

Trabajo de Diploma

TÍTULO: Programación lineal. Una herramienta en las producciones del organopónico; Las Lucias.

Tesis en opción al Título de Ingeniero Agrónomo

Autor: Amauri Díaz Pupo

Tutor: Ing. Heanny Domínguez Martínez.

Co-Tutor: Ing. Jonathan Pozo Serrano.

Año. 2022

Resumen

La investigación se desarrolló en el periodo comprendido desde mayo del 2022 hasta agosto del 2022, donde se evaluaron varios factores limitantes que inciden directamente en los rendimientos y ganancias de los cultivos *Beta vulgaris* (Acelga) y *Brassica campestris* (Col china) en el organopónico Las Lucías perteneciente a la empresa hortícola Wilfredo Peña Cabrera. El estudio plantea la elaboración de un sistema de optimización lineal que nos entregue la asignación óptima de productos con la finalidad de maximizar las ganancias en un periodo de siembra. Para lograr esto se analizarán los costos de cada producto y se considerarán diversos escenarios de rendimiento que posee cada producto a trabajar, utilizando el complemento solver de Excel.

Abstract

The research was carried out in the period from May 2022 to August 2022, where several limiting factors that directly affect the yields and profits of the *Beta vulgaris* (Chard) and *Brassica campestris* (Chinese cabbage) crops were evaluated in the Las Lucías belonging to the horticultural company Wilfredo Peña Cabrera. The study proposes the elaboration of a linear optimization system that gives us the optimal allocation of products in order to maximize profits in a sowing period. To achieve this, the costs of each product will be analyzed and various performance scenarios that each product has to work on will be considered, using the Excel solver add-on.

Pensamiento:

La primera y más respetable de las artes es la agricultura

Jean- Jacques Rousseau

Agradecimiento:

Mis sinceros agradecimientos a todos los profesores que han formado parte de mi desarrollo como estudiante principalmente a mis tutores por toda la dedicación y entrega para realizar este trabajo.

Dedicatoria:

A mi familia, amigos y seres queridos que me acompañaron durante mi proceso de formación, brindándome su apoyo incondicional en los momentos más importantes.

Índice

Introducción.....	5
1. Revisión bibliográfica.....	11
1.1 Modelo y Sistema. Conceptualización.....	11
1.2 Investigación de Operaciones.....	12
1.3 Programación Lineal.....	16
1.3.1 Metodología de la Programación Lineal aplicada a la resolución de problemas de decisiones.....	17
1.4 Modelos de optimización aplicados a los procesos agrícolas.....	19
2. Materiales y Métodos.....	31
3. Resultados e impactos esperados.....	33
4. Referencias Bibliográficas.....	43
5. Anexos.....	51

Introducción

La programación lineal, encontramos su desarrollo en el mundo desde la época de la revolución Industrial, donde la incursión de nuevos recursos de producción como las máquinas, hicieron crecer las fábricas en grandes proporciones, hasta la Segunda Guerra Mundial, en donde la necesidad de asignar recursos escasos a las distintas operaciones militares, obligaban a encontrar un mecanismo que ayudara a solucionar los problemas derivados de estos hechos. Las personas que participaron en este avance pertenecían a diferentes campos del saber, destacándose los matemáticos, economistas y científicos, (Cabrera, E. 2017).

Uno de estos últimos, George Dantzing, sobresalió en este proceso y fue quien en 1947 desarrolló el método simplex para resolver problemas de programación lineal, el cual fundamentó en el álgebra matricial y el método de Gauss Jordan⁵, complementado con un objetivo principal: maximizar utilidades o minimizar costos, (Weber, J. E. 1984)

Es indudable que la optimización de recursos es importante para una correcta inversión que corresponda en esfuerzos, tiempos y capital, que garantice la ejecución de proyectos y que estos contribuyan con objetivos estratégicos (Blanco, et al; 2017). En este contexto, la investigación de operaciones constituye un área de las ciencias económicas, administrativas, contables y financieras muy importante para la toma de decisiones; así como la aplicación de modelos matemáticos, los cuales son necesarios para solucionar problemas de asignación de recursos, sobre todo cuando estos factores son escasos (De la Hoz, et al, 2017).

Actualmente en los terrenos agrícolas se deben definir los tipos de productos a trabajar y la cantidad respectiva para lograr un máximo aprovechamiento. Todos los años la agricultura se enfrenta a diferentes problemas ya sean de origen natural, o económico, político y social. Esto obliga a revisar los procedimientos que se aplican en las labores, con la finalidad de optimizar los procesos. (Hidalgo, B. 2019)

Múltiples pueden ser las razones que impiden a la agricultura comercial realizar las innovaciones necesarias para elevar su productividad y lograr una vinculación

más exitosa con los mercados regionales, nacionales y eventualmente con los mercados internacionales. Entre ellas la literatura ha destacado dos; la falta de acceso al mercado de capitales para financiar las inversiones requeridas y la incapacidad de asegurarse frente a shocks lo que lleva a que productores con aversión al riesgo no estén dispuestos a invertir en opciones más rentables que típicamente conllevan mayor incertidumbre. (Fafchamps y Pender, 1997)

El cambio climático ha impactado de manera negativa al sector agropecuario en los últimos años, causando una reducción considerable de la producción de alimentos debido a afectaciones en el medio ambiente (Altieri y Nicholls 2009; Nelson *et al*; 2009). Las variaciones no deseadas en los parámetros ambientales pueden impactar negativamente la seguridad alimentaria, las inversiones, la localización de los cultivos y actividades productivas (Castillo *et al*; 2020).

En los últimos años, Panamá y otros países de la región Latinoamericana como Costa Rica, Nicaragua, Honduras y El Salvador, han presentado índices de producción y cosecha cada vez más bajos debido a problemas climáticos y el mal uso de recursos naturales, a pesar de que gran parte de sus territorios cuentan con características ambientales, hídricas y de suelo apropiadas para la producción agrícola (Collado, *et al*, 2018). Por ello, se ha impulsado el desarrollo de herramientas tecnológicas que ayuden a reducir los efectos del cambio climático, mejorar producción de alimentos y reducir los costos de insumos y mano de obra y a una mejor toma de decisiones (Castillo *et al*; 2020).

Ya que el suelo representa un recurso natural crucial para un sistema de cultivo al proporcionar el ecosistema necesario para la producción de alimentos saludables, se han hecho esfuerzos para adoptar medidas de adaptación al manejo de tierras agrícolas y así apoyar al agricultor a sacarle el mejor provecho a sus recursos e inversiones. Por ejemplo, los autores en (H. Setälä, R, *et al*, 2014) proponen un mecanismo para cuantificar el uso desproporcionado del suelo con el objetivo de ayudar a los encargados de formular políticas a optimizar las decisiones de gestión cuando se enfrentan a demandas de múltiples servicios bajo disponibilidad limitada de la tierra.

En (A. S. Panda y S. Nath. 2012) los autores desarrollan un modelo basado en

optimización lineal para la asignación óptima de recursos de tierra y agua con el fin de maximizar los retornos anuales netos de un área ubicada en el estado de Haryana de India. Los autores en (T. Klein, A. *et al*, 2013) estudian un enfoque basado en optimización multiobjetivo para gestionar eficientemente las tierras agrícolas, mientras se reduce efectos de cambio climático.

La programación lineal en Cuba ha permitido calcular planes óptimos a partir del concepto del mejor uso de los factores de producción. La adecuada gestión de los sistemas de riego se viene reconociendo cada día como un medio indispensable para conseguir el éxito de la agricultura. En los últimos años, ha habido un interés por estudiar los sistemas de riego existentes con el propósito de identificar qué mejoras se pueden aplicar en lo que respecta a su operación y mantenimiento, (Suárez, F. 2015)

Los principios institucionales y técnicos que rigen la gestión de los sistemas de riego parten de una adecuada gestión del agua, lo cual permite elevar la productividad de la tierra y con ello asegurar una elevada producción tanto para el consumo directo de la población como para el comercio, favoreciendo así la producción de los excedentes económicos necesarios para elevar las economías (Díaz 2018).

En Cuba los recursos hídricos disponibles anuales per cápita son limitados y están heterogéneamente distribuidos, siendo las provincias habaneras y las orientales, con excepción de Granma, las menos favorecidas. La media nacional de 1220 m³/hab./año sitúa al país en la categoría de países con elevada intensidad en la presión sobre sus recursos hídricos, con situación de escasez y donde el ritmo de utilización supera la renovación natural del recurso (Díaz 2018).

Mejorar los indicadores de sostenibilidad sobre el uso y manejo de los recursos hídricos en Cuba, será uno de los desafíos que enfrenta y tendrá el país en los siguientes años a través de una mejor gestión de las aguas, sobre todo en los sistemas de riego donde los niveles de eficiencias alcanzados son bajos (Díaz 2018).

Problemas como la baja eficiencia de conducción, distribución y aplicación del agua de riego, el uso de volúmenes de agua excesivos para el riego de cultivos, e ingresos insuficientes para operación y mantenimiento de los sistemas de riego, se presentan como algunos de los inconvenientes en la gestión deficiente del riego en el país (Díaz 2018).

La combinación de los factores naturales y antrópicos que inciden en los recursos hídricos de Cuba, así como el agravamiento de sus impactos como consecuencia del cambio climático, ponen de manifiesto que el agua es un indicador determinante en el modelo cubano de sostenibilidad, para garantizar su desarrollo, así como su seguridad ambiental y alimentaria, lo que sólo será posible mediante la gestión sostenible de sus recursos hídricos, sobre la base de la eficiencia, el ahorro y su protección (Díaz 2018).

El balance de agua en la agricultura constituye un indicador de peso en la economía cubana, en este contexto, se propone la metodología de optimización lineal para la gestión eficiente del agua de riego en Empresas agropecuarias cubanas sobre la base de herramientas científicas empleadas a nivel. Las tendencias recientes en la planificación del uso de la tierra han creado la necesidad de desarrollar diferentes tipos de algoritmos; se propone la herramienta tecnológica basada en optimización para planificar el uso adecuado del suelo disponible, mientras se maximiza la ganancia del sistema de producción de alimentos en la programación lineal (Boyd *et al*, 2004), considerando variables importantes como los costos de producción por productos, tiempos de siembras y cosecha de cada producto, capital inicial de inversión y cantidad de veces que se siembran en un año (Castillo *et al*; 2020).

La programación lineal es una herramienta importante para asignar las actividades en los sistemas productivos, uso y combinación de recursos entre las distintas opciones existentes para cumplir con un objetivo de optimización (Moya, 1998). Los sistemas productivos pueden ser representados por un modelo matemático, el cual permite conocer algunas soluciones en los procesos de asignación, que optimizan (maximizan o minimizan) el funcionamiento del sistema (Gascón . J, 2002)

La teoría de programación lineal se ha desarrollado para simplificar la búsqueda de soluciones óptimas entre las diversas alternativas de producción, considerando el uso eficiente de los recursos. En los problemas del rubro agrícola, se puede aplicar para determinar la asignación óptima de cultivos según ciertos recursos disponibles (Moya , 1998).

El método de programación lineal es una planificación muy útil para tomar decisiones que requieren una elección entre un gran número de alternativas. La importancia de su aplicación radica en su fortaleza para modelar problemas complejos y la posibilidad que tienen los usuarios para resolver modelos de gran escala mediante programas de cómputo sustentados en el procedimiento de resolución simplex. No obstante, lo más importante es el análisis post-óptimo, el cual nos permite hacer cambios en el modelo original con la finalidad de encontrar un valor óptimo aún mejor o conocer los resultados que se daría si se cambia el plan de producción antes de ejecutar el proyecto representado en el modelo (Alvarado, B, J. 2009).

Esta técnica posee diversas aplicaciones en la agricultura y ha permitido estudiar diversos escenarios antes de llevarlos a la realidad. El estudio plantea la elaboración de un sistema de optimización lineal que nos entregue la asignación óptima de productos con la finalidad de maximizar las ganancias en un periodo de siembra. Para lograr esto se analizarán los costos de cada producto y se considerarán diversos escenarios de rendimiento que posee cada producto a trabajar, (González, A, 2003).

En el organopónico Las Lucias encontramos una variedad significativa de productos agrícolas que se producen y comercializan como el tomate, lechuga, cebollino, ajo porro, melón castilla, pepino, donde la acelga y la col china representan el 40 % del total sembrado. A pesar de ser este organopónico de los más grande de Cuba la relación ganancia – costo sigue siendo un problema a solucionar debido a que los rendimientos productivos de estos dos cultivos que representan casi la mitad del área total dista mucho de lo esperado, además la falta de recursos, trabajadores y financiamiento por parte de la empresa son otros de los problemas que golpean la producción de esta entidad. Por lo que nos hemos dado la tarea de realizar una investigación donde apliquemos la optimización lineal en pos de maximizar las ganancias de esta entidad teniendo

en cuenta los factores limitantes existentes en la unidad que afectan los rendimientos de los cultivos investigados.

Por lo antes expuesto se propone el siguiente problema científico:

Problema científico: Bajos rendimientos económicos del organopónico Las Lucias.

Hipótesis: Si se emplea la programación lineal, en la planificación del organopónico, permitirá aumentar los rendimientos económicos.

Objetivo general: Proponer un modelo matemático para la administración eficiente de los recursos en el organopónico Las Lucias de la ciudad de Holguín.

Objetivos específicos

- Caracterizar el organopónico las Lucias.
- Determinar el estado de ganancias o pérdidas por los cultivos a estudiar.
- Formular un modelo de programación lineal que permita la planificación eficiente de los recursos para la producción de forma óptima.

1. Revisión bibliográfica

1.1 Modelo y Sistema. Conceptualización.

Un modelo es una abstracción de la realidad que simplifica las condiciones reales del problema, será lineal cuando el mayor exponente de las variables es la unidad, en la literatura también se suele llamar a modelo de programación lineal como modelo matemático. (Roldan. 2019) comenta que un modelo matemático es un desarrollo de ecuaciones en las que incluyen funciones matemáticas de dos a más variables.

Existen diferentes tipos de modelos, desde los gráficos hasta los matemáticos, pero todos intentan representar algo que ocurre en la realidad para su análisis. La diversidad va desde el más básico modelo físico como ser una estatua o maqueta, hasta modelos muy complicados que sólo pueden utilizarse empleando ordenadoras muy poderosas. Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible, pero sin pretender aportar una réplica de lo que existe en la realidad. Los modelos son muy útiles para describir, explicar o comprender mejor la realidad, cuando es imposible trabajar directamente en la realidad en sí, (Prawda, J. 2004).

En su artículo (Gascón, J. 2002) menciona que un modelo matemático es una esquematización de la realidad mediante sus características principales. Para (Wyle, W. 2005) estos modelos son representaciones de la realidad que nos pueden ayudar a solucionar o entender los procesos en estudio. (Suñé, F y Fernández. 2016) definen a la palabra modelo como un objeto de realidad para un observador, donde se pueden obtener respuestas sobre la realidad.

El modelo de programación lineal es una representación del sistema que se estudia, el cual tiene elementos que son las variables de decisión, función objetivo, restricciones y parámetros, además deben cumplir las propiedades de aditividad, proporcionalidad, certidumbre y divisibilidad (Cabrera, 2017).

(Martínez, Vértiz, López, Jiménez y Moncayo, 2014) aseguran que un modelo representa la realidad con el uso de relaciones matemáticas cuyo objetivo es apoyar en el proceso de toma de decisiones, en otras palabras, un modelo de programación lineal es la representación cuantitativa de una determinada situación que se está estudiando, es lineal porque sus componentes son funciones lineales.

Como definición de sistema se puede decir que es un conjunto de elementos con relaciones de interacción e interdependencia que le confieren entidad propia al

formar un todo unificado. Puede ser cualquier objeto, cualquier cantidad de materia, cualquier región del espacio, etc., seleccionado para estudiarlo y aislarlo de todo lo demás. Según (García, J, M 2008). Es un conjunto de parámetros que se relacionan entre sí, de tal manera que si se modifica uno de ellos tiene un efecto inmediato en el resto de los elementos.

1.2 Investigación de Operaciones.

También llamada investigación operativa (IO), es una disciplina que se ocupa de la aplicación de métodos analíticos avanzados para ayudar a tomar mejores decisiones. Se la conoce también como ciencia administrativa, siendo parte de la disciplina administrativa. El origen de la IO moderna se sitúa en la 2da Guerra Mundial y en el bando aliado. Posiblemente contribuyó en gran medida a que ganaran la guerra. De hecho, alguno de los descubrimientos de esos años (el control de calidad secuencial de Wald) continuó siendo secreto militar hasta varios años después de terminada la guerra. El nombre de IO viene de ese objetivo bélico: investigar las operaciones (militares), (Robbins, S. 2015).

A menudo se considera que es un subcampo de las matemáticas aplicadas. Los términos ciencia de la gestión y teoría de la decisión a veces se usan como sinónimos. Empleando técnicas de otras ciencias matemáticas, como modelado matemático, análisis estadístico y optimización, la investigación de operaciones llega a soluciones óptimas o casi óptimas para problemas complejos de toma de decisiones. Debido a su énfasis en la interacción humano- tecnología y debido a su enfoque en aplicaciones prácticas, la investigación de operaciones se superpone con otras disciplinas, en particular la ingeniería industrial y la administración de la producción, y se basa en la psicología y en la ciencia de la organización. La investigación de operaciones a menudo se ocupa de determinar los valores extremos de algún objetivo del mundo real: los máximos (de ganancia, rendimiento o rentabilidad) o mínimos (de pérdida, riesgo o costo), (Alzate, P. 2018).

Es una disciplina aplicada en diversas áreas que utiliza la matemática como herramienta para solucionar problemas existentes en los procesos. (Wyle, W. 2005) indica que es una aplicación científica que apoya la toma de decisiones y así obtener las mejores configuraciones en los procesos. Normalmente se aplica en condiciones donde los recursos que se utilizan son escasos.

Básicamente, la investigación de operaciones trata de estudiar sistemas reales de información que utilizan las empresas con la finalidad de mejorar su funcionamiento, permitiendo analizar cada decisión, aprovechando al máximo las restricciones, para determinar de manera óptima la maximización o minimización,

según sea necesario. De tal manera, esta disciplina proporciona herramientas que permiten el estudio adecuado de las necesidades de la empresa y la planificación del sistema actual, con el fin de plantear alternativas que sean óptimas para su adecuado funcionamiento, (Taha, H. 2017).

Metodología de la investigación de operaciones:

Consiste en examinar la totalidad de las áreas que es responsabilidad del administrador, lo cual permite que la investigación de operaciones observe los efectos de las acciones de cada área y los factores fuera de la empresa donde se localiza el problema, es decir, toma en cuenta factores externos que podrían afectar, como la competencia, lo que puede permitir resolverlo y no sólo detectar sus síntomas. “El uso de métodos cuantitativos para solucionar problemas, generalmente implica a mucha gente de toda la organización, los individuos de un equipo de proyectos proporcionan información de sus áreas respectivas respecto a diversos aspectos del problema (Kamlesh, M y Solow D. 1996).

La investigación de operaciones proporciona a los tomadores de decisiones, bases cuantitativas para seleccionar mejores soluciones y optimizar sus recursos, se detalla a continuación cada uno de los pasos de la metodología a utilizar en la investigación de operaciones, (Heizer, J., & Render, B. 2020).

Definición del problema:

El primer paso es identificar y describir en términos precisos las deficiencias, efectos y consecuencias que la empresa enfrenta, para tener una visión de la situación actual. No puede haber solución si no se tiene claro el problema que enfrenta la organización. “En la segunda fase, el grupo de I.O. define el verdadero problema determinando aquellos factores que lo afectan, tales como variables, limitaciones y suposiciones (Render, B y Heizer J. 1996).

Método simplex:

El método simplex en realidad es un algoritmo. De hecho, cualquier procedimiento iterativo de solución es un algoritmo. Por consiguiente, un algoritmo es sencillamente un proceso en el que se repite un procedimiento sistemático una y otra vez hasta que se obtiene el resultado que se desea. (Lieberman, H. 2006). El método Simplex respecto a otros métodos es más complejo en cuanto a sistemas reales, permite ir mejorando la solución a cada paso, con tres o más variables de decisión hasta encontrar la solución óptima. El proceso concluye cuando no es posible mejorar dicha solución, partiendo del valor de la función objetivo se puede maximizar o minimizar.

Maximizar:

Es el procedimiento donde los factores, variables de decisión y restricciones dan la óptima solución con una simple característica de maximizar la función objetivo. Para una maximización en el método simplex, se debe utilizar como característica esencial el signo menor o igual que, expresado en forma matemática como " \leq ", el signo debe ser homogéneo para todos los requerimientos y dar solución al planteamiento del problema, esta característica fundamental, indica que las restricciones deben ser menores o igual a los requerimientos establecidos, para cumplir con la función de maximizar lo asignado, (Moya, M. 2003).

Minimizar:

Es el procedimiento donde los factores, variables de decisión y restricciones dan la óptima solución con una simple característica de minimizar la función objetivo. Para una minimización en el método simplex, se debe utilizar como característica esencial el signo mayor o igual que, expresado en forma matemática como " \geq ", el signo debe ser homogéneo para todos los requerimientos y dar solución al planteamiento del problema, esta característica fundamental, indica que las restricciones deben ser mayores o igual a los requerimientos establecidos, para cumplir con la función de minimizar lo asignado, (Casas, J. 2013).

Pasos para maximización del método simplex:

La forma estándar del método simplex permite dar una visualización de la información o datos que se posee de la unidad de análisis para luego, ser ordenados y procesados debidamente en el sistema matemático creado. Se detallan los pasos a seguir para darle solución al modelo matemático simplex, (Flores- Tapia, et al; 2016).

Identificar los datos

Los datos se obtienen de la información y son útiles en la definición del problema, que permiten ser estudiados y analizados para poder determinar el método adecuado a implementar, que son fundamentales para determinar la solución.

Objetivo

La función objetivo es lo que se pretende lograr con la implementación del modelo matemático, según sea el caso puede ser maximización o minimización, utilizando variables de decisión como limitantes. “El objetivo global de un problema de decisión expresado en una forma matemática en términos de los datos y de las variables de decisión, (Flores- Tapia, & Flores- Cevallos. 2018).

Para las variables puede ser una Maximización o Minimización se utiliza “Z” La función objetivo expresada en forma matemática

FO: Max o Min $Z = X_1 + X_2 + X_n$

Variables de decisión

Una cantidad cuyo valor se puede controlar y es necesario determinar para solucionar un problema de decisión. Las variables son asignaciones con características distintivas que se establecen para diferenciar un elemento de otro en estudio, cuyo valor se puede establecer. Estas variables de decisión también se denominan variables controlables, porque se tiene cierto control sobre sus valores y son de mucha utilidad para darle solución al problema. Para las variables de decisión se utiliza la expresión (X_n) , (Flores- Tapia, et al; 2016).

Restricciones

Una restricción sobre los valores de variables en un modelo matemático típicamente impuestos por condiciones externas. Las limitaciones o mejor conocidas como restricciones, representan los límites del escenario de la situación planteada, y son los valores de las variables asignadas en un modelo matemático, que deben cumplir con requerimientos que la empresa asigna para obtener su valor, (Anderson, D, *et al*; 2016)

1.3 Programación Lineal.

En un problema de toma de decisiones existen alternativas a considerar y evaluar mediante varios criterios, muchas veces conflictivos entre ellos. Hay alternativas que tienen un comportamiento excelente para algún criterio y malo en otro y hay alternativas que contribuyen con valores semejantes para un mismo criterio; en consecuencia es difícil adoptar una decisión. Por ese motivo se emplean modelos matemáticos que resultan entonces muy útiles para manejar esta complejidad, dado que no es posible representarla mediante una interpretación simplificada y porque la perspectiva analítica y reduccionista del modelado cuantitativo implica que la atención sólo se centra en algunas partes del problema (Sawaragi *et al*, 1992).

La programación lineal es un procedimiento aplicado a problemas de (maximización y minimización) donde la función objetivo posee comportamiento lineal. En el desarrollo se deben considerar una serie de limitaciones o restricciones que pueden existir en la realidad (Weber, J, E. 1984). Consiste en la utilización de un algoritmo para optimizar el valor de la función objetivo teniendo en cuenta las restricciones planteadas (Dantzig, D, G. 1947)

Técnica muy útil para solucionar problemas, generalmente implica la participación de un grupo multidisciplinario dentro de la Organización (Hincapié *et al.*, 2008). Programación lineal es parte de la investigación de operaciones por ende es necesario destacar la definición de unos de los autores más sobresalientes en este tema, pues (Hillier y Lieberman, 2010) definen a la palabra programación como planeación y el adjetivo lineal representa a las funciones del modelo de manera lineal, al unir estas dos definiciones se sabe entonces que programación lineal significa planear las actividades para alcanzar

un resultado óptimo.

De la misma manera, (Izar, 1996) menciona que en la programación lineal se utilizan ecuaciones lineales donde los exponentes de las variables es la unidad además que ello forma parte de la programación matemática. (Moya, N. 1998) indica que George D. Dantzig en 1947, según indicaciones de autoridades militares de Estados Unidos, estudia la solución mediante procedimientos matemáticos la planificación y programación con fines militares. Se definen las bases del problema de programación lineal.

El primer intento de aplicación de un método de programación lineal en el área agrícola se remonta a 1941 por Jerome Cornfield, quien intenta suplir las necesidades nutricionales de un grupo de animales a un costo mínimo. (Boussard, J. M. 1977)

1.3.1 Metodología de la Programación Lineal aplicada a la resolución de problemas de decisiones.

Esta comienza con la obtención de los distintos elementos que la componen y que son:

- **Objetivos:** Los fija el promotor del proyecto, el centro decisor y/o las partes interesadas, y lógicamente dependen de la naturaleza del proyecto. Así, hay objetivos de maximización de beneficios, de minimización de costos, de minimización de riesgos, de maximización de una producción, de maximización del bienestar, de minimización de daños ambientales, de igualar fondos disponibles, etc.

Los objetivos son expresiones indefinidas en el sentido de no establecer logros cuantitativos: un objetivo del problema puede ser „Minimizar el impacto ambiental“, o Maximizar el beneficio económico“. En PL el objetivo es una función lineal de las alternativas.

- Proyectos o alternativas de un proyecto: Dependen del tipo de problema y normalmente se trata de un número discreto. Pueden ser unas pocas o cientos. Por ejemplo, en un proyecto de localización industrial, las alternativas u opciones son los sitios o lugares que presentan las características adecuadas para la industria de que se trate, ya sea porque son puertos, porque son ciudades conectadas a una amplia red de transporte, por la existencia de mano de obra calificada, por beneficios impositivos, por la existencia de proveedores, etc.

- Criterios: Son restricciones en forma de inecuaciones lineales que se emplean para evaluar las alternativas y están orientados a la consecución del objetivo u objetivos deseados. Pueden ser cuantitativos, cuando expresan relaciones tangibles como por ejemplo „Capacidad de transporte de barcos portacontenedores“, „Longitud en km de un gasoducto entre dos puntos A y B“, „Fondos totales disponibles“, etc.

Son cualitativos cuando se refieren a preferencias y en general con incertidumbre. Por ejemplo „Riesgo aceptado en la demora en la ejecución de un proyecto“, „Posibilidad de encontrar condiciones adversas en el transporte por tierra de grandes equipos“, „Reacción de la población con respecto a un proyecto“, etc.

A pesar de tener la misma naturaleza que los objetivos, ya que ambos son funciones lineales de las mismas variables, los criterios constituyen los pasos o metas para alcanzar el objetivo, y están acotados en su accionar por valores límites, que corresponden a los términos de la derecha de cada inecuación.

- Coeficientes: Son las magnitudes que indican la participación de cada alternativa para cada criterio. Por ejemplo, si el criterio se refiere a la Potencia instalada“, cada coeficiente suele indicar la potencia que puede generar cada alternativa de producción eléctrica. Si el criterio es cualitativo, como por ejemplo „Beneficios ambientales para la población“, el coeficiente será una magnitud que de alguna manera refleje la correspondiente participación en

la obtención de esos beneficios. Hay varias formas de obtener estos coeficientes, ya sea por una apreciación entre 1 y 10 por ejemplo (o en cualquier otro intervalo), y que traduzcan apreciaciones subjetivas en valores cuantitativos, o bien pueden emplearse técnicas como AHP (Saaty, 1980).

- Términos independientes, límites, términos de la derecha: Constituyen una característica esencial de la PL y son valores cuantitativos que limitan el alcance de los criterios. Pueden estar expresados en cualquier tipo de unidades y ser fracciones decimales o números enteros. Se introducen límites de mínima, tal como los que establecen la cantidad mínima de agua que un municipio debe suministrar diariamente a cada persona del mismo. O pueden ser de máxima, como por ejemplo, el contenido máximo admisible de SO_x procedente de una planta eléctrica que quema combustibles fósiles. O también referirse a intervalos, tal como el establecido por los límites entre los cuales pueden variar los metros cuadrados por persona en un proyecto de construcción de viviendas. Los hay referidos al tiempo, como los que establecen límites para que una ambulancia responda a un pedido, etc, (Moya, M. 2003).

1.4 Modelos de optimización aplicados a los procesos agrícolas.

Una pregunta que suele hacerse un centro decisor es cuál es el mejor modelo para aplicar a la resolución de un problema dado. Esta pregunta no tiene en realidad una respuesta concreta, dado que es necesario analizar el problema en profundidad y luego aplicar aquel modelo que mejor se adapte al mismo y que deberá ser apropiado para sus características (Warren, 2009).

Es evidentemente imposible que una persona pueda manejar toda la información disponible, interrelacionarla y llegar a una decisión correcta acerca de qué alternativa elegir. Los modelos matemáticos están contruidos para ordenar y procesar los datos y servir de guía al centro decisor tratando de representar lo más fielmente posible la situación real. Al respecto, (Duckstein *et al*, 1994), dicen que “el propósito de aplicar los métodos de análisis de decisión con objetivos y criterios múltiples es ayudar al agente de la decisión y no el de reemplazarlo”.

(Maino, B y Rivas. 1995) plantean un modelo de programación multicriterio aplicado a la agricultura en una condición de subsistencia en donde utiliza como objetivos como máxima producción, minimización de la estacionalidad y maximización del empleo. Ortega, Mejía, Palacios, Rendón y García (2009) define un modelo de optimización para encontrar el conjunto de cultivos óptimos en función de la superficie de riego disponible en un sector de México. (Catrileo, V y Rojas. 2003) establece ciertas estrategias de asignación de productos Ganado-Cultivo, a trabajar en una muestra de terreno de 15 hectáreas perteneciente a la IX región de Chile con la finalidad de maximizar el margen bruto.

La producción agrícola y su fertilización es una actividad de periodos variados que dependen del tipo de cultivo, por ejemplo, el periodo de cultivo de la papa es entre 3,5 a 6,5 meses, según la variedad (Egúsquiza y Catalán, 2011), la caña de azúcar de 14 a 17 meses en el primer corte y de 11 a 13 meses en los siguientes cortes (SAGARPA, 2015) etc. La planificación de gastos para actividades de mayor tiempo de ejecución, utilizando precios fijos, genera inconvenientes a la hora de la ejecución. Este inconveniente se percibe en la ejecución de obras públicas, cuyo costo final es muy superior a lo presupuestado, que en muchos casos se paraliza sin concluir. El uso de costos imprecisos, mediante la representación difusa, es una alternativa que reduce tales inconvenientes (Ezzati *et al.*, 2015; Luhandjula, 2015; Pelta *et al.*, 2012; Vergara-Moreno *et al.*, 2006).

Las fichas de costos:

Es la ficha de costo el documento donde se refleja la información relacionada con los componentes del costo unitario de la producción o el servicio. Con vista a asegurar el correcto análisis del comportamiento de la eficiencia productiva en cada unidad de producto elaborado o en proceso, es necesario el cálculo del costo unitario, mediante las normativas de consumo de fuerza de trabajo y otros gastos, de los productos o grupos de productos homogéneos producidos por la empresa. El costo unitario constituye un indicador económico de vital importancia en el análisis de los resultados obtenidos, mostrando la efectividad alcanzada en el proceso y la eficiencia en la utilización de los recursos. (Cuevas, 2001)

En la terminología básica del costo de producción se define como costo unitario a la relación entre el costo total y las unidades físicas, que pueden ser productos terminados, horas trabajadas o planificadas, y también pueden referirse a un área, departamento, fábrica, o sea, a unidades organizativas. La complejidad del cálculo del costo unitario, dependerá del sistema de cálculo del costo que se adopte, ya que este es el encargado de la determinación del costo total de la producción y de las unidades físicas resultado de ese proceso productivo, (Horngren, 2005).

Es la ficha de costo el documento donde se refleja la información relacionada con los componentes del costo unitario de la producción o el servicio, se pueden clasificar en atención al momento de confección de la misma, en función al criterio de los especialistas y a los fines que se persiguen, por tanto, de acuerdo a los objetivos en el cálculo de producción pueden clasificarse de diferentes maneras.

Ficha de costo planificada

Ficha de costo normativa

Ficha de costo presupuestada

Ficha de costo real

(Neuner, 1975).

Los datos para la realización de este trabajo se tomarían de los cultivos Acelga y Col China, de los que se puede decir:

Cultivo de Col China (*Brassica campestris*)

Origen:

La col china es originaria de Extremo Oriente, se cultivan en China desde hace muchos años, donde llegaron a Japón a finales del siglo XIX. En los últimos años ha sido difundido por todo el mundo (Infocagro, 2002).

Morfología:

Raíz: Esta planta presenta una raíz napiforme y delgada. (Limerin, 2000)

Tallos: El tallo tiene una base carnosa, engrosada en forma de tubérculo y puede llegar a medir más de 1.5m de altura, (Rodan F. 2009).

Hojas: Sus hojas, al principio, crecen erectas y separadas, después se forma el acogollamiento y finalmente una pella prieta (Limerin 2000).

Flores: Racimo terminal de 10- 30 cm de largo, sus flores amarillas, con 4 sépalos verdes de 4- 5 mm de largo y 4 pétalos de 6- 10 mm de largo, 6 estambres, de los cuales 2 son más cortos (Rodan F. 2009).

Frutos y semillas: Pedicelos 1- 2.5 cm, silicua extendida, lineal, cilíndrica, dehiscente, 2- 6 cm de largo, ápice con un pico de 1- 3 cm de largo. Semillas globulares, de 1.5- 2 mm en diámetro, café o negras (Roldan F. 2009).

Requerimiento del cultivo:

Temperaturas:

Esta planta no soporta bajas temperaturas; por debajo de los 8°C se paraliza, el grado óptimo de desarrollo está en 18- 20°C y para la formación de cogollos está entre los 15- 16°C, la floración se produce cuando la planta se ve sometida a temperaturas menores a los 12°C, (Jaramillo E. J, et al; 2006).

PH:

Un pH bueno para la planta sería el comprendido entre 6,5 y 7. No son buenos ni los suelos excesivamente ácidos ni los muy alcalinos, que provocan lo que se denomina "tipburn". (Infoagro 2008)

Suelo:

El suelo ideal sería aquel de textura media, que sea poroso, y que retenga la humedad. No son buenos ni los suelos excesivamente ácidos ni los muy alcalinos, que provocan lo que se llama "tipburn" (Jaramillo, E, J, *et al*, 2006).

Propagación:

La propagación es por semillas y se sugiere conocer el poder germinativo de la semilla para obtener un alto porcentaje de germinación, esto se lo realiza mediante un semillero que contenga un sustrato rico en materia orgánica y que presente las condiciones óptimas de humedad y temperatura. (Roldan F. 2009).

Siembra:

La plantación se realiza sobre suelo húmedo, utilizando técnicas de siembra directas, arboleo o en líneas. (Limerin 2000) Se emplean entre 3 y 4 Kg/ha de semilla, aproximadamente. Cuando se siembra en líneas, la distancia entre ellas ha de ser de unos 40 cm. Se abre primero un pequeño surco, sobre el que se deposita la semilla a chorrillo, y de inmediato se da un ligero pase de rastro para cubrirla; esta operación puede realizarse de forma mecánica. De Junio a Agosto para recolectar al final del Otoño e Invierno, también puede sembrarse a finales de Verano en zonas templadas para recolectar todo el Invierno. (Maocho 2012).

Abonado:

De uno a tres días antes de la plantación, regar con abundante cantidad de agua, tras la plantación, regar diariamente durante una semana sin aporte de abono,

posteriormente, durante un mes, regar tres veces a la semana, aplicando las siguientes cantidades: 0,30 g/m² de nitrógeno (N); 0,10 g/m² de anhídrido fosfórico (P₂O₅) y 0,50 g/m² de óxido de potasio (K₂O). A continuación y hasta 15 días antes de la recolección, regar tres veces por semana con las siguientes cantidades: 0,30 g/m² de nitrógeno (N); 0,10 g/m² de anhídrido fosfórico (P₂O₅) y 0,30 g/m² de óxido de potasio (K₂O). (Pereyra José 2000).

Valor Nutricional:

Tiene un alto porcentaje de vitamina C y un gran porcentaje de energía e hidrato de calcio, lo que le otorga propiedades antioxidantes como el resto de las crucíferas. (Bohemia 2011)

Plagas y Enfermedades:

Mnadores de hojas (*Liriomyza trifolii*)

Los daños los produce la larva de esta pequeña mosca de color amarillo y negro, se alimentan dentro de las hojas, consumiendo el mesófilo sin dañar la epidermis foliar. Los rastros de su alimentación ("minas") son visibles externamente en las hojas, como áreas blanquecinas o pardas y con formas variables, desde estrechas galerías lineales hasta amplias cámaras, los principales productos que se utilizan contra esta plaga son: Acefato, Bifentrín, Cipermetrín, Diazinon, Fosalone, Oxamilo. (Infogardín 2005).

Oruga de la col (*Pieris brassicae*)

Las orugas pequeñas se alimentan principalmente en el envés de las hojas, la epidermis de la hoja resulta dañada. Cuando las orugas crecen, se dispersan por toda la planta. Inicialmente causan pequeños agujeros en las hojas, que después pueden llegar a ser más grandes. El tratamiento debe realizarse al eclosionar los huevos, las materias activas recomendadas son: Triclorfon, Carbaril, Endosulfán o Esfenvalerato. (Koppert Biological Systems 2012).

Alternaría (*Alternaria brassicae*)

Los síntomas de esta enfermedad se manifiestan en forma de manchas negras de

un centímetro aproximadamente de diámetro, con anillos concéntricos de color más fuerte. Habrá que dar tratamientos preventivos cada 7- 10 días con alguno de los siguientes productos: Oxiclóruo de cobre, Oxiclóruo de cobre + Mancoceb, Propineb + Triadimefon, etc. (Infojardin 2005).

Acelga

Familia: Quenopodiaceae.

- Especie: *Beta vulgaris* L. var. *cicla* (L.).

- Planta: la acelga es una planta bianual y de ciclo largo que no forma raíz o fruto comestible.

El centro de origen de esta especie se sitúa probablemente en Europa y norte de Africa, siendo la región oriental del Mediterráneo su mayor centro de diversificación. Acelga y betarraga son la misma especie y, obviamente, presentan un origen común; sin embargo, su evolución ha sido divergente, resultando en características morfológicas claramente distintas, por lo que se separan o reconocen como variedades botánicas distintas. Existen referencias escritas que la acelga fue utilizada por los griegos 500 años a.C., siendo un alimento básico para la nutrición humana por mucho tiempo. Desde Europa ha sido llevada a diversos países del mundo y en la actualidad presenta una amplia difusión, especialmente en América y Asia (Alonzo, 2004).

Morfología

Raíz: Es una planta de ciclo biológico bienal. Presenta una raíz pivotante, robusta, ramificada, que logra un enraizamiento medio en el perfil del suelo y que, a diferencia de betarraga, no experimenta un engrosamiento significativo y es poco carnosa, (Infoagro, 2007).

Tallo: Tallo ramificado y acostilado, alcanza hasta 1,5 m y que sustenta, en posición terminal de sus ramas, las inflorescencias llamadas espigas que tienen numerosas flores, (Infoagro, 2007).

Hojas: Constituyen el órgano de consumo de la especie. Estas hojas se producen hasta el momento de la inducción floral. En general, las hojas presentan un pecíolo grande, de 3 a 4 cm de ancho y 15 a 20 cm de largo, muy carnosos o suculentos, generalmente de color blanco o verde claro, aunque también hay rojos y amarillentos. Los pecíolos también se conocen con el nombre de pencas de acelga. Las láminas también son grandes, de 15 a 20 cm de ancho y 20 a 30 cm de largo, de forma aovada, gruesas, de borde sinuoso, de superficie lisa o rugosa, y generalmente de color verde oscuro y brillante, aunque también son comunes las verde claro. La lámina representa la mitad o más del largo total de la hoja, (Terranova, A. 1995).

Flores: Flores en panículas cimosas, axilares o terminales, con más de 6 flores por cima. Segmentos del perianto de hasta 3mm en su máximo desarrollo. $2n=18$, existiendo cultivares triploides ($2n=27$) y tetraploides ($2n = 36$) obtenidos artificialmente, (Seymour, 1999).

Fruto: Las semillas son muy pequeñas y están encerradas en un pequeño fruto al que comúnmente se le llama semilla (realmente es un fruto), el que contiene de 3 a 4 semillas, (Seymour, 1999).

Requerimiento del cultivo

Temperatura:

La acelga es una planta de clima templado, que vegeta bien con temperaturas medias; le perjudica bastante los cambios bruscos de temperatura. Las variaciones bruscas de temperatura, cuando las bajas siguen a las elevadas, pueden hacer que se inicie el segundo periodo de desarrollo, subiéndose a flor la planta. La planta se hiela cuando las temperaturas son menores de -5°C y detiene su desarrollo cuando las temperaturas bajan de 5°C . En el desarrollo vegetativo las temperaturas están comprendidas entre un mínimo de 6°C y un máximo de 27 a 33°C , con un medio óptimo entre 15 y 25°C . Las temperaturas de germinación están entre 5°C de mínima y 30 a 35°C de máxima, con un óptimo entre 18 y 22°C , (Aparicio, V et al, 1998).

Luminosidad: No requiere excesiva luz, perjudicándole cuando ésta es elevada, si va acompañada de un aumento de la temperatura. La humedad relativa está comprendida entre el 60 y 90% en cultivos en invernadero. En algunas regiones tropicales y subtropicales se desarrolla bien, siempre y cuando esté en zonas altas y puede comportarse como perenne debido a la ausencia de invierno marcado en estas regiones, (Ospina, 1998).

Suelo: La acelga necesita suelos de consistencia media; vegeta mejor cuando la textura tiende a arcillosa que cuando es arenosa. Requiere suelos profundos, permeables, con gran poder de absorción y ricos en materia orgánica en estado de humificación. Es un cultivo que soporta muy bien la salinidad del suelo, resistiendo bien a cloruros y sulfatos, pero no tanto al carbonato sódico. Requiere suelos algo alcalinos, con un pH óptimo de 7,2; vegetando en buenas condiciones en los comprendidos entre 5,5 y 8; no tolerando los suelos ácidos, (Maroto, 1995).

Siembra: Se siembra durante todo el año en directa a chorrillo, con raleo posterior. En realidad, se siembra el fruto (glomérulo), que en su interior contiene las semillas. Por lo tanto, nacerán varias plantitas juntas; por eso, después habrá que seleccionar las que crecerán en ese lugar y consumir como brote en una ensalada las que vayas a retirar. En almácigo se pueden separar cuidadosamente las plantitas y trasplantarlas en una maceta pequeña, para luego pasarlas al cantero o a una maceta mediana o grande. Tener en cuenta que las raíces de la acelga son grandes. Prefiere sol pleno o media sombra, suelo profundo y fértil, aunque soporta el algo pesado y los salinos. Aplicar una palada de compost antes de comenzar el cultivo. La distancia ideal entre plantas es de 0,25 m y la separación entre líneas, de 0,40 m. La siembra directa poniendo una semilla por alveolo. Esto conlleva un aclareo posterior de las plantas, debido a que las semillas de acelga son poligérmicas y de cada una de ellas emergerán varias plantas, (Maroto, 1995).

Abonado: Constituye normalmente un cultivo secundario y a pesar de tratarse de un cultivo exigente en materia orgánica, no suele aplicarse estiércol, a no ser

que el siguiente cultivo de la alternativa requiera el aporte de estiércol en el cultivo anterior. Sin embargo, si supone el cultivo principal de la alternativa, es aconsejable aportar 2,5-3 kg/m² de estiércol para obtener el máximo rendimiento. Los requerimientos de nitrógeno son elevados desde que comienza el rápido crecimiento de la planta hasta el final del cultivo. Las necesidades de potasio son elevadas a lo largo de todo el ciclo de cultivo. A título orientativo, el abonado de fondo puede llevarse a cabo con la aplicación de 50 g/m² de abono complejo 8-15-15. En el abonado de cobertura, con riego por gravedad, es común aplicar 10 g/m² de nitrato potásico después de cada riego, no debiendo rebasar los 50 g/m² en la suma del total de las aplicaciones. Esta dosis puede aumentarse hasta 100 g/m², cuando la recolección se hace por corte periódico de hojas, abonando después de cada corte, (Romero, 2000).

Valor nutritivo: La composición nutritiva de la acelga es una de las más ricas entre las hortalizas. Integralmente, se destaca por su significativo aporte de minerales (calcio, hierro, potasio y sodio) y, principalmente, por su elevado suministro de vitaminas A y B a la dieta. Las cifras del Cuadro a continuación, al compararlas con las de otras hortalizas, hacen que acelga sea considerada la tercera especie hortícola en valor nutricional. Además, medicinalmente es considerada un alimento laxante y digestivo. Las hojas se consumen enteras, normalmente cocidas, en guisos, panqueques, sopas y ensaladas, y como guarnición de carnes y pescados. También se acostumbra consumir las partes por separado, por ejemplo pecíolos cocidos y fritos, o láminas solas en cremas y salsas, por lo que se le considera una especie muy versátil en la cocina. En la agroindustria se le usa para la elaboración de diversos productos congelados y enlatados, (Shellagro, 2007).

Riego: La acelga es un cultivo que debido a su gran masa foliar necesita en todo momento mantener en el suelo un estado óptimo de humedad. Para obtener una hortaliza de buena calidad no conviene que la planta acuse síntomas de deshidratación, durante las horas de mayor temperatura en el invierno, para evitar que los tejidos se embastezcan. Cuando el riego se realiza por gravedad se recomiendan aportes de agua después de la plantación, a los 15-20 días y luego se establece un turno de 20 días que se irá aumentando hasta febrero y se reducirá a partir de esas fechas, (Mundo verde, 2010)

Plagas y Enfermedades

Plagas

Gusano blanco (*Melolontha melolontha*)

Las larvas de este coleóptero tienen un cuerpo blanquecino, con el extremo posterior abdominal de color negruzco. El insecto adulto tiene de 2 a 3 cm de largo, con la cabeza de color negro y el resto del cuerpo parduzco ocre. El ciclo evolutivo larvario completo es de 3 años, siendo en la primavera del segundo año cuando producen mayores daños.

Gusano de alambre (*Agriotes lineatum*)

Son coleópteros cuyos adultos miden de 6 a 12 cm de longitud, son de color oscuro y de forma alargada. Las larvas son de color pardo dorado, con cierta semejanza a los ciempiés, de forma cilíndrica y cuerpo notablemente rígido y una longitud de 2 a 5 cm. Producen galerías en las raíces de las plantas, provocando heridas que más tarde son colonizadas por distintos hongos del suelo causando enfermedad.

Gusano Gris (*Agrotis segetum*)

Este lepidóptero produce daños en la vegetación, seccionando el cuello de las plantas recién plantadas.

Mosca de la remolacha (*Pegomya betae* o *P. hyoscyami*)

Los adultos tienen la cabeza grisácea con una rayita roja en la parte frontal; los ojos son rosados y las patas amarillas. Las larvas tienen una longitud de unos 7 mm, son de cabeza gruesa, dividida por una hendidura; no tienen patas y son de color blancuzco. La ninfa es de forma oval y color rosado. Los huevos son de color blanco sucio, rugosos, de 1 mm de longitud. Las larvas perforan la epidermis y penetran en el interior de los tejidos del limbo, haciendo galerías que pueden

llegar a ocupar toda la superficie foliar.

Pulgón (*Aphis fabae*)

Estos insectos se sitúan en el envés de las hojas provocando daños que pueden afectar a la comercialización de las acelgas.

Enfermedades

Mildiu (*Peronospora farinosa* f. sp. *betae*)

Este hongo puede afectar a cotiledones y primeras hojas verdaderas en semillero y posteriormente manifestarse en la plantación. La infección se manifiesta por una roseta de hojas jóvenes distorsionadas, cloróticas, densas y arrugadas con márgenes rizados hacia abajo. Si se dan las condiciones ambientales adecuadas los síntomas parecen en la parte baja de las hojas del cogollo. Cuando el ataque es muy fuerte, las hojas viejas aparecen cloróticas, el cogollo suele necrosarse y las plantas mueren. Los esporangios se desarrollan entre 5 y 22°C, óptimo 12°C y humedad relativa por encima del 80%. Este hongo sobrevive en residuos de cultivo de acelga, en cultivos para semilla, en cultivos silvestres de *Beta* spp y hasta en las propias semillas.

Cercospora (*Cercospora beticola*)

En las hojas aparecen pequeñas manchas redondeadas de unos 3 mm de diámetro; al principio el centro de la mancha es grisáceo, después se forman unos puntitos negros. Toda la superficie de las hojas puede quedar cubierta por las manchas que se van secando.

Peronospora (*Peronospora schatii*)

Las hojas centrales presentan color más claro, deformándose, aparecen más o menos rizadas. El envés queda cubierto por un moho gris o violáceo de aspecto aterciopelado.

2. Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló en el organopónico Las Lucías ubicado en la circunvalación sur, Cayo de Mayabe, Holguín. El mismo pertenece a la empresa Hortícola Wilfredo Peña Cabrera, éste es una de las cadenas principales de la empresa en el abastecimiento de hortalizas y hierbas aromáticas hacia el sector del turismo en la provincia. La toma de los datos se realizó en los meses de Mayo-Agosto del 2022. Los cultivos que se evaluaron para la propuesta de este trabajo fueron la Acelga y la Col china, las cuales se le asignaron variables X1 y X2 respectivamente.

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que se manejaron datos de la producción para la asociación de las variables. Asimismo, según su aplicación esta investigación es de tipo descriptiva ya que permitió describir la situación actual del organopónico teniendo en cuenta las utilidades y según su propósito, es una investigación aplicada puesto a que se utilizó la herramienta Solver para aplicar el modelo de programación lineal. Tiene diseño no experimental y transversal; es no experimental porque solo se limitó a observar la realidad problemática del organopónico para posteriormente en base de la información obtenida y los resultados esperados proponer mejoras, además que las variables de estudio no fueron manipuladas y es transversal ya que la información fue recogida en un momento determinado. Se identificó la información más importante para el desarrollo de la investigación.

Se emplearon los siguientes materiales: computadora, internet, ficha de costo, historial del cultivo

Para la realización del modelo de programación lineal se empleó el complemento Solver del software Microsoft Excell 2021. Es una herramienta que resuelve problemas lineales y no lineales, con o sin dominio restringido, donde se pueden agregar restricciones enteras para las variables. Esta herramienta no puede estar activa en un primer momento, para ello se debe descargar y complementarlo a Excel, puede llegar a solucionar problemas que tengan como

máximo 200 variables de decisión, 100 restricciones explícitas y 400 simples.

La función objetivo empleada para el modelo de programación lineal fue:

$$F(x) = (\text{ganancia}) X_1 + (\text{ganancia}) X_2$$

R1: $CX_1 + CX_2 \leq 278$ restricción de espacio cantidad de canteros

R2: $RX_1 + 0 \leq 300$ kg

R3: $0 + RX_2 \leq 180$ kg

Los datos tomados de ganancias fueron por canteros de igual forma sus restricciones.

Los datos obtenidos fueron evaluados mediante un análisis de PERMANOVA, para establecer la variabilidad estadística a partir de 10 000 permutación para un nivel de significación de $p \leq 0.05$, en el software estadístico PAST 4.10 (Hammer *et al.*, 2001)

Se utilizó el método simplex que en realidad es un algoritmo, por consiguiente, un algoritmo es sencillamente un proceso en el que se repite un procedimiento sistemático una y otra vez hasta que se obtiene el resultado que se desea. (Lieberman, H. 2006). El método Simplex permite ir mejorando la solución a cada paso, con dos o más variables de decisión hasta encontrar la solución óptima. El proceso concluye cuando no es posible mejorar dicha solución, partiendo del valor de la función objetivo se puede maximizar o minimizar.

3. Resultados e impactos esperados

- El organopónico Las Lucías es uno de los principales abastecedores de hortalizas para el sector turístico en la provincia de Holguín, cuenta con un área de 278 canteros de 60 m³, una plantilla de 18 trabajadores los cuáles son 7 graduados con 9no grado, 8 de nivel medio superior, 1no con 6to grado y la ingeniera al frente de la institución. El salario de los trabajadores se distribuye de la siguiente forma: la ingeniera cobra 4800 y los demás trabajadores 2810. Existe una amplia diversidad de hortalizas y otros productos como el tomate, ají pimiento, cebollino, ajo porro, lechuga, pepino, perejil hierba buena, menta y otros, pero la acelga y la col china constituyen el mayor por ciento de las plantaciones dando sin duda esto un motivo para utilizar un modelo de optimización buscando mejorar el rendimiento económico.
- Determinación del estado de ganancia o pérdida por los cultivos de col china y acelga dónde se muestra a través de las siguientes tablas como se llegó a cada resultado para determinar la ganancia por cantero.

Tabla 1 Gasto por cada m³ de cantero

Cultivos	Col China	Acelga
Agua \$	1.78	1.78
Abonos \$	3.00	3.00
Semilla \$	2.00	0.64
Gastos \$	6.78	5.42

Gastos $g(x)$

Agua $ag(x)$ $g(x) = ag(x) + ab(x) + s(x)$

Abono $ab(x)$

Semilla $s(x)$

Para la Col China

$$g(x) = 1.78 + 3.00 + 2.00$$

$$g(x) = 6.78 \$$$

Para la Acelga

$$g(x) = 1.78 + 3.00 + 0.64$$

$$g(x) = 5.42 \$$$

Si cada cantero presenta un área de 60 m² podemos decir que:

El gasto total por cantero de cada cultivo será $gc(x) = 60m^2 \times g(x)$

Para la Col China

$$gc(x) = 60m^2 \times 6.78$$

$$gc(x) = 406.80 \$$$

Para la Acelga

$$gc(x) = 60m^2 \times 5.42$$

$$gc(x) = 325.80 \$$$

Ganancia del cantero $Gc(x)$

$$Gc(x) = Rc(x) - gc(x)$$

Rendimiento económico del cantero $Rc(x)$

Gasto del cantero $gc(x)$

Para la Col China

$$Gc(x) = 6000 - 406.80$$

$$Gc(x) = 5593.20 \$$$

Para la Acelga

$$Gc(x) = 2700 - 325.20$$

$$Gc(x) = 2374.80 \$$$

Tabla 2 Ganancia total por cantero (canteros de 60 m³)

Cultivos	Col China	Acelga
Gasto por cantero (\$)	406.80	325.80
Rendimiento en (kg) por cantero	300	180
Venta del (kg)	20	15
Rendimiento económico por cantero (\$)	6000	2700
Total de ganancia por cantero (\$)	5593.20	2374.80
Plan de producción en (kg)	12000	10800

- Formulación de un modelo de programación lineal que permitirá la planificación eficiente de los recursos para la producción de forma óptima. Los cultivos evaluados Col China y Acelga donde:

Col china x_1

Acelga x_2

$$\text{Ganancia} = 5593.20x_1 + 2374.80x_2$$

Restriciones

$$\text{Cantidad de canteros} = x_1 + x_2 \leq 278$$

$$\text{Plan de producción } x_1 = x_1 \geq 12000$$

$$\text{Plan de producción } x_2 = x_2 \geq 10800$$

Una vez puesto la función objetivo de ganancia con el objetivo de maximizar la ganancia a obtener, teniendo en cuenta las restricciones anteriormente

planteadas se procedió a darle solución con el complemento solver del Microsoft Excell está dando como resultado óptimo la siembra de 218 canteros de col china y 60 canteros de acelga siendo estos valores los que le permitirían obtener una ganancia máxima de 1 361 805.60 CUP cumpliendo los planes de producción de los cultivos.

Lo anterior se muestra en la hoja de cálculo siguiente con el complemento solver de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		X1	X2			Límite	Holgura					
2	cantidad canteros	218	60									
3	Utilidad	5593,20	2374,80	1361805,60							x1	col china
4											x2	acelga
5	Restricciones											
6	canteros	1	1	278,00 <	278	0						
7	plan de prod x1	300		65400,00 >	12000	-53400,00						
8	plan de prod x2		180	10800,00 >	10800	0				1219317,6		
9										142488		
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												

Aquí podemos observar como mediante éste modelo de optimización lineal maximizando ganancias lograría un máximo de ganancias en los cultivos de col china y acelga con la debida distribución de productos por canteros.

De ésta manera se muestran los siguientes resultados muy similares a los esperados en la investigación utilizando un modelo de programación lineal para la asignación óptima de productos con la finalidad de maximizar las ganancias. Este resultado fue obtenido por Carlos Enrique Hidalgo Benítez de la Universidad Andrés Bello de Chile en el año 2019 donde estos fueron los datos recopilados y resultados obtenidos.

- Rij: Rendimiento del producto i en el escenario j [Cantidad producto/ha]. (Variable Estocástica).
- Pi: Precio de venta del producto i [\$/Cantidad producto].
- Ci: Costo del producto i [\$/Cantidad producto].
- Sij: Superficie que utiliza el producto i en el escenario j [ha].
- NP: Número de productos a utilizar en el

predio (Fardos, Maíz, Trigo, Remolacha, Bovinos, etc.). - NE: Número de escenarios para el rendimiento de los productos a considerar. - SUP: Superficie total del predio [ha]. - BN: Beneficio Neto Total [\$]. - CR: Superficie de remolacha regable restringida por los equipos disponibles en el predio [ha]. - CA: Capacidad de almacenamiento de fardos restringida por las bodegas existentes en el predio [fardo]. - CB: Capacidad de bovinos posibles de mantener al año en el predio, restringida por el equipamiento y personal disponible [bovino].

Función Objetivo y restricciones:

$$\mathbf{MAX BN} = \sum_{i=1}^{NP} \sum_{j=1}^{NE} Prb_j \cdot (P_i \cdot R_{ij} \cdot S_{ij} - C_i \cdot S_{ij}) \quad (1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{NP} S_{ij} \leq SUP \quad \forall j \quad (2)$$

$$S_{4j} \leq CR \quad \forall j \quad (3)$$

$$S_{1j} \cdot R_{1j} \leq CA \quad \forall j \quad (4)$$

$$\frac{R_{5j} \cdot S_{5j}}{250 [kg/bovino]} \leq CB \quad \forall j \quad (5)$$

$$S_1, S_2, \dots, S_{NP} \geq 0 \quad (6)$$

El modelo planteado se resuelve considerando 3 escenarios de rendimiento para cada producto, consideración que puede representar algunos factores incontrolables como cantidad de lluvia en cada fase del cultivo, mantenimiento oportuno del cultivo, viento, raza de bovinos, etc.

Escenarios de rendimiento para cada producto. Tabla 1

Producto	Rendimiento(R)					
	Optimo		Regular		Deficiente	
Fardos	1800	[fardo/ha]	1620	[fardo/ha]	1500	[fardo/ha]
Maíz	18000	[kg/ha]	14000	[kg/ha]	10000	[kg/ha]
Trigo	10000	[kg/ha]	7000	[kg/ha]	4000	[kg/ha]
Remolacha	140	[ton/ha]	100	[ton/ha]	80	[ton/ha]
Bovinos	1724	[kg/ha]	1379	[kg/ha]	1034	[kg/ha]

Para dar solución al problema planteado se utilizará el software LINGO 11.0 para programar el modelo propuesto. En el siguiente apartado se presentan los resultados encontrados al resolver el modelo programado.

Resultados

A continuación, en la Tabla 2 se presentan los beneficios netos totales proyectados para cada escenario de rendimiento de los productos. Se considera la asignación realizada por el agricultor basada en su intuición sobre el rubro.

Beneficio Neto proyectado Temporada 2018 - 2019.

Producto	Temporada 2018- 2019		
	Escenarios de Rendimiento		
	Optimo	Regular	Deficiente
	Superficie[ha]		
Fardos	2,5	2,5	2,5
Maíz	11,8	11,8	11,8
Trigo	6,7	6,7	6,7
Remolacha	5	5	5
Bovinos	16	16	16
BN	\$51.075.900	\$29.380.000	\$11.084.100

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 3 siguiente se presentan las asignaciones de superficie óptimas para cada escenario de rendimiento de los productos, realizada por el software con la finalidad de obtener el máximo beneficio.

Tabla 3.- Asignación LI NGO para cada producto.

Asignación LI NGO			
Producto	Escenarios de Rendimiento		
	Óptimo	Regular	Deficiente
	Superficie [ha]		
Fardos	2,22	2,47	2,67
Maíz	0,00	0,00	0,00
Trigo	11,93	6,96	7,90
Remolacha	9,00	9,00	0,00
Bovinos	18,85	23,57	31,43
BN	\$56.261.022	\$33.968.965	\$20.231.929

De esta forma se puede observar que en la Tabla 2 la asignación realizada por intuición del agricultor es bastante adecuada ya que genera ganancias netas totales del predio, importantes y cercanas al óptimo.

Pero en la Tabla 3 se obtienen las asignaciones óptimas que permitieron mejorar el beneficio neto total para el predio con respecto al que manejaba el agricultor. El modelo de optimización planteado permitió decidir en forma óptima la cantidad de hectáreas que se asignarán a cada producto para el trabajo anual con el fin de obtener el máximo beneficio del predio.

Al igual se muestran los resultados obtenidos por el Dr. C. Raimundo J. Lora-Freyre de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba en el 2012 donde, se desea obtener una estructura de distribución de las tierras, para la producción de los dos tipos de variedades de café, que cumplimentando las restricciones establecidas y las disponibilidades de recursos, optimice los niveles de producción.

Formulación del modelo matemático de programación Lineal. Se realiza una descripción del problema a modelar. Se identifican los elementos que constituyen variables, parámetros e índices. Esta fase demanda un intenso intercambio entre los productores y los autores de la investigación para ayudar a plantear el modelo matemático.

Por razones de espacio e interés práctico se expondrán sólo dos modelos. El N° 1, el cual considera los rendimientos actuales y las tierras en explotación y el N° 4, que considera los rendimientos óptimos y las disponibilidades potenciales de tierra.

MODELO N° 1

Función Objetivo: $MAX = 0,14X1 + 0,17X2$

Restricciones: 1. Disponibilidad de tierras, en hectáreas, para el cultivo del café:
 $X1 + X2 \leq 3\,260,1$

2. Cumplimiento de los límites mínimos de hectáreas dedicadas a la producción de la variedad Arábico: $X1 \geq 1\,510$

3. Cumplimiento de los límites mínimos de hectáreas dedicadas a la producción de la variedad Robusta:
 $X2 \geq 1\,310$

4. Cumplimiento del plan de ingresos: $2\,954,33X1 + 3\,756,30X2 \geq 9\,693\,600$

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 2 OBJECTIVE FUNCTION VALUE 1)	5 08,917 0
VARIABLE VALUE REDUCED COST X1	1 510,000 000
0,000 000 X2	1 750,099 976 0,000 000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0,000 000	0,1700 00
3)	0,000 000	0,030000
4)	440,1000	0,000000
5)	1 341 338,875	0,000000

MODELO N° 4

Función Objetivo: $MAX = 0,36X1 + 0,57X2$

Restricciones: 1. Disponibilidad de tierras, en hectáreas, para el cultivo del café:
 $X1 + X2 \leq 4\,312,9$

2. Cumplimiento de los límites mínimos de hectáreas dedicadas a la producción de la variedad Arábico: $X1 \geq 1\,510$

3. Cumplimiento de los límites mínimos de hectáreas dedicadas a la producción de la variedad Robusta: $X2 \geq 1\,310$

4. Cumplimiento del plan de ingresos:
 $2\,954,33X1 + 3\,756,30X2 \geq 9\,693\,600$

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 0 OBJECTIVE FUNCTION VALUE
 1) 2 141,253

VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
X1	1 510,000 000	0,000 000
X2	2 802,899 902	0,000 000

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0,000 000	0,570 000
3)	0,000 000	0,210 000
4)	1 492,900	0,000 000
5)	5 295 971,5	0,000 000

Se observa que los resultados de este modelo proyectan una producción potencial significativamente superior a todas las alternativas posibles, lo que se inserta en el programa de recuperación cafetalera antes comentado.

La investigación realizada tiene gran importancia, el modelo de optimización planteado permitiría decidir en forma óptima la cantidad de canteros de los cultivos con el fin de obtener el máximo beneficio económico. Se conseguiría dar una significativa respuesta a la problemática principal existente la relación ganancia – costo al incrementarse la producción de éstos cultivos. El modelo utilizado, también permite evaluar rápidamente los escenarios que se requieran considerar en una toma de decisiones, una herramienta muy útil cuando tenemos incertidumbre sobre alguna variable, como es el caso del rendimiento de los productos agrícolas para maximizar las ganancias. En fin ésta investigación tiene su principal importancia ahí, en la utilización de la programación lineal utilizando la maximización siendo una potente herramienta financiera para la toma de decisiones.

Ésta investigación lograría mayores beneficios a la sociedad al obtenerse una mejor y más completa producción, en la parte alimentaría se podría suplir muchas demandas de éstos productos que son muy saludables en la alimentación humana. Se podrían suplir más demandas y abastecer más los mercados y la industria turística que abastece la empresa . Tiene un gran valor en el aporte a la economía ya que no sólo que permitiría la maximización de las ganancias de los cultivos empleados sino que se lograría implementar con más fuerza una mejoría económica a nivel completo utilizando en un futuro la maximización de las ganancias de todos los productos existentes en el organopónico hasta se podría buscar una asignación eficiente de los recursos más escasos.

Referencias Bibliográficas

A. S. Panda y S. Nath, Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return, Agricultural water management, vol. 115, pp. 267- 275, 2012.

A. S. Panda y S. Nath, «Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return, Agricultural water management, vol. 115, pp. 267- 275, 2012.

Alonzo, A. Colegio de Post graduado. (2004). Producción de Col, Coliflor, acelga, apio y lechuga.

Altieri, M. A. y Nicholls, C. I. 2009. Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas, LEISA revista de agroecología, vol. 14, pp. 5- 8.

Alvarado Boirivant, J. (2009). La programación lineal aplicación en las pequeñas y medianas empresas. Rev. Reflexiones 88 (1): 89 – 105.

Alzate, P. (2018). Investigación de operaciones: conceptos fundamentales. Ediciones de la Universidad.

Anderson, D, Sweeney, D, & Williams, T (2016). Métodos cuantitativos para los negocios (13th ed.), Cengage Learning.

Aparicio, V et al. (1998). Plagas y enfermedades en cultivos hortícolas de la provincia de Almería: control racional. Informaciones Técnicas 80/98. Consejería de Agricultura.

Blanco, M, Muñoz, F., & Palacio, O. (2017). Optimización de portafolio de proyectos a través de la aplicación de programación lineal y el CAPM. Revista Ciencias Estratégicas.

Bohemia 2011. Col china en la mantequilla.

Boussard, J. M. (1977). Estudios de programación lineal aplicada al sector

agrario en países no socialistas: una revisión. *Rev. Agricultura y Sociedad* 5: 9 – 49.

Boyd, S., Boyd, S. y Vanderberghe, L. 2004. *Convex Optimization*, Cambridge University press.

Cabrera, E. (2017). *Modelos de programación lineal. Guía para su formulación y solución*. Lima, Perú: Fondo Editorial de la Universidad de Lima.

Castellanos R., J.Z. (1980). La importancia de las condiciones físicas del suelo y su mejoramiento mediante la aplicación de estiércoles. *Seminarios Técnicos* 7 (8); 32 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Torreón Coahuila, México.

Catrileo S., Adrián, Véjar M, Max, & Rojas G., Claudio. (2003). Production strategies to maximize the gross margin on a traditional crop-livestock system of the dryland of the IX Region. *Agricultura Técnica*, 63(3), 240- 250.

Collado, E., Fossatti, A. y Sáez, Y. 2018. Smart farming: A potential solution towards a modern and sustainable agriculture in Panama, *AIMS Agriculture and Food*, vol. 4, nº 2, pp. 266- 284. Costa Rica.

Cuevas, CF Contabilidad de Costos 2001

De la Hoz, E., Vélez, J., & López, L. (2017). Modelo de Programación Lineal Multiobjetivo para la Logística Inversa en el Sector Plástico de Polipropileno. *Información Tecnológica*, 28(5), 31- 36.

Díaz J. (2018). “El agua en Cuba: Un desafío a la sostenibilidad”. *Revista de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Volumen XXXIX, No. 2, p. 46-59. La Habana, Cuba. ISSN 1815–591X.

Duckstein, L., Treichel, W., Magnouni, S. (1994). Ranking groundwater management by multicriterion analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management* 120(4):546- 565; jul.- ago. 1994.

E. Castillo, O. Delgado, H. De León, L. Escartín, Y. Saéz y Collado, E. 2021. "Mejoramiento del uso del suelo en la agricultura mediante herramientas basadas en optimización", Revista de I+D Tecnológico, vol. 17, no. 2, pp.

Egúsqüiza, R.; Catalán W. 2011. Guía Técnica, curso taller, Manejo Integrado de Papa. Universidad Agraria la Molina, Lima, Perú

Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J., & Weatherford, L. (2000). Investigación de operaciones en la ciencia administrativa (5th ed.). Prentice Hall Inc.

Ezzati, R.; Khorram, E.; Enayati, R. 2015. A new algorithm to solve fully fuzzy linear programming problems using the MOLP problem. Applied Mathematical Modelling 39(12): 3183- 3193.

Fafchamps, M y J. Pender (1997). "Precautionary Saving, Credit Constraints, and Irreversible Investment: Theory and Evidence From Semi-Arid India". En: Journal of Business and Economic Statistics, April 1997, Vol.15, No.2: 180- 194.

Flores-Tapia, C., & Flores-Cevallos, L. (2018). Investigación Operativa. Fundación Los Andes.

Flores-Tapia, C., Flores-Cevallos, L., Mera, R., & Garcés, C. (2016). Método simplex de programación lineal aplicado al caso Comercial Gutiérrez. I Congreso Internacional de Gestión Empresarial.

Galindo, M. (2016). Producción de alimentos apoyada con programación lineal. Universidad Rafael Landívar.

García, J, M (2008). Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.

Gerald, D., Ksenia, B., Wei-Kun, C., & Leon, E. (2020). The SCIP Optimization Suite 7.0.

González, A. (2003). Manual práctico de Investigación de Operaciones. Ediciones Uninorte.

H. Setälä, R. D. Bardgett, K. Birkhofer, M. Brady, L. Byrne, P. D. Rüter, F. D. Vries, C. Gardi, K. Hedlund, L. H. L y S. Hotes, «Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services,» Urban ecosystems, vol. 17, nº 1, pp. 239- 253, 2014.

Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. (2001). Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. PAST [Software]. Version 4.07b. Norway: Paleontological Museum, University of Oslo. Palaeontologia Electronica. 4(1):1- 9.

Heizer, J., & Render, B. (2020). Process Strategy. In Operations Management (7ma.). Prentice Hall Inc.

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la Investigación.

Hidalgo, B. C. 2019. Sistema de programación lineal: Un Apoyo a la producción de la Pequeña Agricultura

Hiller, F. y Lieberman, G. (2010). Introducción a la Investigación de Operaciones.

Hincapié, R., Granada, M & Gallego, R. (2008). "Planeación óptima del sistema eléctrico de la ciudad de Pereira usando una metodología matemática exacta". Revista Ingeniería Universidad de los Andes, Volumen 28, pp. 51 - 58.

Horngrén, Charles T., (2005) Contabilidad de costos. La Habana. Editorial Félix Varela.

Infoagro. 2007, El cultivo de acelga

INFOAGRO 2002 origen, taxonomía y descripción botánica de la col china.

Infoagro, 2008 pH de la col china .

Infojardin , 2005 minadores de hojas de la col china.

Izar, J. (2012). Investigación de Operaciones. México: Trillas

Jaramillo, E.J. Cipriano,N, . Díaz, A . 2006 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - CORPOICA. Centro de Investigación La Selva Rionegro, Antioquia, Colombia.

Josep Gascon. (2002, Febrero). Geometría sintética en la ESO y analítica en el Bachillerato. ¿Dos mundos completamente separados?. SUMA, 39, 16p.

Kamlesh, M y Solow D. 1996. Investigación de Operaciones. México, Prentice Hall. 977 p.

Koppert Biological Systems 2012. Control biológico y polinización natural para agricultores profesionales.

Lieberman H. 2006. Introducción a la Investigación de Operaciones. 8va. ed. México, Interamericana Editores S.A. de C.V. 1021 p.

Limerin, 2000. Biblioteca del campo Manual Agropecuario. Grupo océano, 2002. Enciclopedia Práctica de la Agricultura y la Ganadería, MMI, Editorial OCEANO.

Maocho 2012 siembra de la col china

Maroto, J.V. (1995). Horticultura herbácea especial. Ed. Mundi- Prensa. Madrid.

Martínez, I., Vértiz, G., López, J., Jiménez, G. y Moncayo, L. (2014).

Investigación de Operaciones.

McGraw Hill. Hillier, F., & Lieberman, G. (2015). Introduction to Operations Research (10th ed.).

Microsoft. (2021). Microsoft Office Excel- Solver.

Moya Navarro, M. Javier. (1998). Programación Lineal. EUNED. San José. 264 p.

Moya, M. (2003). Investigación de Operaciones - la Programación Lineal (3rd ed.). Universidad Nacional a Distancia Costa Rica.

Mujica A. et al (2008). Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Chile.

Nelson, G., Koo, J., Robertson, R., Sulser, T., Zhu, T., Ringler, C., Msangi, S. y et. al. 2009. «Cambio climático: el impacto en la Agricultura y los costos de adaptación. Política alimentaria. Informe,» Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias, Washington, EUA.

Neuner, Jon J.W., (1975) Contabilidad de Costos. Ciudad de La Habana. Editorial pueblo y educación.

Ortega- Gaucin, David, Mejía Sáenz, Enrique, Palacios Vélez, Enrique, Rendón Pimentel, Luis, & Exebio García, Adolfo. (2009). Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. Terra Latinoamericana, 27(3), 219- 226.

Ospina (1998). Guía práctica de horticultura. México D.F. p. 56.

Pelta, D.A.; Verdegay, J.L.; Cadenas, J.M. 2012. Introducing SACRA: A Decision support. Applied Decision Support with Soft Computing 124: 391- 401.

Pereira , J, 2000. Cultivo y comercialización de hortalizas. Colección agronegocios. Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla. 356 pp

Prawda, J. (2004). Métodos y modelos de Investigación de Operaciones. Limusa.

Render, B y Heizer J. 1996. Principios de administración de operaciones. México. Prentice Hall. 624 p.

Render, B., Stair, R., & Hanna, M (2012). Métodos cuantitativos para los negocios (11th ed). Pearson.

Render, B., Stair, R., Hanna, M, & Hale, T. (2016). Métodos cuantitativos para los negocios. Pearson.

Robbins, S. (2015). Administración (12th ed.). Pearson Educación.

Rodríguez D., Colque T., Mujica A., Apaza V., Jacobsen S. (2008). Producción de Biol, Abono líquido natural y ecológico.

Roldan, F. 2009. Nabo de Campo

Roldán, P. N. (2019, enero 3). Modelo matemático.

Romero L., María del R., A, Trinidad S. , R. García E. y R. Ferrara C. (2000). Producción de biomasa microbiana en el suelo con abonos Orgánicos y minerales. España. Agrocienca 34:261- 269.

Saaty, T. (1980): Multicriteria Decision Making - The Analytic Hierarchy Process,

McGraw- Hill, Nueva York Sawaragi Y., Nakamori Y. (1992). Shinayakana Systems Approach in Modeling and Decision Support. Proceedings of the 10th International Conference on Multiple Criteria Decision Making, v. 1. Pp. 77- 87.

Taipei

SAGARPA (Secretaría de agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, de Estados Unidos de México). 2015. Ficha técnica del cultivo de la Caña de azúcar. México.

Serrano, Z. (1996). Veinte cultivos de hortalizas en invernadero. Ed. Zoilo Serrano

Seymour, A. (1999). El Horticultor autosuficiente. 5ta Edición. Editorial AEDOS, España. P. 34.

Suárez, F. (2015). Técnicas de programación lineal entera para la optimización de la recolección de residuos reciclables en el Municipio de Morón.

Suñé, Fonollosa, y Fernández. (2016). Programación lineal: Métodos cuantitativos para la toma de decisiones.

T. Klein, A. Holzkämper, P. Calanca, R. Seppelt y J. Fuhrer, «Adapting agricultural land management to climate change: a regional multi-objective optimization approach,» Landscape ecology, vol. 28, nº 10, pp. 2029- 2047, 2013.

Taha, H. (2017). Investigación de operaciones (Vol. 10). Pearson Educación.

Terranova. (1995), la siembra como factor de producción. En curso hortalizas, ICA. Universidad de Tolima. Co. P.28 - 37.

Ulloa, L., & Protti, M. (2005). Investigación de Operaciones. Universidad Nacional a Distancia

Vergara-Mbreno, E.; Rodríguez-Novoa, F.; Saavedra-Sarmiento, H. 2006.

Métodos de optimización lineal difusa para la planificación nutricional en granjas avícolas. Mosaico Científico 3: 16- 29.

Warren, L. (2009). Uncertainties in the Analytic Hierarchy Process. AR- 013- 275

Weber, Jean E. (1984). Matemática para Administración y Economía. Editorial Hala. México. 823 p.

Maino, M., J. Berdegué, and T. Rivas. (1993). Multiple objective programming. An application for analysis and evaluation of peasant economy of the VIII Region of Chile.

Winston, W. (2004). Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos. Vol. 4a. Thomson.

Winston, Wayne L. (2005). Investigación de Operaciones. : Thomson

Anexos

Tabla 1 Gast o por cada m³ de cant ero o

Cult ivos	Col China	Acelga
Agua \$	1.78	1.78
Abonos \$	3.00	3.00
Semilla \$	2.00	0.64
Gast os \$	6.78	5.42

Tabla 2 Ganancia t otal por cant ero o (cant eros de 60 m³)

Cult ivos	Col China	Acelga
Gast o por cant ero (\$)	406.80	325.80
Rendimient o en (kg) por cant ero	300	180
Vent a del (kg)	20	15
Rendimient o económic o por cant ero (\$)	6000	2700
Total de ganancia por cant ero (\$)	5593.20	2374.80
Plan de producció n en (kg)	12000	10800

Hoja de cálculo con el complemento solver de Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		X1	X2			Limite	Holgura					
2	cantidad canteros	218	60									
3	Utilidad	5593,20	2374,80	1361805,60						x1	col china	
4										x2	acelga	
5	Restricciones											
6	canteros	1	1	278,00 <	278	0						
7	plan de prod x1	300		65400,00 >	12000	-53400,00						
8	plan de prod x2		180	10800,00 >	10800	0				1219317,6		
9										142488		
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												