopatológicos, temperatura, siendo este un factor a controlar importante en la post cosecha, la humedad relativa y la luminosidad.

La cosecha desempeña un papel importante en el último factor de calidad mencionado, pues ella determina que los plastidios por efecto de la luz cambien de color de turión blanco a turión verde. Esta coloración empezará por la punta del turión, que es lo primero que queda expuesto a la luz, y provocará conjuntamente con altas temperaturas la apertura de yemas y por ende la disminución de la calidad y precio.

En la actualidad existe una gran competencia por el uso del recurso mano de obra en labores de campo y esto es debido a la diversificación de cultivos en el valle de Virú como: espárrago fresco, paltas, arándanos, alcachofas, etc. Como es natural, los mejores trabajadores escogen a ir a cultivos que les permita obtener mejores ingresos y sembríos como el de arándano, tiene alta rentabilidad, lo que permite a las empresas pagar mejores salarios a los trabajadores. Es por ello que es importante hacer un buen manejo en la programación de la mano de obra para la cosecha de espárrago, determinando el número de trabajadores que realmente se requiere, demasiados disminuyen la eficiencia y pocos saturan al trabajador y disminuye la calidad y por ende el precio de lo cosechado.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1 Objeto de Estudio

Espárrago blanco (*Asparagus officinalis*). Procedencia: Valle de Virú.

**Tabla 1.** Características del espárrago cosechado

Item	Características
Familia	Liliáceas
Tallo	Herbáceo muy ramoso
Hojas	Aciculares y en hacecillos
Flores	Color blanco verdoso
Fruto	Bayas rojas

### 2.2 Medios

Se han tenido como fuentes de información, reportes, estudios realizados anteriormente, entrevistas e inspección directa de las actividades realizadas en la faena de cosecha de espárrago blanco.

Para recoger la información se diseñaron y aplicaron las encuestas, entrevistas y tomas de datos en formatos varios que figuran en el anexo. Se trabajó con 2 empresas agroindustriales del valle de Virú principalmente y se aplicó encuestas a nivel de muestra al personal relacionado directamente a las labores de cosecha: desde trabajadores hasta supervisores.

### 2.3 Métodos y Técnicas

La investigación ha seguido un diseño pre-experimental transversal ya que se implementó a manera de prueba piloto, debido a que las empresas con las cuales se ha trabajado, no están en la posibilidad de cambiar la forma de trabajo de un momento a otro y además tienen que diseñar formas de cálculo para pronosticar el volumen de espárrago, es decir la proyección a partir de muestreo, que está fuera del alcance de este estudio.

Por la naturaleza de la información y del estudio, el tamaño de las muestras y para las diferentes pruebas de hipótesis se utilizó un nivel de confianza de 95% y un margen de error de 5%, considerándose:

Entrevistas con los responsables de campo de las empresas de las que se va a tomar información, para solicitar el permiso correspondiente.

Realización del muestreo en campo siguiendo las pautas planteadas cuando se propusieron los procedimientos respectivos.

Evaluación de la información levantada de campo, haciendo la clasificación respectiva para su posterior procesamiento.

Determinación de los criterios de clasificación de la información, para su posterior procesamiento.

Evaluación de las variables dependientes e independientes, para su inclusión en el modelo multiobjetivo a proponer.

Diagnóstico a partir de la observación directa, encuestas y entrevistas al personal de cosecha y supervisores para identificar los procesos y os problemas del mismo. Identificación de las variables endógenas, exógenas e independientes para el modelo usando la observación directa, tormenta de ideas, diagrama causa-efecto, hoja de recolección de datos, diagrama de Pareto, y enfoque sistémico.

Formulación del modelo, mediante técnicas de modelación simbólica.

Solución del modelo, haciendo el procesamiento en computadora con software Lingo.

Evaluación y validación, mediante pruebas estadísticas, diagrama de caracterización, tormenta de ideas, matriz de selección y diagramas de Pareto.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Diagnóstico de la situación actual

A continuación, se tienen los gráficos de lo proyectado versus lo real cosechado en los ocho campos que han estado en labor cuando se ha tomado información:

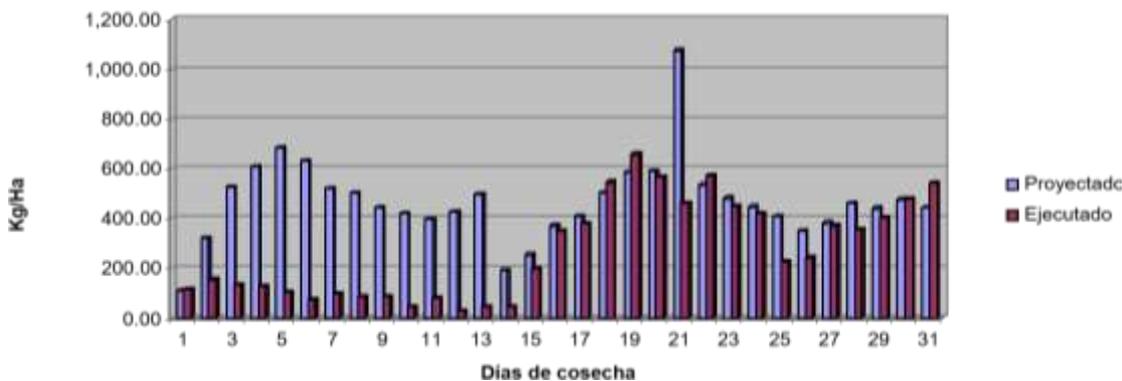


Figura 1. Cosecha de espárrago procedente del campo 13(3)-1 de acuerdo a los días del mes.

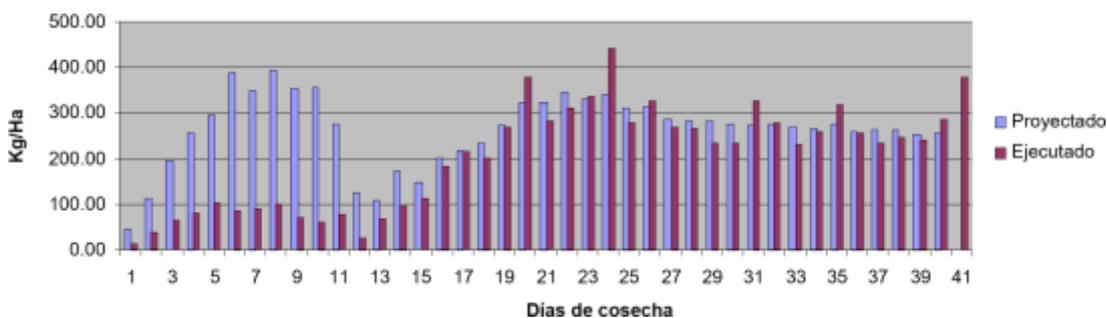


Figura 2. Cosecha de espárrago procedente del campo:13B(3)-1 de acuerdo a los días del mes.

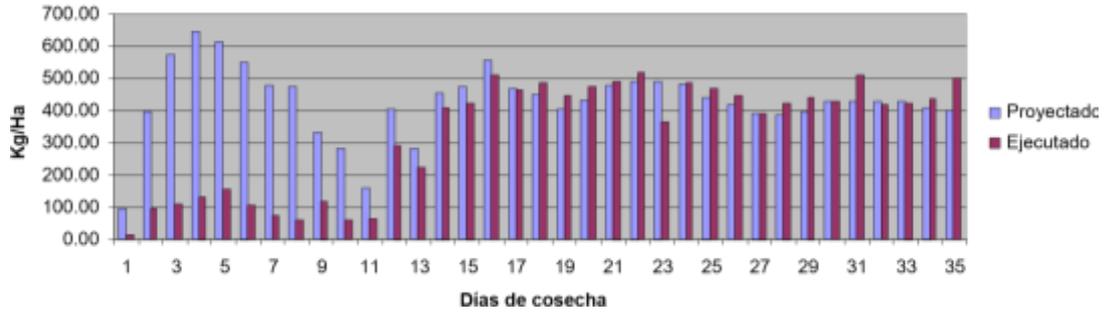


Figura 3. Cosecha de espárrago procedente del campo:15B(2)-1 de acuerdo a los días del mes.

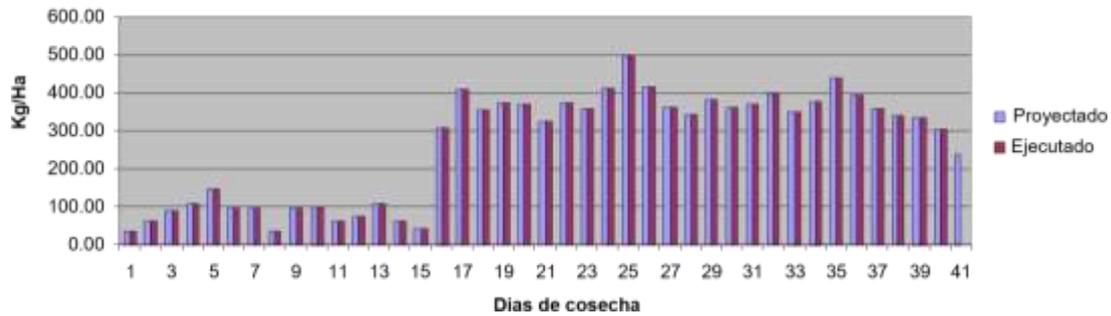


Figura 4. Cosecha de espárrago procedente del campo 14(2)-1 de acuerdo a los días del mes

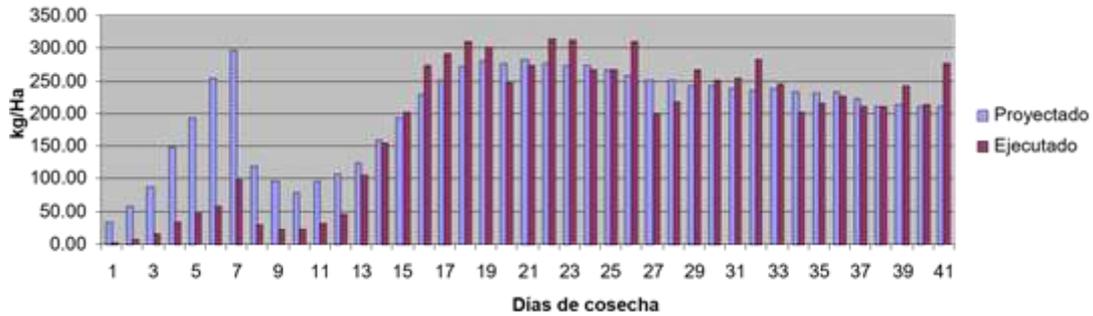


Figura 5. Cosecha de espárrago procedente del campo 16(2)-1 de acuerdo a los días del mes.

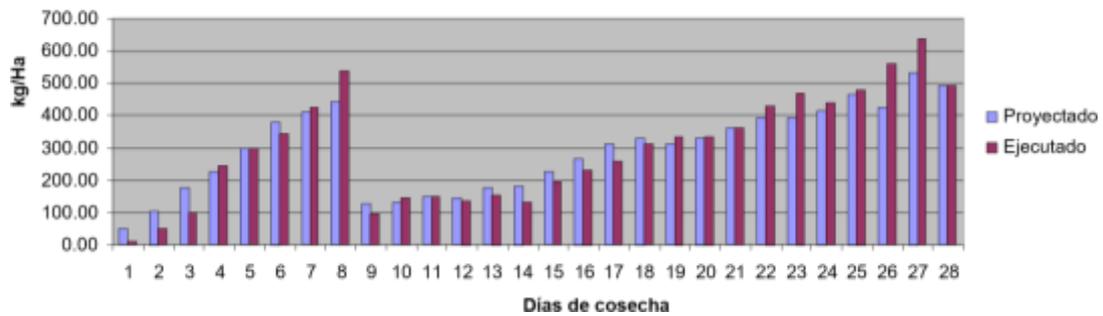


Figura 6. Cosecha de espárrago procedente del campo 20(2) de acuerdo a los días del mes

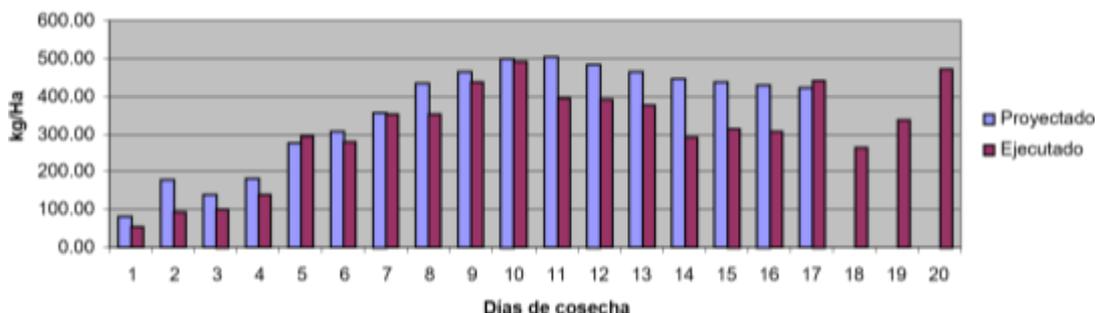


Figura 7. Cosecha de espárrago procedente del campo 21(2) de acuerdo a los días del mes

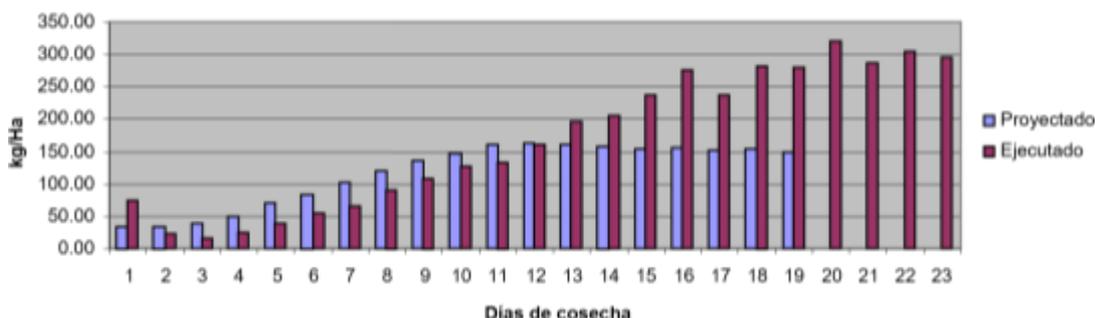


Figura 8. Cosecha de espárrago procedente del campo 22(2) de acuerdo a los días del mes

Se puede observar que en las figuras 1, 2, 3 y 5 la proyección fue demasiado alta, lo que generó baja eficiencia de la mano de obra, sin embargo, si hay menor asignación de mano de obra respecto a lo requerido, esto afecta la calidad del producto y por ende su precio, por lo que se recomienda realizar una inspección previa a la asignación de personal para la labor de cosecha a final del día y antes del inicio de la jornada de trabajo. Sin embargo, para las figuras 4, 6, 7 y 8, las proyecciones estuvieron casi a la par de lo cosechado realmente

Se evaluó la eficiencia considerada por el trabajador según una de las empresas en las que se realizó el estudio de lo cual se obtiene la siguiente tabla. Cabe destacar que esta empresa no tiene problemas laborales relevantes e inclusive es una de las pocas que no tiene sindicato.

Resumen de parámetros encontrados en campo bajo diferentes condiciones de eficiencia producción y soles al día.

Tabla 2. Eficiencia del trabajador en función a la producción diaria y el pago correspondiente.

<i>Producción kg/persona</i>	<i>Pago diario S/.</i>	<i>Eficiencia</i>
84	19,51	75
90	20,81	80
95	22,11	85
101	23,41	90
106	24,71	95
112	26,01	100
118	27,31	105
123	28,61	110
129	29,91	115
134	31,21	120
140	32,51	125
146	33,81	130

<i>Producción kg/persona</i>	<i>Pago diario S/.</i>	<i>Eficiencia</i>
151	35,11	135
157	36,41	140

Se procesó la información disponible y se llegó a que el rendimiento promedio de un trabajador durante una jornada de 8 horas es de 85 kg de espárrago blanco cosechado.

### 3.2 Análisis causa efecto:

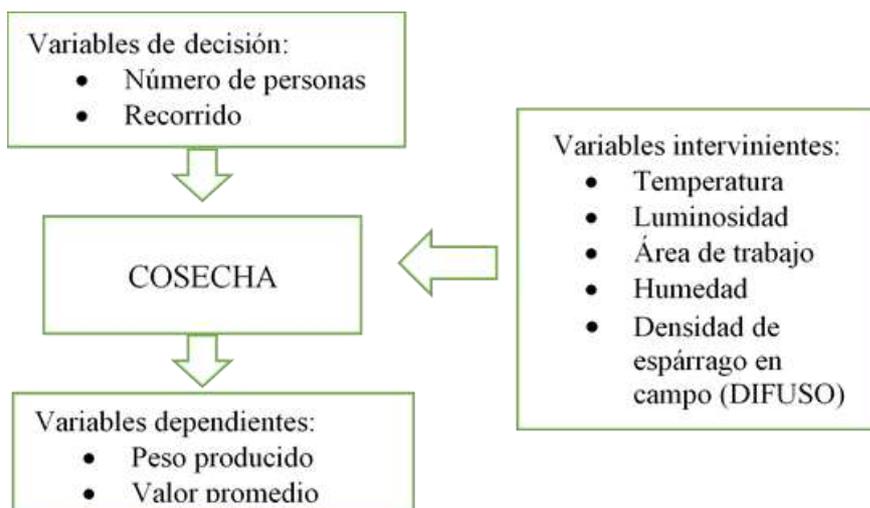


Figura 9. Interrelación de variables

### 3.3 Influencia entre variables

Tabla 3. Influencia entre variables

Variable	Cosecha	Calidad
Número de personas	3	2
Temperatura	-1	-2
Luminosidad	1	-3
Recorrido	2	1
Humedad	1	2
Densidad	3	2

Leyenda:

Influencia	Puntaje
Poca	1
Media	2
Alta	3

Diagrama causa efecto tomando como variable de interés el espárrago descartado de campo, en base a entrevistas con supervisores y obreros de campo.

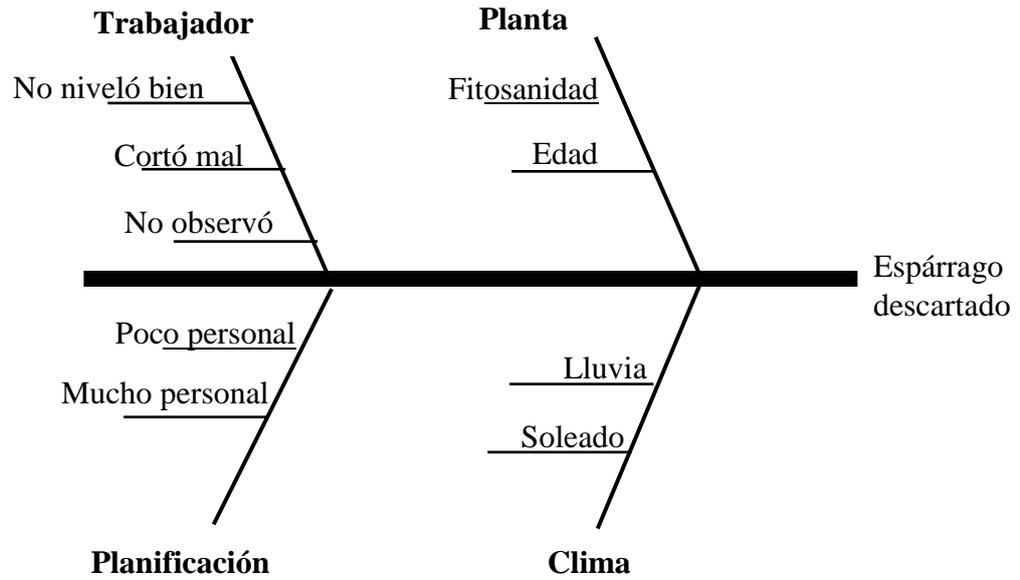


Figura 10. Diagrama de Ishikawa para determinar las causas que generan el espárrago de descarte

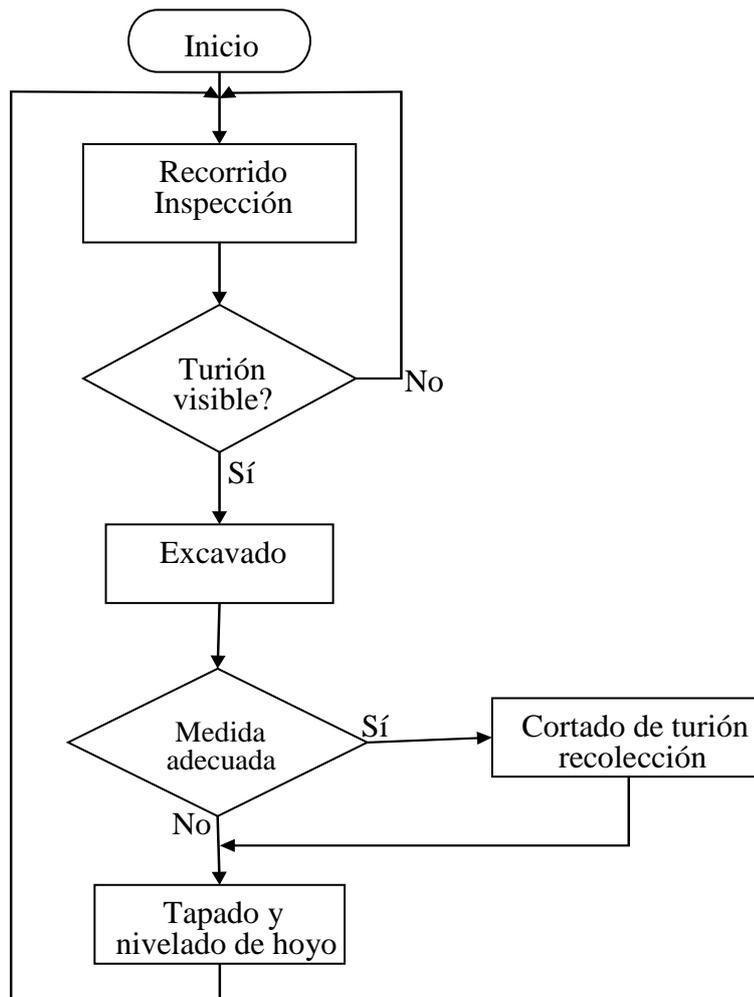


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de cosecha para formular el modelo

Solución del modelo

Se ha relacionado las variables evaluadas en las figuras 17, 18 y 19 y tablas 2 y 3 y ajustando los parámetros en el software lingo se obtuvieron las siguientes relaciones matemáticas resumidas en la tabla 4:

**Tabla 4.** Modelos matemáticos obtenidos de acuerdo a las variables

Variabes	Modelos matemáticos
Recorrido total (TR)	$TR(N \text{ trabajadores})=0,9/N$
Número promedio de turiones (TK)	$TK=1000/26,78 = 37,34 \text{ Turiones/kg}$
Tiempo empleado por cantidad de espárrago (TC)	$TC=CE/N*37,34*(10,07/(60*60))$
Tiempo por trabajador por cosecha (TT)	$TT= 0,9/N+CE/N*0,10445$
Costo de cosecha	$CE*TT/(2/3)*0,80+ 2,5*N$

El modelo se ha solucionado con el software para programación matemática Lingo y el siguiente modelo:

$$\text{Min} = PD+PE-TT;$$

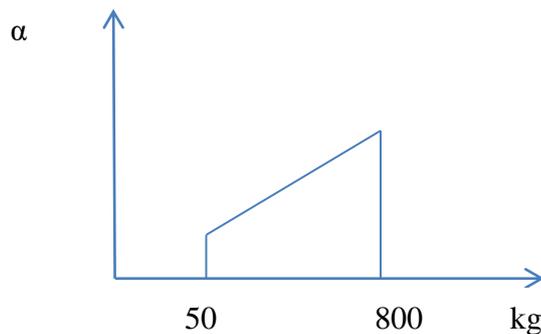
$$CE/N+PD-PE=80;$$

$$TT= 0,9/N+CE/N*0,10445;$$

$$CE*TT/(2/3)*0,80+ 2,5*N=CT;$$

$$CE=?;$$

Siendo la cantidad de espárrago en campo (CE) una variable difusa se evaluará dentro de los rangos 50 y 800 kg y del análisis del comportamiento observado y procesado de las cantidades cosechadas de espárrago blanco por hectárea, definimos la variable difusa, lo que se muestra en el siguiente gráfico:



**Figura12.** Cantidad de espárrago por hectárea día, variable difusa

**Tabla 5.** Valores de la variable difusa

	CE	$\alpha$
A	50	0
B	800	1

$$m= 1/750$$

b= -1/15

Con lo que se obtiene la siguiente relación difusa para una hora:

$$CE = 750 \alpha + 50$$

Lo que finalmente se tiene el siguiente modelo:

$$\text{Min} = PD+PE-TT;$$

$$CE/N+PD-PE=80;$$

$$TT= 0,9/N+CE/N*0,10445;$$

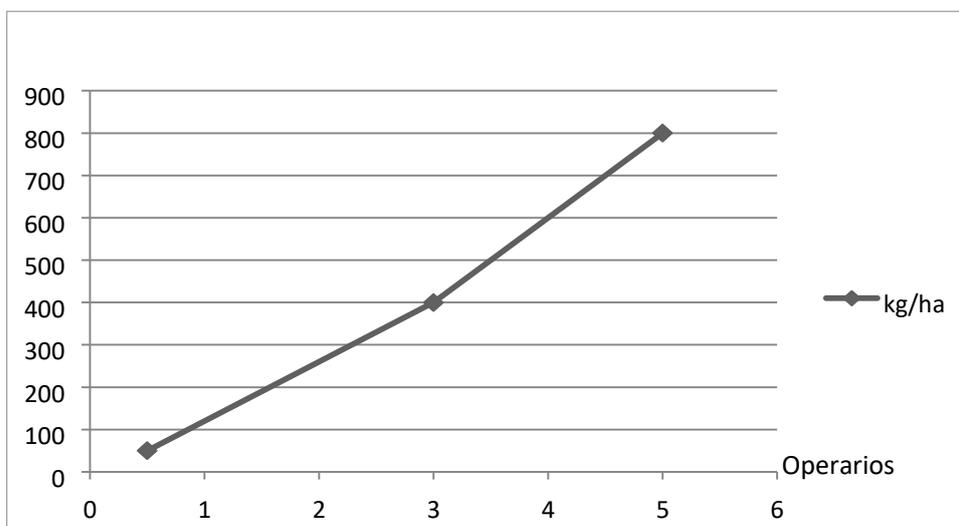
$$CE*TT/(2/3)*0,80+ 2,5*N=CT;$$

$$CE = 750 \alpha + 50;$$

La tabla resumen de los reportes alcanzados se muestran a continuación para valores extremos y el valor representativo:

**Tabla 6.** Producción por persona

□	Cantidad de espárrago	Asignado histórico	Producción histórica	Asignado con modelo	Producción actual
0	50	1	65	0,5	80
0,466	400	4	80	3	100
1	800	6	120	5	150



**Figura 13.** Kilogramos de espárrago cosechados por operario-hora

Evaluación y validación del modelo:

Se ha comparado los valores reportados con los valores típicos de los datos ya usados reportes a manera de prueba piloto, utilizando prueba de medias mediante la siguiente relación:

$$\frac{\text{Cantidad cosechada} - \text{Cantidad proyectada}}{t/\sqrt{n}}$$

Se calculó la potencia de la prueba y el resultado es  $p=0,06$  con lo que indica que no hay diferencia significativa entre medias.

Como se ha podido observar, actualmente la programación de personal para la cosecha, se hace en base de las costumbres adoptadas por las diferentes empresas, sin usar ninguna herramienta de apoyo para esta difícil decisión, por lo tanto, al formular un modelo que permita, bajo ciertas condiciones iniciales, resolver el problema de cuanto personal asignar y cómo debe de realizar el patrullaje o recorrido este personal en el campo, se optimizará la solución del conflicto entre recurso y el precio por kilogramo de espárrago blanco que en promedio en campo es de \$1,5 por kilogramo.

Si bien es cierto el trabajo inicial se proyectó a un modelo lineal, debido al comportamiento e interrelación entre variables, el modelo obtenido es una función no lineal.

Observando los resultados este comportamiento no lineal, se justifica debido a la relación inversa entre cantidad de espárragos y cantidad que cosecha cada trabajador relacionado con su productividad. Sin embargo, este efecto no es tan crítico debido a que la variable en interés, número de trabajadores, es una variable discreta. Para la cosecha de una hectárea de espárragos, la cantidad de trabajadores a asignar como mínimo es tres y como máximo es veinticinco.

Actualmente las proyecciones resultan una herramienta importante para la planificación de actividades de campo y en términos promedios de campaña por campo cosechado, las variaciones proyectado vs. cosechado realmente, fluctúa entre el 1% y 28% de variación en términos de lo proyectado, lo que realmente es términos de proyección es bastante importante para la toma de decisiones, a pesar que en un campo nuevo la variación fue de 73%, lo cual no requiere mayor relevancia metodológica ya que no se realizó pronósticos para varios días y fue un comportamiento totalmente atípico respecto a lo acontecido normalmente. En términos de días la diferencia si es significativa, llegando a diferencias del orden del 80%, sin considerar el campo atípico que se observó. En términos de frecuencia, un valor significativo fluctuaría entre 15 y 25% de diferencia.

Respecto a la aplicación del modelo, existen algunos supuestos que podrían mejorarse como es el tiempo que demora entre camillón y camillón cuando cambia de calle.

Es posible cambiar la meta de cosecha, pero para hacerlo se tendría que evaluar ya no a nivel de costo de oportunidad, si no a nivel de pérdida de un producto que ha sido cuidado desde su plantación lo que tiene costos ocultos como espacio utilizado, utilización de recursos que pudieran ser utilizados en otras posibilidades, es decir tomando en cuenta el costo de capital de la empresa.

La producción promedio de cada trabajador es de 100 kg por jornada, sin embargo, había una pérdida de calidad, con lo cual en términos de productividad significa 76 kg, vs. 85 kg alcanzados en promedio con programación propuesta.

#### **4. CONCLUSIONES**

Mediante el uso de un modelo de programación difusa multiobjetivo se puede incrementar la productividad actual en un 25% en promedio.

Se desarrolló un modelo de programación matemática con un parámetro difuso, teniendo además una meta de calidad y una meta económica que cumplir.

El modelo obtenido a partir de submodelos desarrollados se solucionó en el programa de optimización Lingo.

Se logró incrementar la producción promedio de los cosechadores de 80 a 100 kg en promedio en una jornada de 8 horas de trabajo.

Se utilizó como parámetro difuso, la cantidad de espárrago que hay para cosecha en campo, lo que permitió definir las diferentes cantidades a asignar para cada rango de valores dados.

Al establecerse la meta de calidad, se asegura un nivel mínimo a alcanzar ya que aparentemente se puede pagar menos dinero al contratar menos trabajadores, pero se perdería producto que iría al descarte.

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Álvarez P. 2013. Medición de la eficiencia y la productividad. 3ra Edición. Ediciones Pirámide. Madrid, España.

Arango M., Cerna C., Pérez G. 2010. Uso de la programación lineal paramétrica en la solución de un problema de planeación de requerimiento de materiales bajo condiciones de incertidumbre. Ingeniería e investigación, 30: 24.

- Arikan F., Z Gungor. 2001. An application of fuzzy goal programming to a multiobjective project network problem. *Fuzzy sets and systems*, 119: 49-58
- Gutiérrez P. 2010. *Calidad total y productividad*. 3ra. Edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F., México.
- Heizer J., Render B. 2014, *Principios de administración de operaciones*. 9na. Edición. Editorial Pearson. Naucalpan de Juárez, México.
- Hillier G. Lieberman F. 2010. *Introducción a la investigación de operaciones*. 9na Edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F., México.
- Lee C., Wen C. 1997. Fuzzy goal programming approach for water quality management in a river basin. *Fuzzy sets and systems* 89: 181-190.
- Ramadan H. M. 1997. The relationship between goal programming and fuzzy programming. *Fuzzy sets and systems* 89: 215-220.
- Zadeh L.A., 1965. *Fuzzy sets, information and control* 8: 338-352