UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMIA

"ANALISIS DE SISTEMAS Y SU APLICACION POR PROGRAMACION LINEAL EN EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSION"

TESIS

PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE AGRONOMIA DE LA

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

DAVID HAROLDO JUAREZ QUIM

En el acto de investidura como

INGENIERO AGRONOMO

En el grado académico de

LICENCIADO EN CIENCIAS AGRICOLAS

ASESOR: ING. AGR. Msc. VICTOR CABRERA CRUZ

Guatemala, Noviembre de 1983

D. L.
01
T(755)

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

Dr. EDUARDO MEYER M.

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

Decano:	Ing. Agr. César Castañeda S.
Vocal 1o.	Ing. Agr. Oscar Rene Leiva
Vocal 2o.	Ing. Agr. Gustavo A. Méndez
Vocal 3o.	Ing. Agr. Rolando Lara Alecio
Vocal 4o.	Prof. Héber Arana Quiñonez
Vocal 5o.	Prof. Francisco Muñoz N.
Secretario	Ing. Agr. Rodolfo Albizúrez

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

Decano:	Dr. Antonio Sandoval S.
Examinador:	Ing. Agr. Rolando Aguilera
Examinador:	Ing. Agr. Rolando Aragón C.
Examinador:	Ing. Agr. Manuel Martínez
Secretario a.i.:	Ing. Agr. Carlos Fernández

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMIA
Ciudad Universitaria, Zona 12.
Apartado Postal No. 1545
GUATEMALA, CENTRO AMERICA

Referencia ....
Asunto ....

24 de Noviembre de 1983.

Ing. Agr. César Castañeda S.
Decano Facultad de Agronomía,
Su Despacho.

Señor Decano:

Atentamente me dirijo a usted, para informarle que de acuerdo a la designación emanada de esa Decanatura, he procedido a asesorar y revisar el trabajo de tesis titulado: "ANALISIS DE SISTEMAS Y SU APLICACION POR PROGRAMACION LINEAL EN EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSION," realizada por el Perito Agrónomo: David Haroldo Juárez Quim, - como requisito previo a optar el título de Ingeniero Agrónomo, en el grado académico de Licenciado en Ciencias - Agrícolas.

Sobre el particular me permito informarle, - que encuentro el trabajo satisfactorio y llena los requisitos académicos para ser aprobado como tesis de grado.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Agr. Victor Cabrera Cruz
A S E S O R.

Ing.VCC:bsc.

Guatemala,
Noviembre de 1983.

Señores
Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador

De conformidad a lo que establece la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de tesis -- titulado:

"ANALISIS DE SISTEMAS Y SU APLICACION POR PROGRAMACION LINEAL EN EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSION".

Presentándolo como requisito previo a optar el Título de Ingeniero Agrónomo en el grado Académico de Licenciado en Ciencias Agrícolas.

Respetuosamente,

P.A. David Haroldo Juárez Quim.

ACTO QUE DEDICO

A DIOS:	SUPREMO CREADOR Y DADOR DE TODA FELICIDAD
A MIS PADRES:	ARNOLDO JUAREZ Y. ROGELIA QUIM DE JUAREZ
A MI ESPOSA:	LUBIA MARINA
A MI HIJO:	EDDER DAVID
A MIS HERMANOS:	ENRIQUE Y SAYDA ANIBAL BALDOMERO CARLOS WILFREDO EDGAR DANILO
A MI SOBRINA:	SAYDA AMARYLLIS

A MIS FAMILIARES EN GENERAL

A LA FAMILIA GUERRERO DE LA CRUZ

A LA SEÑORA: ISABEL DE LA CRUZ DE GUERRERO

A MIS COMPAÑEROS DE LA SUB-AREA DE MATEMATICA Y FISICA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA:

VICTOR M. TELLO
WALDEMAR NUFIO R.
EDWIN ZAPAROLLI T.
ELMER V. SALAZAR
ERICK JACOBS

AL DEPARTAMENTO DE BECAS DE LA USAC

A MIS AMIGOS EN GENERAL

TESIS QUE DEDICO

A GUATEMALA

A SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

A LA FACULTAD DE AGRONOMIA

A LA ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA Y RECURSOS HIDRAULICOS (ERIS)

A LA SUBAREA DE MATEMATICA Y FISICA DE LA FAC. DE AGRONOMIA

AL INSTITUTO TECNICO DE AGRICULTURA

AL INSTITUTO NORMAL MIXTO DEL NORTE "ERP" DE COBAN A.V.

A LA ESCUELA CARLOS PONCE ARCHILA, DE CHAMELCO, A.V.

AL GRAN CAMPESINADO TRABAJADOR.

AGRADECIMIENTOS

Expreso a todas aquellas personas que colaboraron conmigo para que el presente trabajo sea una realidad, mis más -- sinceros agradecimientos, especialmente a:

Ing. Agr. Msc. Víctor M. Cabrera Cruz por su desinteresada y valiosa orientación, asesoría y revisión del presente trabajo de tesis.

Ing. César Gomez Cruz por su colaboración al proporcionar los datos necesarios para la presente investigación.

Ing. Sergio Silva por permitir el uso del computador H.P. de la Empresa "TELECTRO S.A." y por sus valiosas sugerencias.

Ing. Víctor M. Tello Duque por su orientación y valiosas - sugerencias.

Ing. Luis M. Reyes por su colaboración en la grabación del programa Simplex para el centro de cómputo de la facultad- de Agronomía.

Br. Francisco de la Peña por las figuras de la presente tesis.

Ing. Marino Barrientos por el material bibliográfico enviado.

A la señorita Catalina Galán y al Sr. Julio Hernández por- su eficiencia y dedicación en el trabajo mecanográfico.

Br. Gilson Santizo por su desinterezada colaboración.

CONTENIDO GENERAL

INDICE DE CUADROS

INDICE DE FIGURAS

RESUMEN

El conocimiento cada vez más amplio sobre los componentes que definen un sistema, no ha sido suficiente para resolver los diversos problemas sociales, económicos, ecológicos y de cualquier índole que afectan al hombre.

Por lo anterior, es necesario complementar el enfoque individual y detallado de los componentes con un estudio integral o de sistemas, ya que éste emplea el conocimiento que se tiene de las partes para estudiar el comportamiento de todo un conjunto de subsistemas que interaccionan entre si; con el objeto de hacer un uso más eficiente de los recursos.

En el presente trabajo de tesis, se conceptualizó inicialmente el fundamento teórico general del enfoque de sistemas. Posteriormente se realizó una evaluación hidráulica y económica de dos métodos de diseño de una red de distribución de riego por aspersión que persiguen el mínimo costo anual; mediante la aplicación de los mismos al diseño del proyecto de riego por aspersión para la Aldea Marajuma, Municipio de Morazán, Departamento del Progreso, debido a que la estructura de la red se presenta ramificada y compleja.

Los métodos evaluados son el Simplificado o de las Diferencias y la técnica del Análisis de Sistemas por programación lineal.

Cesar Gomez Cruz en su trabajo de tesis de grado, desarrolló un estudio de factibilidad para la introducción de un sistema de riego por aspersión para la Aldea Marajuma. Gomez en el diseño de la red usó el método Simplificado, reportando en sus resultados un costo anual de Q. 1593.00 pa-

ra la tubería y Q. 23285.66 para operación de la bomba, -- significando en total Q. 24878.66 anuales para un area potencialmente irrigable de 49 Has.

El diseño obtenido con la técnica de optimización de sistemas presenta resultados hidráulicos y económicos que difieren del diseño de Gomez, esencialmente en la elección de diámetros de tubería para las diferentes secciones de la red; no así con la altura de presión de la bomba que corresponde aproximadamente al mismo valor.

Con programación lineal usando costos de Gomez, se requiere un costo anual de Q. 1279.17 para los tubos y Q. -- 23345.87 para operar la bomba, equivaliendo a Q. 24625.04 anuales.

En función de lo anterior, inferimos que programación lineal representa un ahorro de Q. 253.62 en el costo anual de la red, lográndose por lo tanto con el análisis de sistemas el mínimo costo anual.

El costo anual por programación lineal con precios de tubería y energía vigentes hasta Diciembre de 1983, es de Q. 24890.55, distribuidos en Q. 1544.68 para los tubos y Q. 23345.87 para la operación de la bomba.

Se recomienda usar los diámetros de tubería seleccionados por el método de optimización, y una potencia de 100 H. P. para la bomba, repartidos en dos unidades de 50 H.P., para poder operar el sistema parcialmente según las necesidades.

"ANALISIS DE SISTEMAS Y SU APLICACION POR PROGRAMACION LINEAL EN EL DISEÑO DE RIEGO POR ASPERSION."

I. INTRODUCCION.

El mejoramiento de la agricultura en cualquier país, tiene obligadamente que fundamentarse en la elevación de los rendimientos unitarios de las cosechas con un aumento mínimo de los gastos, debido principalmente a que la población crece rápidamente, requiriendo de esta manera mayores cantidades de alimentos y vestido, debiendo estos, ser producidos en una extensión más o menos constante de tierras dedicadas a la producción agrícola.

Responsabilidad nuestra es la producción y adaptación de innovaciones para lograr el objetivo de elevar rendimientos unitarios al mínimo costo. Para lo anterior, es necesario usar con la mayor eficiencia posible, los limitados recursos utilizados en un proceso productivo, tratando siempre de optimizar los objetivos perseguidos en dicho proceso.

El concepto moderno de sistemas es una alternativa para solucionar el problema, debido a que el enfoque del análisis de sistemas para el planeamiento de proyectos, tiene la ventaja de unir desde un principio los aspectos económicos y de ingeniería de los mismos, permitiendo así la búsqueda de la mejor solución en términos de ciertos objetivos económicos que hayan sido especificados (García, 1973). Dado que una de las características generales de los países en desarrollo, es la escasez de capital de inversión, es de suma importancia para los mismos que el diseño y evaluación de proyectos se haga con relación a sus esfuerzos de desarrollo.

Un tipo especial de problema relacionado con el análisis de sistemas, es cuando uno de estos sistemas es analizado con el objeto de aprovechar al máximo los recursos con que se cuenta, de hacer un uso más eficiente de ellos y utilizar la tecnología disponible para servicio del hombre. Este puede ser el objetivo natural perseguido por un cambio en la operación o por el diseño de un sistema.

Las características más importantes de la versión moderna del análisis de sistemas, con su aplicación como herramienta de uso general y la metodología que ha sido desarrollada durante las dos últimas décadas, así como su aplicación a sistemas cada vez más complejos e interdisciplinarios.

La Agronomía es una de estas disciplinas, ya que en este campo, para resolver de una forma óptima muchos problemas, es necesario analizar no solo elementos, sino básicamente interrelaciones de estos, lo que implica la necesidad de enfocarlos desde el punto de vista de sistema.

Una aplicación es en el diseño de redes de sistemas de riego por aspersión. El desarrollo de la agricultura baja riego, tiene actualmente gran importancia, porque mediante técnicas se puede incorporar a la producción, algunas áreas que dadas las deficiencias del recurso natural agua, son actualmente improductivas. Por otra parte , en áreas que por la exigencia o alto requerimiento de agua por los cultivos, y una mala distribución del régimen de lluvia, se hace necesaria la suplementación de dicho curso.

Uno de los métodos de riego mas versátiles y adaptable a un gran número de condiciones topográficas es el riego por Aspersión. A pesar de sus múltiples ventajas, hacer realidad un proyecto de esta naturaleza implica una inversión considerable; razón por la cual muchos proyectos no llegan a ejecutarse. Es por lo tanto, urgente la necesidad de realizar diseños donde consideremos, no solo aspectos hidráulicos sino también económicos, de tal manera de obtener diseños eficientes al mínimo costo.

Los aspectos más importantes en el diseño de este sistema, - es el correspondiente al diseño de la red de distribución y la -- presión de la bomba, ya que son los elementos que más influyen en el costo anual del sistema. Interesa seleccionar diámetros de tubería de cada una de las secciones de la red, de tal forma que el costo anual de los tubos más el costo anual de operación de la -- bomba, sean mínimos.

Dos métodos que persiguen ese objetivo son: el de igualar - el costo de la energía y costo del tubo, también llamado método - Simplificado o de las diferencias, y el uso de Programación li--- neal.

Gómez (1983) dice que la aldea Marajuma, Municipio de Morazán, El Progreso; ha tenido el problema de la escacés de agua para el riego de las áreas aptas para cultivo. Debido a esa necesidad, Gómez (1983) realizó un estudio de introducción y diseño de riego por Aspersión para dicho lugar. Para el diseño de la red usó el método simplificado o de las diferencias. Para la presente investigación se selecciona el mismo sistema, para discutir -- las conclusiones de ambos métodos.

Consideramos indispensable para aplicar una técnica de análisis de sistemas inicialmente; conocer los fundamentos más importantes sobre la teoría de sistemas, es por ello, que uno de los - objetivos de la presente investigación es proporcionar los conceptos más generales sobre el mismo.

II. OBJETIVOS.

2.1 GENERALES:

a) Introducir las técnicas del análisis de sistemas - como herramienta de uso práctico en Agronomía.

b) Aportar una aplicación del análisis de sistemas por Programación Lineal al campo de la Ingeriería Agrícola.

2.2 ESPECIFICOS:

a) Proporcionar las bases teóricas más importantes del análisis de sistemas y familiarizarse con los principios de este como medio básico de uso general.

b) Diseño de la red de distribución del sistema de -- riego por aspersión para la Aldea Marajuma, Municipio de Morazán, El Progreso; por Programación Lineal.

c) Comparar el diseño hidráulico-económico a obtener aplicando la técnica de optimización, y el método simplificado o de las diferencias, investigación - ya realizada.

III HIPOTESIS.

La aplicación de Programación Lineal en el diseño de la red del sistema de riego por aspersión para Aldea Marajuma, Municipio de Morazán, Departamento del Progreso; difiere hidráulica y económicamente de los resultados del método simplificado, obteniéndose con la técnica de optimización el diseño más económico.

IV REVISION DE LITERATURA.

1. Concepto de Sistema:

En el siglo XVII, Leeuwenhoek citado por Gerez y Grijalva inició una revolución científica al permitir, con ayuda del microscopio, el estudio de un mundo hasta entonces invisible. En este estudio las ideas básicas de las teorías atomísticas de los griegos recibieron comprobación. Estos descubrimientos y comprobaciones dieron como resultado establecer una visión microscópica de los fenómenos naturales, en la cual el interés científico se concentra en las partes que integran un organismo, un átomo, otros.

Aun cuando son muchos los avances de la ciencia que han surgido de ese enfoque microscópico, el conocimiento, cada vez más amplio que sobre dichas partes ha proporcionado este enfoque, no ha permitido, sin embargo, resolver diversos problemas sociales, económicos y ecológicos.

No ha sido sino hasta muy recientemente que se empieza a complementar la visión microscópica con el enfoque de sistemas, el cual pone énfasis en los aspectos generales y en las interacciones entre las partes que lo integran. En tanto que en el enfoque microscópico se estudian los elementos para encontrar relaciones de causa y efecto, en el enfoque macroscópico o de sistemas se emplea el conocimiento que se tiene de las partes para estudiar el comportamiento de todo un conjunto de partes o subsistemas que interaccionan entre sí. El comportamiento de un conjunto completo de componentes está determinado tanto por las características de las partes como por la interconexión de las mismas.

En el enfoque de sistemas se integran los conocimientos que las diversas ciencias suministran acerca de los componentes de un sistema para concocer el comportamiento del conjunto. Se requiere por lo tanto integrar grupos de trabajo de carácter interdisciplinario, ya que resulta, prácticamente -

imposible que un profesional cuente con todos los conocimientos necesarios para atacar los diversos problemas que se presentan en un sistema.

Para García (1973), un sistema puede en términos generales, ser definido como un conjunto de partes (conceptos u objetos), las cuales estan interrelacionadas entre sí por cierta interdependencia. En este sentido pues, un sistema puede ser tan amplio como la naturaleza misma. Por ejemplo, el agua de una región (la cual podría ser arbitrariamente definida en términos de límites políticos, como un país): Puede - el agua estar distribuida en varias cuencas, estando interrelacionados los ríos y corrientes en cada una de ellas y existiendo también una interrelación entre el agua subterránea y superficial de las mismas. Pero cada una de estas cuencas - puede, mediante el ciclo hidrológico, estar también interrelacionada con las demás cuencas dentro de la región y aún -- con otras de distintas regiones. Esta relación inter-regional puede también surgir como consecuencia de que los límites políticos de las mismas son artificiales, en el sentido de - que generalmente no siguen los límites naturales de las cuencas. Por otro lado, el régimen del agua dentro de cada cuenca está también íntimamente relacionado con características físicas tales como el tipo de roca base, clase de suelos, cubierta vegetal y morfología de la cuenca.

El agua es utilizada por los objetos vivientes en sus - procesos vitales y, como un recurso natural, es utilizada por el hombre en una serie de usos benéficos; como por ejemplo - para cultivar otra clase de objetos, los cuales pueden estar interrelacionados entre sí y con otro tipo de objetos como - los productos manufacturados. Para hacer uso del agua, el - hombre construye una serie de obras, las cuales introducen - aún otro tipo de interrelaciones. Así, los usos benéficos - del agua están asimismo relacionados con las instituciones y estructuras políticas, económicas y sociales del hombre. En conclusión, se puede afirmar que bajo este punto de vista, -

un sistema de recursos de agua tiene muchos aspectos además del puramente hidrológico: es también físico, biológico, socio-político, legal y económico.

En función de lo anterior, Hart (1973) dice que para definir los límites de un sistema hay que tomar en cuenta dos aspectos; el tipo de interacción entre componentes y el nivel de control sobre las entradas y salidas del sistema.

Según Hart (1979), en el desarrollo de teorías de sistemas han surgido dos orientaciones, una de ellas enfoca el estudio de sistemas de ingeniería y la otra el estudio de sistemas con componentes creados por el hombre y la segunda de sistemas con componentes naturales.

2. Elementos de un Sistema:

Hart (1979) conceptualiza un sistema como una entidad -- compuesta de los siguientes elementos:

a) Componentes
b) Interacción entre componentes
c) Entradas
d) Salidas
e) Límites.

Los componentes de un sistema son los elementos básicos (la materia prima) del sistema. Si se analiza un sistema de riego por aspersión; la motobomba, tubería principal secundaria, aspersores y otros, son los componentes del sistema. La interacción entre los componentes es lo que proporciona las características de estructura y forma a la unidad; es función del número de componentes, tipo de componentes y arreglo entre los mismos. En esto reside la diferencia entre el con--

junto de tuberías y el sistema de riego propiamente. El proceso de recibir entradas y salidas es lo que define la función de un sistema. Un sistema de riego por aspersión recibe energía del combustible (entrada) y produce energía de presión (salida) en el flujo que sale de los aspersores para distribuirse en forma de lluvia sobre el cultivo.

Esquemáticamente, un sistema es definido como:

$$\xrightarrow{X} \boxed{\emptyset} \xrightarrow{Y}$$

X = Excitación (insumo, entrada, otros)
Y = Una respuesta (salida)
Ø = Operador que transforma las entradas en salidas.

El operador es una función, cuyo dominio es el conjunto "X" de todas las posibles entradas o excitaciones al sistema, y cuyo contradominio es el conjunto "Y" de salidas o respuestas. Esta función pues, asigna a cada elemento x X, un elemento y Y, recibiendo el nombre de "función de respuesta del sistema".

Según el concepto anterior, como ejemplos de sistemas pueden citarse los siguientes:

a) Una simple enumeración de pares relacionados:

(x,y)

b) La probabilidad de un evento A, v.g

P(a) = 0.3

$$\xrightarrow{A} \boxed{\emptyset = P} \xrightarrow{0.3}$$

c) Una planta de tratamiento de aguas negras.

$$\xrightarrow[\text{DBO}]{150\ \text{ppm}} \boxed{\emptyset} \xrightarrow[\text{DBO}]{16\ \text{ppm}}$$

Ø = los procesos que remueven el DBO

3. Clasificación de Sistemas:

Escobar (1976) cita en su trabajo de tesis la siguiente clasificación:

3.1 Físicos: Son los que existen en el mundo real.

3.2 Secuenciales: Sistemas físicos en los cuales algún medio (materia, energía, información, y otros) pasa a travéz del sistema.

3.3 Determinísticos y estocásticos: Las condiciones bajo las cuales obtenemos la respuesta de un sistema puede ser:

a) Bajo condiciones de riego: Podemos tener una serie de respuestas con probabilidad conocida.

b) Bajo condiciones de certeza: Seguridad de una respuesta.

c) Bajo condiciones de incertidumbre: Una serie de respuestas con probabilidades desconocidas (casi todos los casos reales).

Entonces podemos decir que los sistemas determinísticos son aquellos que trabajan bajo condiciones de certeza y los sistemas probabilísticos o estocásticos trabajan bajo condiciones de riesgo e incertidumbre.

3.4 Estáticos y Dinámicos: Los sistemas dinámicos los identificamos cuando reciben entradas cuantitativas y actúan dentro de ciertas restricciones para producir salidas cuantitativas; Estáticos cuando no lo hace.

3.5 Permanentes y no permenentes: Un sistema es permanente o invariante con el tiempo, cuando la forma de salida depende solo de la forma de entrada y no de la definición de un orígen para los tiempos.

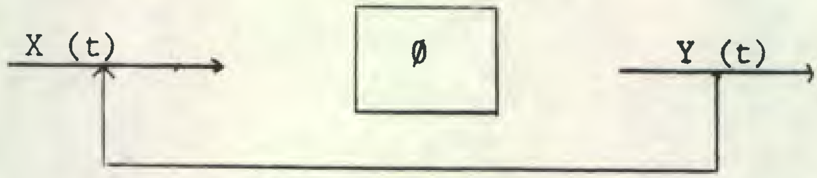
Por ejemplo:

$$\underline{X\ (t)} \longrightarrow \boxed{\ \emptyset\ } \longrightarrow \underline{Y\ (t)} \qquad Y\ (t) = \emptyset\ (t) \Big[X\ (t) \Big]$$

$$\underline{X\ (t+T)} \longrightarrow \boxed{\ \emptyset\ } \longrightarrow \underline{Y\ (t+T)} \qquad Y\ (t+T) = \emptyset\ (t+T) \Big[X\ (t+T) \Big]$$

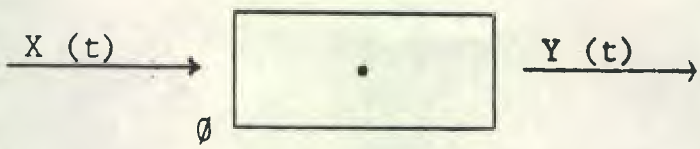
$$\emptyset\ (t) = \emptyset\ (t+T)$$

3.6 Abiertos y cerrados: Un sistema abierto es cuando el operador Ø es independiente de la salida y (t). Un sistema cerrado será aquel cuando tenemos que el operador Ø depende la salida y (t) o sea que cuando se tiene una retroalimentación.



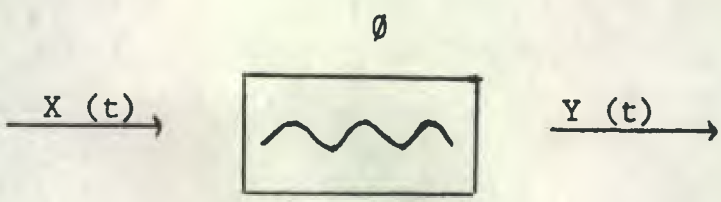
retroalimentación

3.7 Aglutinados y distribuidos: El sistema aglutinado lo - tenemos cuando se consideran todos los componentes del sistema como concentrados en un solo punto del espacio, o sea que solo nos interesa el conjunto total del siste ma, (la caja negra) y no sus partes.



Concentrado en
sólo un punto del espacio.

Distribuídos cuando nos interesa cómo se distribuyen -- los componentes dentro de esta caja.



Como se distribuyen

3.8 Contínuos y discretos: Un sistema contínuo lo tenemos cuando las funciones presentes son funciones de una variable independiente contínua, que puede ser definida en todos los valores de ésta, en un rango dado. Mientras que Discretos cuando solo son definidos a lo largo de una secuencia de valores discretos de la variable independiente.

3.9 Simples y Múltiples: Un sistema es simple cuando tiene una sola salida y una sola entrada.

$$\xrightarrow{X\ (t)} \boxed{\emptyset} \xrightarrow{Y\ (t)}$$

Sistema múltiple será cuando tenga varias salidas y varias entradas.

$$\begin{array}{lcl} X_1\ (t) \longrightarrow & & \longrightarrow Y_1\ (t) \\ X_2\ (t) \longrightarrow & \boxed{\quad \emptyset \quad} & \longrightarrow Y_2\ (t) \\ X_n\ (t) \longrightarrow & & \longrightarrow Y_n\ (t) \end{array}$$

4. Función de un Sistema:

Para Hart (1979) la función de un sistema dado siempre se define en términos de procesos. La función está relacionada con el proceso de recibir entradas y producir salidas. Este proceso se puede caracterizar usando criterios diferentes, pero tal vez los más importantes son:

4.1 Productividad
4.2 Eficiencia
4.3 Variabilidad

La producción bruta de un sistema es una medida de las salidas de un sistema. La producción neta de un sistema es la cantidad de las salidas, restando las entradas (producción neta=producción bruta - entradas).

La variabilidad es un concepto que toma en cuenta la probabilidad en la cantidad de salidas.

Las características de la función, como productividad, eficiencia y variabilidad son un resultado directo de las características de estructura de un sistema. Hart (1978) señala que hacer el análisis de un sistema, no es sino tratar de relacionar la estructura con la función de ese sistema.

5. Análisis de Sistemas:

Tradicionalmente se ha prestado atención por separado a cada uno de los componentes de un sistema, pero muy raras veces las interrelaciones que existen entre ellos han sido objeto de un análisis completo y sistemático. Estas interrelaciones, si mucho, han sido únicamente reconocidos o bien tratadas en forma cualitativa, ya que los métodos de análisis existentes eran inadecuados para tal propósito. Ultimamente sin embargo, se han hecho grandes esfuerzos para tomar en cuenta explícitamente estas interrelaciones, aplicando en el análisis de sistemas los procedimientos y técnicas matemáticas desarrollados para otras disciplinas.

Dar una definición de análisis de sistemas no es tarea fácil pues el significado de dicho término es diferente según la formación de la persona que lo aplique y según la disciplina en que ésta desenvuelva sus actividades. Eris (1978) menciona las siguientes definiciones:

a) El estudio analítico de sistema tomando el término en su sentido más general, en el cual el análisis se basa fundamentalmente, pero no exclusivamente, en métodos físicos y matemáticos.

b) La aplicación de técnicas matemáticas especiales - en el planeamiento.

c) El arte y ciencia de seleccionar, entre un gran nú mero de posibles alternativas, aquel conjunto de - acciones que lleven el mejor cumplimiento de los - objetivos especificados, dentro de las restricciones impuestas por la ley, moral, economía, recursos, presiones socio-políticas y leyes físicas y naturales.

d) Método científico para la solución de problemas en administración, involucrando:

   d.1 Enfasis en la toma de decisiones
   d.2 Evaluación bajo un criterio de efectividad económica
   d.3 Uso de un modelo matemático
   d.4 Uso de computadores electrónicos.

e) Método científico para la toma de decisiones, involucrando la operación de sistemas.

f) La solución y evaluación de entidades cuya respuesta a un proceso excitativo se efectúa de acuerdo a alguna ley física.

De manera similar, diferentes términos han sido y son - usados. Se oye, por ejemplo, hablar de Ingeniería de sistemas, método de sistemas, Técnicas de optimización, simula--

ción, investigación de operaciones, ciencia administrativa, y otros.

El análisis de un sistema requiere una serie de pasos lógicos para satisfacer el propósito de definir objetivamente la relación entre la estructura y la función del sistema bajo estudio.

El enfoque del análisis de sistemas es básicamente el del método científico. Incluye, según Hillier y Lieberman citados por García (1973), cuatro pasos esenciales, los cuales pueden describirse de la siguiente manera:

5.1 Formulación del Problema: En este primer paso se identifican todos los elementos que constituirán el sistema, así como sus interrelaciones. Se definen los objetivos y restricciones que han de enmarcar la solución al problema, así como todos aquellos elementos que podrán ser objeto de modificaciones con el fin de alcanzar los objetivos fijados. Constituye un paso básico, del cual puede depender el éxito o fracaso del análisis, en términos de la aplicación de los resultados del mismo al caso real.

5.2 Construcción del Modelo: Es necesario idealizar la representación de las principales características del problema, lo que en este caso se logra mediante expresiones matemáticas. Es decir, mediante un modelo matemático que, indudablemente, contendrá una serie de suposiciones y simplificaciones. Por tal motivo es necesario poner especial cuidado en que el modelo siga ofreciendo aún una representación válida del problema real, para lo cual se necesita también conocer a fondo las características del sistema bajo estudio. La función objetivo, por ejemplo, constituye una parte muy importante de este modelo, ya que es aquella expresión matemática que servirá para cuantificar el efecto que diversas alternativas ejercerán sobre el objetivo especificado, permitiendo así clasificarlas según sea dicho efecto.

5.3 Obtención de la Solución: Una vez que el modelo ha sido construído, la obtención de la solución es algo más que la mera ejecución de las operaciones mediante el computador. En efecto, antes de que la solución pueda ser implementada es necesario prevenir cualquier error, omisión, defecto o inadvertencia en el modelo con el objeto de hacerle las modificaciones del caso. Los requerimientos de datos del modelo deben ser compatibles con la disponibilidad de los mismos y la importancia relativa de los diferentes tipos de información debe ser explorada, ya sea para obtenerla cuando el caso lo amerite y sea factible, o bien para modificar el modelo.

5.4 Implementación de la Solución: Una vez que el modelo es considerado adecuado y por lo tanto la solución obtenida por el mismo satisfactoria, su implementación generalmente no será decisión de los técnicos sino más bien corresponderá a los niveles superiores de gobierno. Es de suma importancia por lo tanto, que el modelo sea lo suficientemente flexible para permitir al técnico evaluar cuantitativamente las consecuencias de diferentes decisiones. Finalmente hay que tener en mente que las soluciones obtenidas con el modelo, no serán más que aproximaciones a soluciones para el problema real. Sin embargo, proveerán una mejor base para la toma de decisiones pues como se ha dicho, una decisión tomada con más conocimientos tiene mayor probabilidad de ser co---

rrecta, que una tomada con menos conocimiento.

6. Problemas en el Análisis de Sistemas:

En el análisis de sistemas se pueden presentar varios tipos de problemas, los cuales son clasificados por la parte que tenemos que encontrar y de lo que ya contamos para resolver los problemas. Escobar (1976) señala en su investigación cinco tipos los cuales se reunen en el cuadro siguiente:

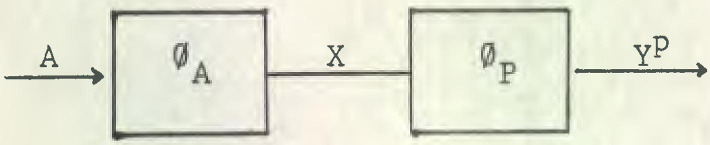
CUADRO No. 1

TIPOS DE PROBLEMAS EN EL ANALISIS DE SISTEMAS

Problema	Dado	Encontrar
Predicción (directo)	X(t); Ø	Y (t)
Detección	Y(t); Ø	X (t)
Identificación (inverso)	X(t); Y(t)	Ø
Especificación o modelación	X(t); Y(t)	Ø Modelo de operador.
Asignación (optimización)	X(t); Ø	Maximizar o minimizar una salida.

7. Problemas de Asignación y Optimización.

La asignación y la optimización van ligadas entre sí, la primera asigna y la segunda los trabaja para sacar el mejor provecho. Es decir que minimiza entradas indeseables y maximiza entradas deseables en un sistema.



A = Entrada
$\emptyset_A$ = Operador que asigna.
X = Variable de decisión.
$\emptyset_P$ = Operador que optimiza.
Y^P = Constante ya minizada o maximizada.

Lo que se busca, es escoger los valores de las entradas controlables o parcialmente controlables, de manera de maximizar las salidas deseables, o minimizar las indeseables. Para ello, es necesario contar con una medida del efecto de los valores escogidos, la cual recibe el nombre de función objetivo.

Las nuevas técnicas del análisis de sistemas permiten tomar en cuenta muchas interrelaciones que tradicionalmente han podido ser consideradas únicamente de un modo cualitativo. Permiten, asimismo, escoger de entre un gran número de alternativas, aquella que mejor cumple con los objetivos específicos del análisis. Estas técnicas, pues, requieren cuantificación y construcción de un modelo matemático.

En términos de un modelo matemático, el problema general de optimización puede entonces escribirse así:

$$\text{Min (o Max.)} \quad Z = f(x_1, x_2, \ldots\ldots\ldots\ldots\, x_n)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad gi\,(x_1, x_2, \ldots\ldots\ldots x_n) = 0$$

$$i = 1, 2, \ldots\ldots\ldots, m$$

n = número de variables de estado

m = número de restricciones

z = función objetivo.

8. Modelación;

El modelo de un sistema es una abstracción, es decir, una representación cualitativa y/o cuantitativa simplificada del sistema, y no una duplicación completa o exacta de éste. Formalmente, un modelo es un homomorfismo, lo que quiere decir que entre el modelo y el sistema real existe una similaridad superficial de la cual se deriva el valor del modelo, pero que fundamentalmente el modelo y el sistema real son de diferente estructura. Esta es la mayor debilidad del uso de modelos.

El modelado es de gran importancia porque permite estudiar el comportamiento de un sistema bajo diversas condiciones de operación, sin necesidad de construir el sistema y someterlo a las condiciones de operación real.

En ocasiones se aplica la metodología de modelado al estudio de sistemas reales ya existentes, con el objeto de determinar cuál será el futuro estado del sistema. Gerez y Grijalva (1976) ejemplifican esta aplicación del empleo de modelos en la predicción de la actividad económica de un país. En otras ocasiones estos modelos se emplean para diseñar políticas de control de la actividad económica. En el primer caso resulta clara la necesidad del empleo de un modelo y en el segundo es demasiado costoso y peligroso experimentar con políticas de control sobre el sistema real. Otro ejemplo donde es posible emplear un modelo para fines de análisis es cuando se desea investigar los efectos de sismos sobre una presa, ya que, resulta demasiado peligroso hacerlo sobre el prototipo. También se emplean los modelos en el proceso de diseño; en estos casos, la construcción de prototipos para las diversas alternativas de diseño puede tener un costo prohibitivo y es necesario evaluar las alternativas de diseño combinando los procesos de modelación y simulación. Según lo anterior los modelos matemáticos, se han convertido en una herramienta importante en el diseño, síntesis, análisis, operación y control de sistemas complejos. Un modelo matemático, es pues, un conjunto de ecuaciones, que revelan los diferentes aspectos de un sistema real, establece medidas de eficiencia y restricción e indica qué datos deberían recogerse con el fin de tratar el problema cuantitativamente.

Haimes (1973) concluye que, si la respuesta de ambos modelos (modelo de sistema real y modelo matemático) a la misma señal de entrada es idéntica (idealmente), entonces el modelo matemático que simula el sistema, es considerado verdaderamente perfecto. Sin embargo, estas dos respuestas generalmente no son idénticas y existe un error. Por lo tanto, el propósito en modelar un sistema es construir un modelo matemático de manera que el error mencionado sea mínimo.

8.1 <u>Clasificación de Modelos Matemáticos</u>: Ningún modelo puede responder a todas las preguntas que deseamos hacer, y por ello, la consideración principal al construir un modelo es definir el propósito para el cual el modelo va a servir. Debe ser evidente que se requieren modelos para diferentes propósitos. La naturaleza del sistema físico que estamos considerando determina qué clase de modelos matemáticos representará mejor el sistema. Haimes (1973) y Eris (1978) se refieren a la siguiente clasificación de modelos matemáticos:

8.1.1 <u>Modelos lineales y no lineales</u>: Un modelo lineal es un modelo que está representando por ecuaciones lineales, por ejemplo, todas las funciones de restricción y objetivo son lineales.

Un modelo no lineal es un modelo que está representado por ecuaciones no lineales, por ejemplo, parte o todas las funciones de restricción y/o la función objetivo son no lineales.

8.1.2 Modelos estáticos y dinámicos: Modelos estáticos son aquellos que no tienen en cuenta el tiempo como variable explícitamente. La mayoría del trabajo en programación lineal es con este tipo de modelo. Los problemas de optimización estática se refieren a menudo como programación matemática.

Los modelos dinámicos son aquellos que se ocupan - de las interacciones que son funciones del tiempo. Los problemas de optimización dinámica se refieren a menudo como problemas de control óptimo.

8.1.3 Modelos de parámetros distribuídos y no distribuídos: Un sistema de parámetros no distribuídos -- significa que se ignoran las variaciones y los varios parámetros y las variables dependientes del - sistema, pueden considerarse homogeneas dentro -- del sistema entero. La representación mediante parámetros distribuídos tiene en cuenta variaciones detalladas en el comportamiento de un punto al o-- tro dentro del sistema. La mayoría de los sistemas reales son sistemas de parámetros distribuídos.

8.1.4 Modelos determinísticos y estocásticos: Modelos determinísticos son aquellos en los que cada varia ble y parámetro pueden ser asignados a un número fijo o a una serie de números fijos para cualquier conjunto de condiciones dadas. Es aquel cuya formulación conlleva a la predicción exacta de lo que va a suceder en el sistema.

A los modelos que además de involucrar el elemento tiempo involucran el elemento incertidumbre se les llama modelos estocásticos. En el contexto de análisis de sistemas, estos se utilizan para manejar de una manera cuantitativa la dinámica y la incertidumbre que ocurre en el mundo real y que influencian nuestras decisiones. En general podemos decir que los modelos estocásticos contienen los mismos elementos que los determinísticos, la diferencia - se encuentra en que para cada instante de tiempo - en una variable de estado determinístico solo co-- rrespondía un valor. Para cada variable de estado estocástico corresponde una distribución deprobabilidad sobre cada uno de los valores posibles. La función objetivo que en el caso de un modelo determinístico tenía un valor para cada variable de decisión, en este caso corresponde a una lotería de valores, es decir, que a cada valor de la función objetivo corresponde una probabilidad de ocurren-- cia. Las interrelaciones entre las variables no - son fijas como en el caso de los sistemas determinísticos, sino que son funciones de correlación, - las cuales abarcan el aspecto probabilístico y el aspecto dinámico. El análisis de sistemas con un modelo estocástico se lleva a cabo analizando las estadísticas importantes de las variables de decisión y de la función objetivo. La rama científica que estudia estos modelos se llama Procesos Estocásticos y cubre análisis del tipo de proceso, funciones de correlación, covariancia, diseño de reguladores y estimadores, y la optimización de estos diseños.

8.2 Características generales de los modelos. Un modelo matemático que representa un sistema real en términos generales está definido por:

8.2.1 Conjunto de variables de decisión o de control. En general los problemas reales son muy complejos y contienen muchas variables, sin embargo, solamente le interesan al que toma las decisiones las variables que pueden ser controladas libremente, éstas son las variables de decisión del modelo matemático. Las variables que responden a las decisiones dentro del sistema se llaman variables endógenas, y las variables que representan influencias fuera del sistema se llaman exógenas.

8.2.2 Conjunto de restricciones. Las condiciones del medio exterior imponen un número de restricciones a las variables de decisión. Por ejemplo, muchas variables físicas no pueden tener valor negativo, aunque pueden tener valor cero, a estas condiciones se les llama restricciones de no negatividad. Las consideraciones acerca de la factibilidad técnica o económica también pueden resultar en restricciones el sistema. Las condiciones de restricción se dan usualmente en forma de ecuaciones y/o desigualdades.

8.2.3 Función Objetivo. En un proceso de decisión es esencial identificar los objetivos apropiados. Se introduce una función objetivo que relaciona las diferentes variables de decisión con el propósito de ordenar la bondad de cada resultado de las diferen tes decisiones que son factibles. En general, maximizamos la efectividad o minimizamos el costo del sistema según se represente en la función objetiva.

8.2.4 Solución Optima. Después de formular el problema de decisión cuantitativamente, se busca la solución optima o la mejor decisión por medio de los métodos matemáticos disponibles. La solución óptima se puede expresar por un conjunto de valores de las variables de decisión que nos conduce al objetivo deseado.

8.3 Etapas en el desarrollo de modelos. Cuando se analizan sistemas de grandes dimensiones, donde el empleo de modelos es muy frecuente, Gerez y Grijalva (1976) aconsejan seguir los siguientes pasos en el desarrollo del modelo:

8.3.1 Formulación de objetivos del modelo. Esta etapa puede considerarse como preliminar en el desarrollo de un modelo. Para realizarla adecuadamente es necesario haber establecido cómo se evaluará el comportamiento del sistema y por lo tanto, el objetivo del sistema.

8.3.2 Análisis del sistema. La finalidad de esta etapa es aislar las partes, iteracciones, relaciones y mecanismos dinámicos del sistema. Es importante establecer que variables son endógenas o internas, exógenas o externas al sistema y las variables de estado.

Los objetivos de esta etapa pueden sintetizarse de la siguiente manera:

8.3.2.1 Determinación de las fronteras del sistema.

8.3.2.2 Determinación de lo que es el medio ambiente en el que se desenvuelve el sistema.

8.3.2.3 Determinación de los elementos que constituyen el sistema.

8.3.2.4 Determinación de los elementos o actividades dentro del sistema que tiene carácterísticas retroalimentativas.

8.3.2.5 Determinación de las variables de estado del sistema.

8.3.2.6 Determinación de las leyes de transición de las variables de estado.

8.3.3 <u>Síntesis del sistema</u>. En esta etapa se integran todos los conocimientos que se tienen del sistema en un modelo que represente, de la mejor manera posible, las características del sistema de interés. Antes de proceder a la estructuración del modelo, es necesario tomar una decisión sobre el tipo de modelo que se usará para estudiar el sistema. Para ello es necesario considerar tanto el costo de los diferentes tipos de modelo, como el beneficio o información que se puede obtener de ellos. Debe escogerse el tipo de modelos que satisfaga, económicamente las necesidades de cada proyecto.

8.3.4 <u>Verificación del Modelo</u>. Consiste en determinar si este opera como su planeador ha concebido que debiera hacerlo. La manera de realizarla depende del tipo de éste. Por ejemplo, la verificación de un modelo, que es un programa de computadora, consiste en una serie de prúebas para eliminar fallas del programa, así como corridas de calibración.

8.3.5 Validación del modelo. En esta fase se comparan las respuestas obtenidas empleando el modelo ya verificado, con las respuestas correspondientes del sistema real. No siempre se puede efectuar la validación del modelo. En ocaciones, el sistema real no se encuentra disponible para efectuar pruebas, o pueden ser sumamente costosos los experimentos de validación. Desde luego que cuando no se puede realizar la validación, la fiabilidad de los resultados obtenidos con el modelo es baja. Si esta etapa no termina con exito, debe reiniciarse el proceso de creación del modelo a partir de las etapas de análisis o síntesis del sistema. Situación semejante se plantea cuando la verificación del modelo no se termina correctamente.

8.3.6 Inferencias. En esta etapa se obtienen los beneficios del esfuerzo realizado al construir el modelo.

9. Técnicas de optimización:

El concepto de Ingeniería de Sistemas, o como a menudo es mencionado como Análisis de Sistemas, incluye según Haimes (1973), dos componentes principales y básicos siguientes:

Modelación de Sistemas y
Optimización de Sistemas.

La selección de un conjunto de variables de decisiones la cual optimiza una función de actuación sujeta a las restricciones del sistema, es llamado procedimiento de optimización.

Las técnicas de optimización son solo instrumentos y estrategias que utiliza el analista de sistemas en la toma de decisiones y la solución de problemas. Las técnicas de optimización proveen al analista de las metodologías para resolver y analizar el modelo matemático proyectado para simular y representar el sistema real.

La teoría y usos de optimización de sistemas están en un proceso de desarrollo extenso y contínuo. Esto es verdad, tanto para optimización de sistemas estáticos como para sistemas dinámicos. El término optimización estática es usado cuando el sistema es descrito por conjuntos de ecuaciones algebraícas o trascendentales, mientras que el término de sistemas dinámicos se emplea para sistemas descritos por conjuntos de ecuaciones diferenciales y es comunmente llamado control óptimo.

Los métodos matemáticos para la solución de los problemas de optimización estática se refieren a menudo como programación matemática, la cual provee el marco matemático y los métodos de computación para seleccionar los programas más deseables dentro de las muchas alternativas psobles; mientras que los problemas de optimización dinámica se refieren a menudo como problemas de control óptimo.

No hay un método único para resolver el problema general de optimización. En vez, nos encontramos con un número de métodos de optimización que han sido desarrollados para varios casos especiales de las funciones objetivo y/o restricciones.

De acuerdo a lo señalado por ERIS (1978), Escobar (1976) y Haimes (1973), los problemas de optimización estática se pueden resolver mediante cualquiera de las siguientes técnicas:

9.1 Método de Cálculo: Una de las técnicas de optimización es el método del cálculo o llamado también de programación clásico,el cual nace del cálculo diferencial o sea que es en realidad el método de optimización más antiguo. Este nos determina el punto máximo o mínimo de una función objetivo, sujeta si mucho a una restricción.

9.2 Multiplicadores de Lagrange: El método de multiplicadores de Lagrange generalizados es aplicable a problemas lineales o no lineales de optimización con restricciones. Restricciones en forma de igualdades pueden manejarse usando las condiciones de Kuhn - Tucker.

Todas las funciones tienen que ser diferenciables, el método es simple y directo. Proporciona las bases para el enfoque de descomposición y optimización a la llamada propiedad saddle point. El multiplicador de Lagrange proporciona interpretaciones económicas para la solución del problema.

El método se hace impracticable para un número grande de restricciones debido al tedioso esfuerzo computacional asociado con un número grande de restricciones. También adolece de la existencia de duality gap.

9.3 Programación no lineal. Aplicada a función objetivo y restricciones no lineales. Dentro de esta podemos incluir las siguientes técnicas:

a) Búsqueda directa
b) Funciones de penalidad

c) Métodos del gradiente (Fletcher - Powell y otros)
d) Búsqueda de Fibonacci
e) Programación geométrica
f) Otros.

9.4 Programación dinámica: La programación dinámica es la optimización de un sistema que involucra una serie de - decisiones, cada una de las cuales determina las circuns tancias bajo las cuales la siguiente decisión debe tomar se, o en un sistema en serie de etapas múltiples; las e- tapas sucesivas a optimizar no necesariamente son perío dos de tiempo.

Para la solución de un sistema de una etapa y n decisiones, podría transformarse a un sistema equivalente de n eta- pas, en cada una de las cuales hay que tomar una deci-- sión.

La descomposición del problema en etapas en donde cada una es resuelta de manera secuencial, proporciona efi-- ciente computacional y simplicidad. Un aumento en el número de variables de estado lleva al problema de di-- mensionalidad. La programación dinámica convencional - está limitada generalmente a 3 variables de estado. -- Sin embargo, nuevos métodos son disponibles para evitar este problema de dimensionalidad, tal como la programa- ción dinámica con incremento y otras.

9.5 Simulación: Se define como una técnica numérica para - conducir experimentos con cierto tipo de modelos matemá ticos que describen el comportamiento de un sistema com plejo en una computadora sobre un período extenso de -- tiempo. El punto de partida para cualquier experimento de simulación con computadora es un modelo del sistema a simularse. Esto es, suponemos que el modelo ha sido anteriormente formulado y que sus parámetros han sido especificados. La diferencia principal entre una simulación y un experimento en el mundo real, es que con la simulación el experimento se lleva a cabo con un modelo del sistema real en vez de hacerlo con el sistema mismo.

Involucra el establecimiento de un modelo del sistema real y luego realizar experimentos en el modelo, tratando de contestar la pregunta:

Qué - Sí

La simulación puede llevar a cabo con:

- Computadora digital
- Computadora análoga
- Computadora híbrida (combinación de los anteriores)

La simulación en computadora digital es más precisa que la simulación en computadora análoga, pero ésta última es más rápida, y la construcción de sus modelos es más fácil.

9.6 Programación Lineal: Para Fernández (1980) los fines de una empresa pueden cpnsiderarse como inmediatos y mediatos. Su fin inmediato es, la producción de bienes y servicios para un mercado, y en efecto no hay empresa que pueda asegurar no haber sido establecida para lograr este fin. En cuanto a los fines mediatos, es decir lo que la empresa busca en esa producción, deberían clasificarse, los de la empresa privada y los de la empresa pública por separado. La empresa privada busca la obtención de un beneficio económico por medio de la satisfacción de una necesidad, y cuando ésta desaparece la empresa pierde la razón de ser y debe valerse de otros recursos para sobrevivir. En lo que se refiere a la empresa pública, ésta persigue la satisfacción de una necesidad general o social mediante el uso de los recursos disponibles, pudiendo obtener o no beneficios.

Démonos cuenta ahora, de la íntima relación que guardan los fines de una empresa con la esencia de la programación lineal resumida en esta definición:

La programación lineal trata del problema de la distribución de recursos limitados entre distintas alternativas en forma óptima, cumpliendo con un conjunto de restricciones.

Es una forma particular de programación matemática que involucra la búsqueda y selección de una solución óptima. Particularmente cuando los recursos son limitados en la programación lineal el objetivo debe ser presentado en términos de optimización, como por ejemplo, maximización de ingresos, minimización de costos, maximización de productividad.

Las raíces de la programación lineal fueron trazadas hace varias décadas, quizá cuando se intentó usar una técnica científica en la dirección de las organizaciones. Sus principios han sido generalmente atribuídos a investigaciones realizadas en la Unión Soviética y a los Servicios Militares de Estados Unidos durante la segunda guerra mundial; en ella se creó una urgente necesidad de realizar actividades y operaciones en forma más eficiente, agotando los recursos de que se disponía.

En adición al rápido avance dentro de este campo, debemos agregar que un factor importante lo forma la Revolución Electrónica, ya que se requiere de gran cantidad de cálculos para poder resolver un problema complejo, típico de programación lineal. En general en cualquier cam po que se relacione con la investigación de operaciones el uso de la computadora ha venido a simplificar dicho proceso.

Muchos ejecutivos colocan la programación lineal como uno de los más importantes logros de mediados del siglo XX, el impacto creado desde 1950 ha sido extraordinario; hoy, es una herramienta popular que ha hecho economizar grandes cantidades de dinero a compañías y negocios de tamaño moderado además de utilizarse en otros sectores del comercio en donde se está difunciendo rápidamente.

9.6.1 La programación Lineal en Agronomía. Su importancia en Agronomía se aprecia según Mena (1980), cuando se hace notar que sirve para asignar recursos limitados entre distintas actividades, para cumplir un objetivo de optimalidad. Esta es también la definición de Economía y por ello es que el campo de aplicación de la programación lineal es muy amplio.

En este campo es un instrumento valioso en la planeación de las actividades de fincas y en el uso y combinación de sus recursos. Se puede aplicar siempre que exista:

9.6.1.1 Un objetivo que perseguir; puede ser maximizar ingresos, minimizar costo, maximizar producción, otros.

9.6.1.2 Diferentes actividades posibles; cultivo de maíz, cultivo de trigo con y sin fertización, cría de cerdos, producción de forrajes, venta de granos y otros.

9.6.1.3 Un conjunto de restricciones que pueden -- ser; las cantidades limitadas de recursos disponibles en la finca tales como superficie, crédito, mano de obra, otros.

La programación lineal puede usarse para analizar el uso del crédito agrícola en las fincas, determinar planes óptimos de cultivos en base a niveles - determinados de crédito, definir calendarios de administraciones, otros.

En ganadería puede ayudar a calcular raciones de -- costo mínimo que usen materias primas disponibles y que cumplan con restricciones de mínimos (y a veces máximos) de nutrientes proteínas, grasas, carbohidratos, otros.

A los agricultores que van a colonizar una región y que cuentan con ciertos recursos propios y ayuda de agencias del gobierno, se les presenta el problema de seleccionar entre un gran número de cultivos y actividades ganaderas. En estas condiciones, -- existe una infinidad de planes y la programación - lineal determina el plan óptimo en una forma rápida.

También sirve para introducir restricciones subjetivas, legales o de cualquier otro tipo, en los -- planes de producción. Por ejemplo, permite que en el programa para un agricultor no aparezca más de 5 hectáreas sembradas de avena, si así lo prefiere.

Una advertencia debe hacerse; la programación lineal es una herramienta poderosa para la planeación de las fincas, sin embargo no es más que eso, una herramienta. No puede sustituir el criterio y el conocimiento que el investigador debe tener. - En los casos en que se le aplica o utiliza, es necesario tener presentes sus limitaciones derivadas de los supuestos en que se basa.

9.6.2 Supuestos: Mena (1980) y Bustamante (1977) citan varias suposiciones implícitas en un problema de - Programación lineal, que debe ser válidas en el -- planeamiento de un problema cualquiera que va a -- ser resuelto mediante esta técnica.

El primero se refiere al objetivo que se busca, representado por una función que debe ser lineal. -- Por ejemplo si 2 hectárea de trigo dan un ingreso x, 4 hectárias darán exactamente el doble, 2x. -- Las relaciones que constituyen las restricciones - también deben ser lineales. Esto quiere decir que no hay rendimiento decrecientes y que los costos - varian en forma lineal.

El segundo supuesto requiere que los insumos o recursos sean divisibles. Las variables de decisión son variables reales y no enteras.

La independencia de los procesos o actividades es el tercer supuesto;si se usan dos actividades, la producción total sería la suma de lo producido independientemente por cada actividad. Es decir no deben existir interacciones entre las variables de decisión.

El cuarto supuesto se refiere a que los parámetros del modelo permanecen constantes durante el cálculo; es decir los parámetros no son estocásticos durante el proceso de cálculo.

Otros supuestos se refieren a homogeneidad de insumos.

Los supuestos anteriores no son tan restrictivos - como pudiera parecer a la vista, existen posibilidades de flexibilidad, por ejemplo, se pueden introducir rendimientos decrecientes por medio de actividades adicionales, cada uno con un tipo de rendimiento.

9.6.3 Modelo Matemático de Programación Lineal. La estructura general de un problema de programación lineal es:

Función Objetivo:

$$\text{Max ó Min. } Z = \sum_{i=1}^{n} C_i X_i \qquad (1)$$

Sujeta a:

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ki} X_i \leq B_k, \; K = 1, 2, \ldots, f$$

$$\text{Restricciones: } \sum_{i=1}^{n} A_{ki} X_i \geq B_k, \; K = f + 1, \ldots, g \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{n} A_{ki} X_i = B_k, \; K = g + 1, \ldots, m$$

Condiciones de no negatividad $X_i \geq 0$, $i = 1, 2, \ldots, n$

X_i (incognitas del problema) variables estructurales o de decisión, los coeficientes A_{ki} se llaman coeficientes estructurales y las constantes B_k estipulaciones o vector recursos.

Z representa el maximando, es decir la función objeto a ser maximizada. Las variables de elección o decisión se denotan por X_i que podría representar actividades de producción o de cualquier otro tipo; producción de forrajes, cultivo de arroz, cría de ganado, otros. Los coeficientes de X_i en la función objetivo se indican por C_i que es un conjunto de constantes dadas que representan ingresos netos. Este ingreso neto tiene un significado muy peculiar en la programación lineal, se obtiene restando del ingreso bruto de cada actividad, los costos variables correspondientes.

Las restricciones son un conjunto de ecuaciones o de desigualdades, una para cada recurso disponible en cantidad limitada. En el segundo miembro de la ecuación o desigualdad aparece el monto del recurso y en el primero la suma de las cantidades que se usa del recurso en todas las actividades. De aquí que en el primer miembro figuren nuevamente las variables X_i, pero en esta ocación sus coeficientes se llaman coeficientes de producción, que indica la cantidad que se necesita de cada recurso para obtener una unidad de actividad. Ej. 1 ha., 1 Ton., 1 cabeza de ganado, otros.

En problemas de minimización, la función objeto representa el minimando; ejemplo, obtención de una ración a costo mínimo; la descripción es algo diferente, en lugar de monto de los recursos se tendrá el % mínimo de proteínas, otros. Nuevamente - el término C_i representa un conjunto de coeficientes constantes dados, del mismo modo que B_k en las restricciones son constantes; pero aquí el símbolo B_k expresará requerimiento en lugar de condiciones.

9.6.4 Métodos de solución. La tarea consiste en encontrar un conjunto de valores de las variables que - maximizen o minimizen Z, entonces es lógico pensar en que un conjunto que satisfaga las restricciones será una solución básica; si además esta solución básica satisface las condiciones de no negatividad será una solución básica factible, pero si más aún dicha solución nos dá el máximo ó mínimo de Z, entonces tendremos la solución factible óptima.

9.6.4.1 Método Gráfico. Para el caso de dos variables, es decir, cuando estamos ubicados en un espacio de 2 dimensiones (R^2), el método gráfico puede conducirnos sin dificultad a una - solución básica factible óptima. Esto es válido prescindiendo del número de restricciones contenidos en el programa lineal, ya que la presencia de restricciones adicionales solo puede incrementar el número de puntos extremos, más no la dimensión del diagrama. Pero cuando hay 3 variables de elección el método se torna poco manejable, puesto que se necesitaría un gráfico tridimensional. Para el caso general de n variables, el método se derrumba completamente; en consecuencia debemos de buscar un método no gráfico de resolución que pueda aplicarse a cualquier número de variables.

Consideramos necesario presentar un ejemplo ilustrativo para aclarar conceptos mencionados anteriormente y ejemplificar el método gráfico. Amisial (1,977) ilustra la programación Lineal con el siguiente ejemplo.

Una cooperativa agrícola venezolana que dispone de más tierra que agua para riego, quiere sembrar papa y frijol negro. La demanda de agua de la papa es de 10000 m^3/ha., mientras que la del frijol negro es de 8000 m^3/ha. Durante una estación de riego se le permite a la cooperativa bombear una cantidad máxima de 400000 m^3 de agua a los acuíferos subyacentes. En el último mes de crecimiento de los cultivos, la papa por hectárea necesita 4 horas mano de obra y el frijol negro 8 horas por hectárea. Durante ese mes la cooperativa dispone de 240 horas de mano de obra. El ingreso neto de la papa es de 400 Bs/ha. y el frijol negro 360 Bs/ha.

Determinar la mejor combinación de los dos cultivos de tal manera que maximicen los ingresos netos de la cooperativa.

Formulación del problema.

Variables de decisión:

X_1= número de hectáreas en papa o variable de decisión asociada con la actividad de producir papa.

X_2= número de hectáreas en frijol negro o variable asociada con la actividad de producir frijol negro.

Podemos resumir los datos del problema en la siguiente tabla.

Tipo de Recursos	Requerimiento de recursos de la actividad.		Recursos disponibles
	x_1 = Has. en papa	x_2 = Has en frijol	
Agua (m^3)	10000	8000	400000
Mano de Obra (horas)	4	8	240
Precio de la actividad por Unidad.	400 Bs/ha.	360 Bs/ha.	

Restricciones y condiciones de no negatividad.

Siguiendo el esquema de las ecuaciones (2) las restricciones se plantean de la siguiente forma:

Puesto que hay 400000 m^3 de agua disponible y que la papa y el frijol negro utilizan 10000 m^3/ha y 8000 m^3/ha, una restricción puede ser formulada para el recurso agua.

$$\text{Agua:} \quad 10000\ x_1 + 8000\ x_2 \leq 400000 \qquad (3)$$

De una manera similar obtenemos la siguiente restricción para el recurso mano de obra:

$$\text{Mano de Obra:} \quad 4\ x_1 + 8\ x_2 \leq 240 \qquad (4)$$

Además carecería de sentido el desarrollar menos diez hectáreas de papa o frijol negro, ó sea, no tiene sentido hablar de actividades negativas, ó sea:

$$x_1\ \&\ x_2 \geq 0 \qquad (5)$$

Función Objetivo.

De los datos de la tabla anterior podemos derivar una ecuación de beneficio que servirá de criterio en la selección de los niveles óptimos de actividades x_1 y x_2. Puesto que una hectárea de papa produce un ingreso neto de 400 Bs. y una hectárea de frijol negro 360 Bs, la ecuación de beneficio se escribe como:

$$Z = 400\ x_1 + 360\ x_2 \qquad (6)$$

De acuerdo a Ec. (1) la función objetiva es:

$$\text{Maximizar} \quad Z = 400\ x_1 + 360\ x_2 \qquad (7)$$

Modelo Matemático.

Combinando las ecuaciones anteriores el problema original de la selección de la mejor -- combinación ha sido convertido en el siguiente problema matemático:

$$\text{Maximizar} \quad Z = 400\, x_1 + 360\, x_2 \qquad (8)$$

Sujeto a:

$$10000\, x_1 + 8000\, x_2 \leq 400000$$

$$4\, x_1 + 8\, x_2 \leq 240$$

$$x_1,\ x_2 \geq 0$$

Solución gráfica del Modelo Matemático.

La solución gráfica del modelo matemático se puede obtener mediante el siguiente procedi-- miento:

a) Adoptar un sistema de coordenadas con tantos ejes como variables de decisión.

b) Identificar en este sistema los puntos -- que satisfacen simultáneamente a todas las restricciones del problema.
   Al conjunto de estos puntos se le conoce como región de factibilidad.

c) Identificar por tanteo el punto de la región factible para el cual Z tiene el mayor valor.

Sistema de coordenadas:

Puesto que en el problema ilustrativo existen dos variables de decisión adaptamos un sistema bidimensional de coordenadas como se ilustra en la figura 1. Los ejes son identificados por las variables x_1 y x_2. Como las variables x_1 y x_2 son negativos nos limitamos a la consideración del primer cuadrante.

Región de Factibilidad:

Para la representación gráfica de la restricción (3), supongamos que la cooperativa decide utilizar la totalidad de los 400000 m^3 de agua disponible. Entonces la restricción (3) toma la forma siguiente:

$$10000\ x_1 + 8000\ x_2 = 400000 \tag{9}$$

Si la cooperativa decide sembrar solo papa, entonces x_2 es igual a cero en la ecuación (9) y se obtiene:

$$x_1 = 40 \text{ para } x_2 = 0$$

De igual modo se obtiene:

$$x_1 = 0 \text{ para } x_2 = 50$$

La ecuación (9) puede ser escrita en las siguientes formas:

$$x_1 = 40 - 0.8\ x_2 \tag{10}$$

$$x_2 = 50 - 1.25\ x_1 \tag{11}$$

El coeficiente de x_2 en la ecuación (10) igual a 0.8, representa la tasa marginal de sustitución de la papa por el frijol negro y se designa por:

$$\frac{x_2}{x_1} = -0.8$$

Significa que se debe sacrificar 0.8 Has. de papa para desarrollar una hectárea de frijol negro.

De la ecuación (11) se obtiene la tasa marginal de sustitución del frijol negro por la papa como:

$$\frac{x_1}{x_2} = -1.25$$

La ecuación (9) tiene la representación gráfica indicada por la línea TC. de la figura 1. La linea TC representa las posibilidades máximas de producción de papa y frijol negro para los 400000 m^3 de agua disponibles. En otros términos si la cooperativa decide utilizar toda el agua disponible, entonces todas las posibles combinaciones de asignación de tierra a la producción de papa y frijol negro se encuentran representadas por los puntos de la línea TC, de la figura 1.

Por otra parte si la cooperativa decide utilizar sólo una porción del agua disponible, entonces el área OTC representa todas las posibles combinaciones de producción de papa y frijol negro. En vista de la condición de no negatividad y del signo, inferior o igual a, en la desigualdad (3), los puntos del área OTC, incluyendo a los de las líneas OT, TC y OC, constituyen la representación gráfica de la desigualdad (3).

De una manera similar graficamos la restric-- ción (4) que está representada por el área -- OAS en la figura 1. Los puntos comunes a -- las áreas OTC y OAS, cumplen simultáneamente con las dos restricciones del problema y forman el área OABC. El área OABC incluyendo - sus bordes, constituye la región de factibili dad del problema. Cualquier punto de la re-- gión de factibilidad, OABC, constituye una so lución factible del problema. Ningún punto - fuera de la región de factibilidad puede ser solución del problema.

Solución Optima.

La solución óptima debe ser una solución factible. En otros términos debe ser un punto de la región de factibilidad, tal que maximize el valor del ingreso neto total Z. Para obtener este punto podríamos proceder por tanteo, reem plazando x_1 y x_2 por cada uno de los pares de valores de x_1 y x_2 dentro de la región de fac tibilidad. Para reducir el trabajo que involucraría este procedimiento, asignamos arbi-- trariamente a Z el valor de 7200. La ecuación de beneficio neto toma la siguiente forma:

$$400\ x_1 + 360\ x_2 = 7200 \tag{12}$$

La ecuación líneal (12) se grafica como la lí nea mn con pendiente $-\frac{400}{360}$ en la figura 2. - Si ahora asignamos a Z el valor de 12000 la e cuación de beneficio se escribe como:

$$400\ x_1 + 360\ x_2 = 12000 \tag{13}$$

La línea pq que representa la ecuación (13), también admite $-\frac{400}{360}$ como pendiente. Es paralela a mn y más alejada del origen 0 que mn. A medida que aumentamos el valor de Z, la línea que representa la ecuación de beneficio - se aleja más del origen 0, mientras sigue --- siendo paralela a mn y pq. La solución óptima se obtiene como el punto de la región de factibilidad donde pasa la línea de beneficio -- cuando ésta última está lo más alejada posi-- ble del origen 0.

En la figura 2, se puede apreciar que la línea recta más alejada de 0, admitiendo $-\frac{400}{360}$ como pendiente y pasando por un punto de la región de factibilidad es ru. Consecuentemente el - punto B ubicado sobre la línea ru y en la región de factibilidad corresponde a la solución óptima del problema y tiene como coordenadas:

x_1 = 26.67 Has

x_2 = 16.67 Has.

Reemplazando x_1 y x_2 en la función objetiva - (7) por los valores óptimos obtenemos:

$$\text{Max. } Z = 400\ (26.67)+360\ (16.67)=16666.67 \text{ Bs.}$$

Se puede verificar que las coordenadas x_1 y - x_2 de ningún otro punto de la región de factibilidad pueden dar un valor de Z mayor que -- Z = 16666.67 Bs.

Importancia de los Vértices de la Región de Factibilidad.

A este nivel conviene llamar la atención sobre el hecho de que la solución óptima del -- problema de programación lineal se encuentra siempre en un vértice de la región de factibilidad. La razón R, de los precios unitarios o beneficios netos unitarios determina en que vértice se ubica la solución óptima. En este problema la solución óptima se encontró en el vértice B y la razón R era igual a $\frac{400}{360}$ o sea:

$$R = \frac{400}{360} = 1.11$$

En la figura 2 se puede apreciar que el vértice B sigue siendo la solución óptima siempre que la pendiente de la línea de beneficios netos esté comprendida entre -1.25 y -0.50 o -- sea siempre que:

$$0.50 < R < 1.25$$

Si R = 0.50, entonces la línea de beneficios netos se confunde con la línea AB y todos los puntos de B, incluyendo los vértices A y B son soluciones óptimas. No hay en este caso una solución única y se dice que la solución es - degenerada.

Si $R < 0.50$ entonces la solución óptima se encuentra en el vértice A.

Si R = 0.50, los puntos de la línea BC, incluyendo los vértices B y C, son soluciones óptimas.

Si $R > 1.25$, la solución óptima se encuentra en el vértice C.

Si consideramos la restricción sobre la cantidad de agua disponible expresada por la desigualdad (3).

$$10000\ x_1 + 8000\ x_2 \leq 400000$$

Esta ecuación limita la cantidad de agua disponible a 400000 m^3, pero no fija la cantidad que la cooperativa debe utilizar. De este modo podemos convertir la desigualdad (3) en una ecuación sin cambiar la naturaleza de la restricción como sigue:

$$10000\ x_1 + 8000\ x_2 + x_3 = 400000 \qquad (14)$$

donde:

$$x_1,\ x_2 \text{ y } x_3 \geq 0$$

x_3 es una variable de hogura y representa la - cantidad de agua no utilizada por la cooperativa. Por ejemplo en el punto 0 de la figura 1, para el que se produce cero hectáreas de -- frijol negro y cero hectáreas de papa, se prodicirá 400000 unidades de x_3 ó sea que no se utiliza el agua. en el punto B de la figura - 1, con una producción de 26.67 Has. de papa y 16.67 Has. de frijol negro, se está produciendo 0 unidades de x_3.

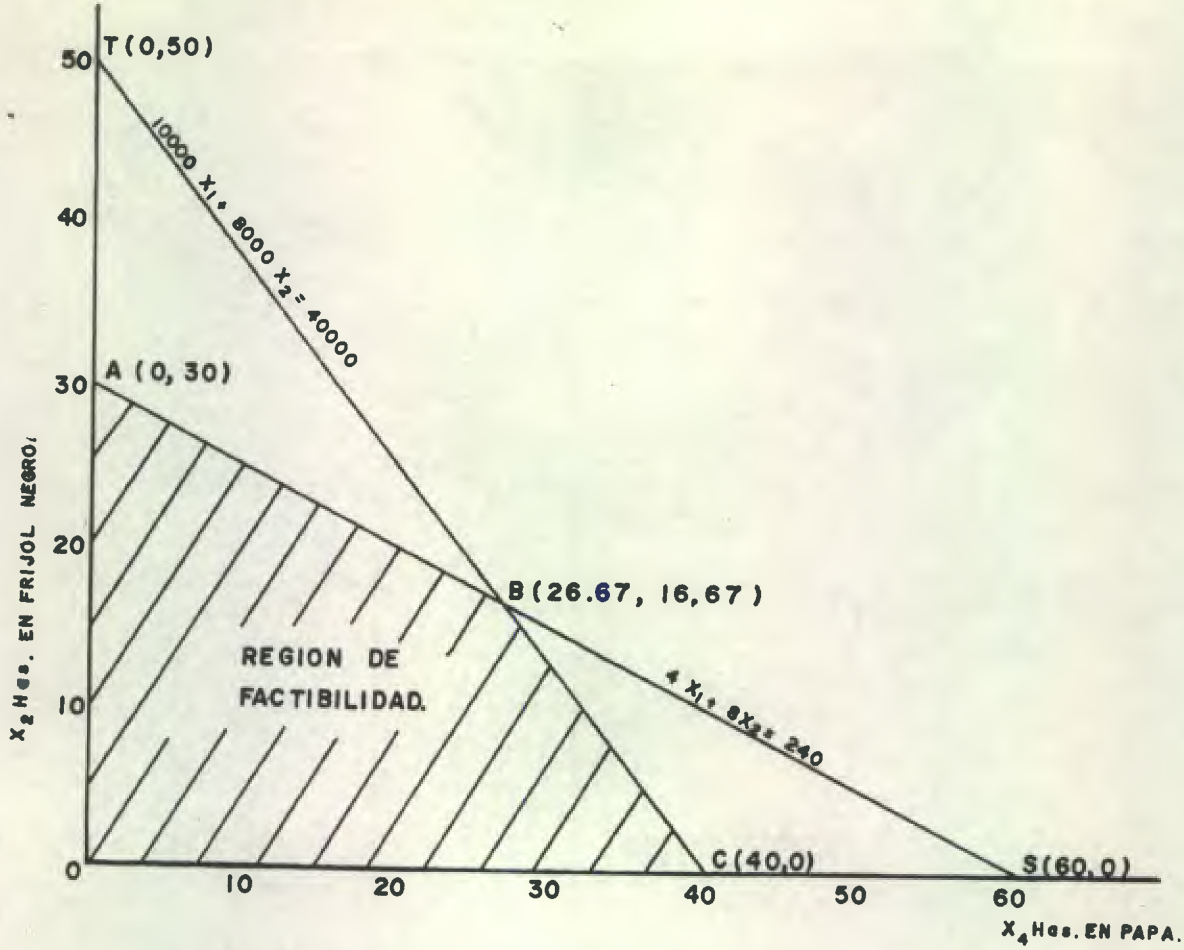


FIGURA 1. DETERMINACION DE LA REGION DE FACTIBILIDAD DEL PROBLEMA.

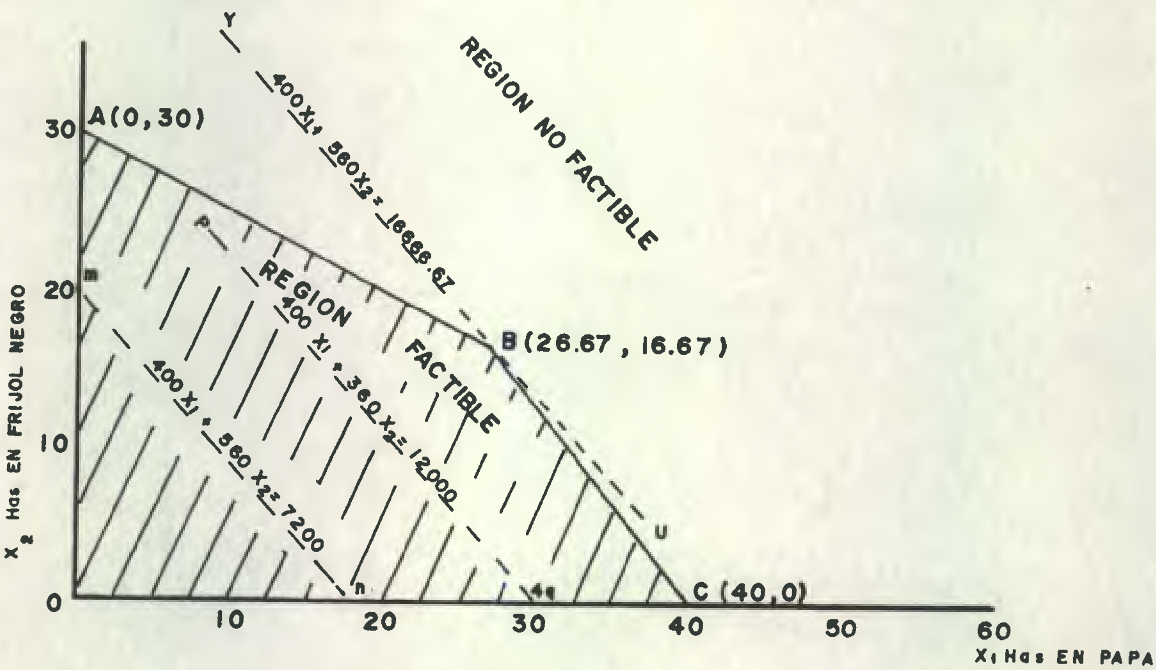


FIGURA 2 SOLUCION OPTIMA PARA EL PROBLEMA.

X_1 = 26.67 Has. Y X_2 = 16.67 Has.

9.6.4.2 Algoritmo del Simplex. El método gráfico presenta utilidad en la solución de problemas de PL, únicamente cuando se presentan pocas - variables de decisión y restricciones. Se -- mencionó anteriormente que cuando se dispone de varias variables de decisión y restricciones, la solución gráfica del problema se hace imposible.

El método analítico simplex es la solución. - Este método provee un algoritmo eficiente y - confiable para resolver problemas de PL que - tengan cientos de restricciones y variables en un computador.

De acuerdo a la forma general del modelo (ecuaciones 1 y 2), en los problemas de programación Lineal se presentan situaciones en donde los - recursos que necesitamos para llevar a cabo una actividad deben ser menores, iguales o mayores que un determinado valor, dando lugar a las -- restricciones $\leq$, $=$ y $\geq$, que son los elementos del modelo matemático que dan sentido y objetividad a la solución del mismo. Por lo anterior Silva (1982) para desarrollar el método simplex de Dantzing, presenta un problema de programación Lineal con los diferentes tipos de restricciones.

$$\text{Max. } Z = 2x_1 + x_2 + 3x_3 \tag{15}$$

$$\begin{aligned} \text{s.a. } x_1 + x_2 + 2x_3 &\leq 10 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 &= 5 \\ x_1 \qquad - 3x_3 &\geq 12 \\ x_1, x_2, x_3 &\geq 0 \end{aligned} \tag{16}$$

Para resolver el problema por simplex, es necesario transformar las desigualdades de las restricciones en igualdades. Para convertir la primera desigualdad del sistema (16) de variables no negativas en igualdades, es necesario añadir una variable no negativa, llamada de holgura para obtener:

$$
\begin{aligned}
x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 \ldots\ldots &= 10 \\
x_1 + 2x_2 + x_3 \ldots\ldots\ldots &= 5 \\
x_1 \ldots\ldots - 3x_3 \ldots\ldots -x_5 &= 12
\end{aligned}
\qquad (17)
$$

Por otra parte, si para iniciar el método se da: $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, como primera solución factible para continuar de allí a otras soluciones factibles hasta encontrar la óptima, las ecuaciones (17) dan $x_4 = 10$, $0 = 5$, $x_5 = -12$ Para evitar las dos últimas incongruencias es necesario añadir una variable llamada artificial a cada una de las dos últimas ecuaciones (17) para obtener,

$$
\begin{aligned}
x_1 + x_2 + 2x_3 + x_4 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots &= 10 \\
x_1 + 2x_2 + x_3 \ldots\ldots + x_6 \ldots\ldots &= 5 \\
x_1 \ldots\ldots - 3x_3 \ldots -x_5 \ldots + x_7 \ldots &= 12
\end{aligned}
\qquad (18)
$$

Como las variables artificiales x_6 y x_7 se añaden al sistema exclusivamente para poder dar una primera solución factible sencilla $x_1 = x_2 = x_3 = 0$, es necesario asegurar que valgan cero en la solución óptima. Esto se logra asignándoles coeficientes de costos c_i muy negativos en la función objetivo cuando esta se desee maximizar y C_i muy positivos cuando se desee minimizar.

La función objetivo Ecuación (15) se transforma en:

$$\text{Max. } Z = 2x_1 + x_2 + 3x_3 - 1000x_6 - 1000x_7 \quad (19)$$

donde se asignó el valor -1000 a los coeficientes de costos de las variables artificiales -- x_6 y x_7. Si por algún motivo x_6 ó x_7 tuvieran valores diferentes de cero en la solución óptima, los coeficientes de costos se deberán hacer más negativos y se vuelve a repetir el método simplex.

El método simplex se aplica a las ecuaciones - (18) que son modificaciones de las restricciones (16), con la función objetivo modificada - de acuerdo a Ecuación (19).

En general, los pasos a seguir para transformar el sistema de desigualdades (2) en un sistema de igualdades con un conjunto de variables básicas para la primera solución factible es:

a) Transformar desigualdades en igualdades:

Tipo de desigualdad	Acción
$\leq$	+ variable de holgura
$\geq$	- variable de holgura

(20)

b) Agregar tantas variables artificiales como sean necesarias para tener un conjunto de m vectores columna unitarios linealmente independientes en la matriz de coeficientes del sistema de m ecuaciones. Estas variables solo se agregan (de ser necesarias) en las desigualdades del tipo $\geq$ ó en las igualdades del sistema (2).

La primera solución factible de las ecuaciones (18) está por $x_1 = x_2 = x_3 = x_5 = 0$, $x_4 = 10$, $x_6 = 5$ y $x_7 = 12$. Se dice que las variables no nulas x_4, x_6 y x_7 forman la base, o son las variables básicas en esta iteración. Se observa que los coeficientes de una variable básica en las 3 ecuaciones forman un vector unitario (ejemplo (1,0,0) para x_4).

A continuación es necesario determinar cual de las variables nulas x_1, x_2, x_3 y x_5 entrará a la base en la siguiente iteración. Esto se logra examinando el cambio total en la función objetivo que produce un cambio en cada una de las variables por separado. Se comparan los cambios para escoger la que maximice la función objetivo más rápidamente (camino de máxima pendiente).

Consideremos que x_3 cambia de 0 a 1, entrando a la base. De la función objetivo Ecuación (19) se observa que Z aumenta en 3 unidades, (el coeficiente de x_3). Por otra parte también habrán cambios indirectos en Z debido a que al aumentar x_3, cambiarán x_4, x_6 y x_7. De la primera ecuación de restricción (18) se tiene:

	$x_1 + x_2\ 2x_3 + x_4 = 10$
Valor la. iteración	$0 + 0 + 0 + 10 = 10$
Valores cambiados	$0 + 0 + 2x1 + 8 = 10$

Es decir al aumentar x_3 de 0 a 1, x_4 debe disminuir de 10 a 8 para que se siga manteniendo la igualdad.

Análogamente para las otras dos ecuaciones de restricción, se tiene que al aumentar x_3 de 0 a 1, x_6 disminuye en una unidad (de 5 a 4) y x_7 disminuye en -3 unidades, o sea aumenta en 3 unidades (de 12 a 15).

En conclusión, al aumentar x_3 de 0 a 1, el cambio en la función objetiva es:

	$Z = 2x_1 + x_2 + 3x_3 - 1000x_6 - 1000x_7$
lra. iteración.	$Z = 0 + 0 + 0 - 1000x5 - 1000x12 = -17000$
Valores cambiados.	$Z = 0 + 0 + 3x1 - 1000x4 - 1000x15 = -18997$
Cambio Neto:	-1997

El cambio neto -1997 en la función objetivo Z recibe el nombre de evaluador neto. Como al cambiar x_3 de 0 a 1 la función objetivo que se desea maximizar disminuye en 1997, no conviene cambiar x_3.

Para sistematizar el análisis anterior, conviene escribir los datos en un cuadro.

CUADRO No. 2

SISTEMATIZACION DEL METODO SIMPLEX

I		II							
BASE	C_i DE LA -- BASE	SOL. BASICA	2	1	3	0	0	-1000	-1000
			x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
x_4	0	10	1	1	2	1	0	0	0
x_6	-1000	5	1	2	1	0	0	1	0
x_7	-1000	12	1	0	-3	0	-1	0	1
EVALUADORES NETOS.		-17000	2002	2001	-1997	0	-1000	0	0

Para formar el cuadro anterior, en el renglón sobre el encabezado x_1, x_2, ...x_7 se ponen los coeficientes respectivos de la función objetivo Ecuación (19), mientras que en los tres renglones abajo del encabezado se escriben los -- coeficientes estructurales de las ecuaciones - de restricción modificadas (18). Bajo solución básica se encuentran las estipulaciones de las mismas restricciones.

En la columna Base del Cuadro No. 2, se ponen las variables de la base (x_4, x_6, x_7), en el - renglon en el que aparecen con un coeficiente de +1 en las restricciones. C_i de la base contiene los coeficientes de costos de la función objetivo correspondientes a las variables de la base de la columna izquierda. Se observa que las variables de la base tienen los valores de la columna solución básica; las demás variables son nulas.

Los evaluadores netos del último renglón se -- obtienen multiplicando C_i de la base por los - valores correspondientes de la columna en cuestión y sumando todos estos productos. Este valor se resta del coeficiente de la función objetivo del primer renglón. Así para obtener - 2002 en la columna x_1, se tiene:

$$2002 = 2 - (0 \times 1 + (-1000) \times 1 + (-1000) \times 1)$$

Notamos que el valor de -17000 del evaluador - neto de la columna solución básica es el valor de la función objetivo en la primera iteración.

El procedimiento iterativo continúa hasta que todos los evaluadores netos sean menores o i-- guales a cero, que es cuando se ha encontrado la solución óptima que maximiza la función objetivo.

Los conceptos anteriores pueden generalizarse de la siguiente manera.

Considerando el sistema de ecuaciones (1) y (2):

$$\text{Max. ó Min.} \quad Z = \sum_{i=1}^{n} C_i X_i$$

Restricciones $\quad A_{ki} X_i \lesseqgtr B_k \quad K=1,2, \ldots, m$

Cóndiciones de no negatividad. $\quad X_i \geq 0 \quad i=1, 2, \ldots, n$

Para obtener la solución de este modelo es necesario convertir las desigualdades (2) en igualdades. Empleando el esquema (20) se obtiene - el siguiente planteamiento:

$$\text{Max ó Min.} \quad Z = \sum_{i=1}^{L} C_i \; X_i \qquad (21)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{i=1}^{L} A_{ki} X_i = B_k \quad k = 1, 2, \ldots, m \qquad (22)$$

$$X_i \quad 0 \quad i = 1, 2, \ldots, L$$

Donde las variables X_i para $i = n + 1, \ldots, L$ - son variables de holgura y/o artificiales. Los coeficientes de costos C_i para $i = n + 1, \ldots,$ L tienen los siguientes valores:

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{si corresponde a una variable de holgura.} \\ \geqq 0 & \text{si corresponde a una variable artificial y se está minimizando Z.} \\ \leqq 0 & \text{si corresponde a una variable artificial y se está maximizando Z.} \end{cases}$$

$$i = n+1, \ldots, L$$

A continuación se forma un cuadro similar al - cuadro No. 2

CUADRO No. 3

CUADRO PARA APLICAR EL METODO SIMPLEX COMPUTACIONAL

I		II					
BASE	C_i DE LA BASE.	SOL. BASICA	C_1	$C_2 \dots$	$C_i \dots$	$C_n \dots$	C_L
			X_1	$X_2 \dots$	$X_i \dots$	$X_n \dots$	X_L
X_1^*	C_1^*	B_1^*	A_{11}^*	$Z_{12}^* \dots$	$A_{1i}^* \dots$	$A_{1n}^* \dots$	A_{1L}^*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X_k^*	C_k^*	B_k^*	A_{k1}^*	$A_{k2}^* \dots$	$A_{ki}^* \dots$	$A_{kn}^* \dots$	A_{kL}^*
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X_m^*	C_m^*	B_m^*	A_{m2}^*	$A_{m2}^* \dots$	$A_{mi}^* \dots$	$A_{mn}^* \dots$	A_{mL}^*
Valor de Z		Z_o	Z_1-C_1	$Z_2-C_2 \dots$	$Z_i-C_i \dots$	$Z_n-C_n \dots$	Z_L-C_L

La primera solución básica (no nula) se forma con las m variables que tengan coeficiente unitario positivo y solo aparezcan en una ecuación. Las variables que no forman parte de la base tienen valor nulo.

El proceso del método simplex consiste en ir cambiando las variables que pertenecen a la base en forma sistemática, hasta optimizar la función objetivo. Para describir el proceso -

se considerará que se desea minimizar Z; lo - anterior no origina ninguna restricción puesto que minimizar Z equivale a maximizar (-Z).

Al seleccionar la primera base o solución factible inicial del sistema, los elementos del - cuadro No. 3, tendrán el siguiente valor:

$A^*_{ki} = A_{ki}$

$B^*_k = B_k$

$Z_i - C_i = A^*_{1i} C^*_1 + \ldots + A^*_{mi} C^*_m - C_i$

$Z_o = C^*_1 B^*_1 + \ldots + C^*_m B^*_m$

$x^*_1 \ldots, x^*_m$: Variables que forman la primera solución básica.

$C^*_1, \ldots, C^*_m$: Coeficientes de costos correspondientes a las variables de la solución básica.

Para resolver el sistema de ecuaciones representado por el cuadro No. 3 se aplica a la sección II el método de Gauss -Jordan (Ver bibliografía #1,9,14,16,17). La selección del elemento pivote para efectos de minimización se describe a continuación:

a) Analizar los evaluadores netos $Z_i - C_i$ para toda i a fin de determinar si ya se optimizó la función objetivo. El mínimo se obtiene cuando $(Z_i - C_i) \leq 0$ para toda i, si este se cumple se detiene el proceso y el valor de las incognitas que forman la base es la solución óptima. En caso contrario continuar con el siguiente inciso.

b) Examinar todos los $(Z_i - C_i) \geq 0$ y seleccionar como columna del elemento pivote la columna j con el máximo valor $(Z_j - C_j) \geq 0$.

c) Para asegurar la factibilidad de la nueva solución, el renglón k del elemento pivote será aquel para el cual se tenga el mínimo valor (B^*_k / A^*_{kj}) donde $A^*_{kj} \geq 0$; j corresponde a la columna seleccionada en el paso "b". La solución será no acotada cuando $A^*_{kj} \leq 0$ para toda k.

d) Introducir en la base la nueva variable básica x_j, es decir, hacer $x^*_k = x_j$ y $C^*_k = C_j$.

e) Aplicar el método de eliminación de Gauss-Jordan a la Sección II del Cuadro No. 3 teniendo como pivote el elemento A^*_{kj}. Al efectuar esta eliminación, los nuevos valores B^*_i corresponderán a los valores (solución) de las variables que forman la base x^*_i. Las variables no básicas tienen valor nulo.

f) Regresar al paso "a".

Se puede presentar el caso de que el problema sea cíclico o degenerativo, lo cual es una posibilidad muy remota en problemas reales. En previsión a lo anterior, se debe establecer un número máximo de iteraciones al implementar el algoritmo en una computadora. Si se tiene un sistema con m restricciones se requerirán aproximadamente 2m cambios de base para llegar a la solución óptima; en base a esto se puede establecer el máximo número de iteraciones a efectuar.

En caso de que aparezcan variables artificiales no nulas (si se emplearon) en la solución óptima, será necesario aumentar la magnitud de sus coeficientes de costos y volver a aplicar el método simplex al sistema de ecuaciones.

10. Sistema de Riego por Aspersión.

Según la Sprinkler Irrigation citado por CIDIAT (1980), un sistema de riego por aspersión es una red de tuberías con aspersores unidos al mismo y cuyo objetivo es aplicar agua pulverizada sobre el terreno.

Mediante el riego por aspersión, el agua se aplica al suelo asperjada, o sea fraccionando el caudal en innumerable cantidad de gotas que se infiltran en el terreno al tiempo que alcanza la superficie del mismo.

Para evitar la escorrentía el agua debe ser aplicada a una intensidad tal que no supere la infiltración mínima o básica del suelo. Además de lo anterior, la disposición de los rociadores debe hacerse de manera que pueda lograrse una buena distribución del agua aplicada.

Un sistema de riego por aspersión puede abarcar todo un proyecto con tuberías fijas de alta presión que conducen y distribuyen agua a cada predio o secciones del proyecto, de donde deriva el agua a equipos individuales o comunitarios.

10.1 Componentes de un sistema de Riego por Aspersión.

Un sistema de riego por aspersión para cumplir sus objetivos debe disponer de los siguientes elementos:

10.1.1 Fuente de Agua: El riego por aspersión, para ser económicamente factible, requiere de un caudal contínuo el cual puede provenir de una fuente superficial, subterránea o combinada. - La fuente de agua tiene gran influencia en el diseño y operación del sistema. Las características más influyentes son: Ubicación, calidad del agua, costo del agua y caudal.

10.1.2 Motobomba: El equipo tiene por fin aspirar el agua desde la fuente de provisión e impulsarla a través del sistema. Dado que para el funcionamiento de los aspersores se requiere carga, la bomba crea la presión necesaria para ello, asi como para compensar las pérdidas de energía en las tuberías. Esta parte del equipo se omite cuando la fuente de agua está a - una elevación tal, de manera que la energía para el funcionamiento eficiente del equipo es - provista por el desnivel. Es este un caso común en zonas montañosas, cuando el agua puede derivarse aguas arriba en el cauce de una quebrada.

10.1.3 Sistema de distribución del Agua. El sistema de distribución del agua, consiste básicamente de tuberías principales y laterales. - La tubería principal conduce el agua hasta -- los laterales y estos contienen los rociadores.

La tubería principal puede ser fija ó móvil, superficial o enterrada, metálica o no metálica. En la actualidad, con el avance de la tec nología en riego por aspersión, hay una gran variedad en la forma, material y disponible de la tubería principal.

Los laterales son aquellas tuberías que conducen el agua a los rociadores colocados en la misma. Al igual que la tubería principal, los laterales pueden ser fijos y móvibles. Cuando el sistema es móvil, la tubería generalmente es metálica y en el caso de las máquinas regadoras, esta tubería es generalmente flexible.

10.1.4 Rociadores ó Aspersores. Los rociadores o aspersores son los dispositivos que tienen como finalidad la aplicación directa del agua en forma de gotas. Básicamente el aspersor consiste de una o más boquillas cuya forma y dimensiones varían de acuerdo al modelo y marca del mismo. Los aspersores pueden ser fijos o móviles, de baja o alta presión y de diversos materiales.

Una variante del sistema clásico de riego por aspersión lo constituye la tubería perforada. En tal caso no se instalan aspersores, sino que la tubería tiene una sucesión de perforaciones a través de las cuales fluye el agua, de esta manera el lateral cubre una faja de terreno que oscila en 10 y 14 mts. de ancho. La ventaja de este sistema radica en la baja presión de ejercicio.

10.1.5 Accesorios. Un sistema de riego por aspersión, está asimismo integrado por una gran cantidad de elementos adicionales que constituyen los accesorios. Ya sea accesorios de aspiración del agua, tales como la manguera o tubería con acoplamiento rápido que toma el agua de la fuente por efecto de una motobomba móvil, accesorios de impulsión de agua, tales como llaves de paso, accesorios de conducción del agua instalados en el lateral tales como; curvas, unión en T, reducción, control y reguladores de presión, filtros, válvulas, ventosas, otros.

10.2 Procedimiento para el diseño de un sistema de riego por aspersión. El manual Nacional de Ingeniería del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, señala que en el procedimiento para la planeación de un sistema de riego por aspersión, debe seguirse un número de pasos determinados y definidos, que en forma resumida se señala a continuación:

1. Realizar un inventario de los recursos disponibles, suelos, topografía, abastecimiento de agua, fuente de energía, cultivos y programación de administración agrícola.

2. Determinar en base a las relaciones agua-suelo-planta, la lamina de agua que debe aplicarse en cada riego.

3. Determinar la frecuencia de riego, basada en el periodo de requerimiento crítico.

4. Establecer el gasto óptimo para aplicar el agua.

5. Determinación del tipo de aspersores requeridos.

6. Establecer el espaciamiento de los aspersores, la descarga, tamaños de boquillas y la presión necesaria.

7. Determinar el número de aspersores operados simultáneamente.

8. Determinar el mejor trazo de la tubería principal y laterales para la operación simultánea del número aproximado de aspersores.

9. Hacer los ajustes finales necesarios para cumplir las condiciones que imponen el trazo.

10. Determinar los diámetros necesarios de la tubería lateral.

11. Determinar la presión total máxima para cada tubería lateral.

12. Determinar los diámetros necesarios en la tubería principal.

13. Revisar los diámetros necesarios de la tubería principal, con el fin de economizar fuerza motriz.

14. Determinar las condiciones de operación máxima y mínima.

15. Seleccionar la unidad de fuerza motriz y de bombeo para obtener la máxima eficiencia de

operación, dentro de las condiciones existentes.

La anterior constituye una guía general que puede seguirse para el diseño de un sistema de riego por aspersión, la cual puede modificarse y adaptarse a las condiciones y recursos existentes.

10.3 Diseño de Redes de Distribución para Sistemas de Riego por Aspersión. Una red de distribución de agua es un conjunto de elementos hidráulicos (bombas, tubos, válvulas, otros) que se encuentran conectados entre sí; cuya función primordial es transportar el caudal de agua necesario a todas las secciones del área de proyecto a la presión requerida, para hacer funcionar todas las líneas laterales en condiciones de máximo consumo.

CIDIAT(1980) y Cuevas (1978) coinciden en señalar que el principal problema de diseño es elegir los diámetros de la tubería con los cuales la operación resulte económica. El diseño de tuberías principales y secundarias requieren de un análisis de todo el sistema para determinar las necesidades máximas de capacidad y presión.

La pérdida de presión causada por fricción es la principal consideración en el diseño de cualquier sistema de tuberías, los problemas básicos varían de acuerdo con el origen de la presión:

a) Donde la presión requerida para el funcionamiento de un sistema por aspersión proviene de bombeo, el problema consiste en seleccionar --

los diámetros y materiales de la tubería de la línea principal que darán como resultados un equilibrio razonable entre los costos anuales de bombeo y el costo de tubería. El objetivo es el diseño de menor costo.

b) Donde se utiliza presión debida a la gravedad o sea por diferencia de elevación; puede presentarse dos problemas:

b.1 Donde la diferencia de altura apenas es suficiente para proporcionar una presión adecuada para el funcionamiento, el problema consiste en conservar energía usando tubos de mayor diámetro y reducir las pérdidas por fricción y evitar el bombeo.

b.2 En otros lugares donde la diferencia de altura es mucho mayor que las requeridas para proporcionar una presión normal, el problema radica en reducir las ganancias de presión, lo cual se logra usando una tubería de menor diámetro o bien cajas rompe--presiones en algunos casos.

CIDIAT (1980) presenta varios criterios para el diseño de una red, entre los cuales tenemos:

10.3.1 <u>Método de la pérdida de carga unitaria.</u>

Es un método propiamente hidráulico, ya que no considera aspectos económicos. Consiste en seleccionar los diámetros de las tuberías de manera que estas no exceda a 1 PSI por 100' de tubería.

10.3.2 Método de la velocidad permisible. En este método se establece una velocidad límite máxima en la tubería principal. Los valores comunes a usar son entre 5 y 10 pies/seg., siendo el valor usual 7 pies/segundo.

10.3.3 Método de Porcentaje. Se seleccionan los diámetros de la tubería principal de tal manera que las pérdidas de carga no sobrepasen el 10 a 20% de la presión de operación de los aspersores.

10.3.4 Método de comparación de costos. En este método se trata de seleccionar los diámetros, en los cuales la suma de los costos fijos de la tubería y los costos de energía sean los mínimos, haciendo comparaciones de costos de diferentes diámetros.

10.3.5 Método Simplificado o de las diferencias, o de igualar el costo de la energía y el costo del tubo.

10.3.6 Método por Programación Lineal.

10.4 Diseño Optimo de Redes para Sistemas de Riego por Aspersión. Para obtener un diseño óptimo debemos interrelacionar consideraciones hidráulicas y económicas de todo el sistema, de tal manera de obtener un diseño hidráulico al mínimo costo.

En los primeros trabajos desarrollados para el diseño de redes de distribución, se usaron criterios de minimización sencillos tales como el de la primera derivada (Cuevas, 1978). Estos criterios sólo son aplicables a casos de redes simples que satisfacen ciertas restricciones. El rápido desarrollo de métodos de optimización (programación lineal, dinámica y otros), han permitido el desarrollo de técnicas generales que permiten hacer diseños óptimos de redes de distribución.

10.4.1 Definición y Descripción del problema. De acuerdo a lo señalado por Cuevas (1978) y CIDIAT (1980), el diseño de una red consiste en la selección del diámetro del tubo de cada una de sus secciones y en encontrar el potencial en cada uno de sus nodos.

Ya que el costo de cada tubo y el costo de operación de la bomba están relacionados con los diámetros, un criterio que puede ser usado para el diseño, es seleccionar los diámetros en una forma tal que el costo anual de los tubos más el costo anual de operación de la bomba, sea mínimo.

Dos métodos usando este criterio son:

10.4.2 Método de igualar el costo de la energía y el costo del tubo, llamado también Simplificado o de las diferencias.

Desarrollado por Keller y Labye, citados por Cuevas (1978). En él se considera el caso de redes de distribución abiertas (sin circuitos cerrados) operados por una sola bomba.

Consiste en analizar las diferencias de costos fijos debido al mayor costo de la tubería de mayor diámetro.

Los diseños obtenidos usando este método, son muy semejantes a los obtenidos usando técnicas de optimización (programación lineal, dinámica, otros); sin embargo presenta la desventaja de que es aplicable solo a redes simples que satisfagan ciertas condiciones; aplicable a redes donde es posible encontrar una línea principal, que los nodos finales tengan una demanda que satisfacer y la restricción de que su potencial sea mayor o igual que un cierto potencial mínimo.

Se usa en casos en que el potencial mínimo requerido en cada nodo final, es menor que su nodo correspondiente de la línea principal con el que está conectado.

Otra dificultad se presenta en la selección de los diámetros de la línea principal. En esta selección no se toma en cuenta los límites de máxima y mínima velocidad del agua dentro del tubo, así que es posible que en secciones de la línea principal, la velocidad del agua se encuentre fuera de estos límites. En este método se contempla también la corrección por pendiente.

Cuevas (1978) señala que es mejor usar el método de programación lineal, con el que se obtiene un diseño óptimo económico y no presenta las limitaciones de éste método.

10.4.3 Aplicación de Programación Lineal. Karmelli et al., citado por Cuevas (1978) y CIDIAT (1980), presenta una formulación para el diseño de una red que permite usar programación lineal. Suponiendo que el sistema está operado por una - bomba y que su costo de operación varía linealmente con su presión, las variables a determinar son los diámetros en cada tubo de la red y la presión de operación de la bomba, que minimizan la función objetivo definida como la suma - del costo de operación más el costo de cada tubo.

Gupta et al. citado por Cuevas (1978), usando la misma formulación generaliza el método para el caso de redes operadas con dos o más bombas. El mismo autor cita que Karmelli et al. y Shamir, usando programación dinámica presentan un método para el diseño de redes del tipo abiertas; las variables a determinar son las mismas que en la solución por programación lineal, esto es, la presión en la bomba y los - diámetros de los tubos. Esta formulación es más complicada que la aplicación de programación lineal; asimismo aunque el uso de programación dinámica no requiere de una subrutina - especial para su solución, como en el caso de programación lineal; el hacer un programa general para el diseño de redes presenta más dificultades.

La disponibilidad de algoritmos eficientes para la solución de programación lineal, ha permitido desarrollar métodos para el diseño óptimo de redes que incluyen circuitos cerrados.

El método consiste de dos pasos fundamentales: Cuevas (1978) y CIDIAT (1980) los resumen así:

1) Transformación y representación del problema de diseño de una red, en un problema de programación lineal.

2) Solución del problema lineal.

Para la representación y transformación del problema en una programación lineal, se debe considerar una red de tuberías de conducción de agua con un número determinado de secciones y nodos.

Suponga que para cada sección de la red, se tienen ND_i tubos de diámetro diferentes, que pueden representarse por una matriz D_{ij}, donde para la sección i se tienen $j=1,2...,\ ND_i$ diámetros diferentes disponibles.

La sección se representará por i y variará de $i = 1,2,...NS$; el diámetro se representará por j y variará desde $j=1,2,....,\ ND_i$.

Habrá que tener presente de que cada diámetro D_{ij}, del mismo material, tiene un diferente costo anual por unidad de longitud del tubo correspondiente, C_{ij}; así como una diferente pérdida de carga J_{ij} para un mismo caudal.

El costo de operación de una bomba por W.H.P. (Water Horse Power), que trabaja durante un tiempo t, está dado por la ecuación:

$$C_{WHP} = \frac{t \quad . \ CE}{E} \tag{23}$$

Donde:

C_{WHP} = Costo por W.H.P.

CE = Costo de la energía por H.P. (Horse - Power)

t = Tiempo anual de operación. (Hrs.)

E = Eficiencia de la bomba.

El W.H.P. para una bomba está definido como:

$$W.H.P. = \frac{Q \quad . \quad H}{270} \tag{24}$$

Donde:

Q = descarga de la bomba (m^3/hora)

H = Presión dada por la bomba (m).

El costo anual (C_A) de operación de la bomba es entonces:

$$C_A = C_{WHP} \quad . W.H.P. \tag{25}$$

y por las ecuaciones (23) y (24)

$$C_A = \frac{Q. \ H. \ t. \ CE}{270 \ . \ E} \tag{26}$$

El costo anual de operación del sistema (c), por metro de agua de presión, es:

$$C = \frac{Q. \ t. \ CE}{270. \ E} \tag{27}$$

El costo anual está definido como el producto del costo inicial y el factor de recuperación del capital. Este factor puede definirse como:

$$CRF = \frac{r}{1+V^t} \tag{28}$$

$$V = \frac{1}{1+r} \tag{29}$$

Donde:

CRF = Factor de recuperación del capital

r = Taza de interés bancario

t = Vida estimada del tubo (años)

Los diámetros seleccionados y la presión necesaria en la bomba deben minimizar la función objetivo Z:

$$Z = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{J=1}^{ND_i} C_{ij}\, x_{ij} + C.\, P_0 \tag{30}$$

Donde:

C_{ij} = Costo anual por unidad de longitud del tubo cuyo diámetro es j, para la sección i.

x_{ij} = Longitud del tubo cuyo diámetro es j, para la sección i.

NS = Número de secciones de la red.

C = Costo anual de operación, definido por la ecuación (27).

P_0 = Presión de la bomba.

Para cada sección la suma de las longitudes - x_{ij}, de los diámetros seleccionados, debe ser igual a su longitud L_i, esto es,

$$\sum_{J=1}^{ND_i} x_{ij} = L_i \quad i = 1,2,\ldots NS \qquad (31)$$

El caudal a través de cada sección de la red es conocido, siendo definido por el número de aspersores y número de laterales funcionando simultáneamente. Conocido el caudal puede calcularse las pérdidas de carga debido a la fricción por la ecuación:

$$J_{ij} = 1.131 \times 10^9 \left(\frac{Q_i}{HZ_{ij}}\right)^{1.852} D_{ij}^{-4.872} \qquad (32)$$

Donde:

J_{ij} = Grdiente de pérdida de potencial (m/m)

Q_i = Flujo en la sección i (m^3/h)

D_{ij} = Diámetro disponible j (mm) para la - sección i.

HZ_{ij}= Coeficiente de Hazen - Williams para el diámetro D_{ij}, para un determinado material de la tubería.

La pérdida total de potencial para cada sec-- ción está dada por:

$$\sum_{J=1}^{ND_i} J_{ij} \cdot x_{ij} \quad i = 1,2,\ldots, NS$$

En algunos nodos de la red de tuberías, la carga en ese nodo debe tener un cierto valor, por lo cual la presión en él deberá ser mayor o igual que ese mínimo valor; esta restricción puede ser expresada por la siguiente desigualdad:

$$H_0 + \sum_{t} \sum_{J=1}^{ND_t} J_{t,j} \cdot X_{t,j} \geq H_{Kmin} \tag{33}$$

Donde:

H_0 = Potencial de la bomba (presión más elevación).

t = Diferentes secciones que conectan el nodo K, con el nodo donde se encuentra la bomba.

$J_{t,j}$ = Gradiente de pérdida de potencial, para el diámetro disponible j, correspondiente a la sección t.

$x_{t,j}$ = Longitud del tubo de diámetro j, correspondiente a la sección t.

H_{Kmin} = Potencial mínimo requerido en el nodo K.

El potencial o carga de la bomba se puede expresar como:

$$H_0 = P_0 + E_0 \tag{34}$$

Donde:

P_0 = Presión de la bomba

E_0 = Carga de elevación de la bomba.

La ecuación (33) se puede escribir entonces, como:

$$\sum_{t} \sum_{J=1}^{ND_t} J_{t,j} \cdot x_{t,j} - P_0 \leq E_0 - H_{Kmin}$$

La última restricción es:

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \begin{array}{l} i = 1,2,\ldots, NS \\ j = 1,2,\ldots, ND_i \end{array} \qquad (35)$$

En resumen, el diseño de una red usando este método consiste en encontrar los valores de x_{ij} y P_0 que minimizen la función:

$$Z = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{J=1}^{ND_i} C_{ij} \cdot x_{ij} + C. P_0 \qquad (36)$$

Sujeto a: $\displaystyle\sum_{J=1}^{ND_i} x_{ij} = L_i \quad i = 1,2,\ldots, NS$

$$\sum_{t} \sum_{J=1}^{ND_t} J_{t,j} \cdot x_{t,j} - P_0 \leq E_0 - H_{Kmin}$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \begin{array}{l} i = 1,2,\ldots NS \\ j = 1,2,\ldots ND_i \end{array}$$

V. MATERIALES Y METODOS.

Para someter a prueba la hipótesis y alcanzar los objetivos trazados fue necesario inicialmente recabar información sobre el proyecto de riego por aspersión para la Aldea Marajuma, esencialmente el trabajo desarrollado por Gómez (1983). En el mismo se resumen las características principales del lugar de la siguiente manera.

1. Ubicación:

   El área para la introducción de riego se encuentra ubicada en la aldea Marajuma, perteneciente al municipio de Morazán, departamento de El Progreso.

   Se encuentra comprendido entre las latitudes 11.3 a 12.3 grados y una longitud de 51.8 a 52 grados. La altura aproximada sobre el nivel del mar es de 360 mts.

2. Vías de Acceso:

   Se encuentra distante de la ciudad, sobre la carretera que conduce a los departamentos de Baja y Alta Verapaz en el Kilómetro 94.5 sobre carretera asfaltada, se desvía de la misma 3 kilómetros para llegar a dicha aldea; existe otro acceso por el municipio de Morazán, distando 5 kms. Ambos accesos son de terracería transitable todo el año.

3. Colindancias:

   La aldea Marajumá colinda al norte con la aldea La Laguna y La Sierra de Chuacús, al Sur con el río Motagua y la Aldea Palo Amontonado; al oeste con las aldeas Pasagua y Tulumajillo, y al oeste con la aldea los Aristondos y Morazán.

4. Fuente de Agua:
La fuente más cercana al área de riego y en la que el caudal es confiable en época de estiaje es el río Morazán, el cual es afluente del río Motagua. Se encuentra alimentado por las siguientes quebradas; El Rosario, Obraje, Morazán, Honda, El Chupadero, Los Leones, Sn. Juan, El Sitio y Los Riachuelos de Sn Clemente y El Jícaro.

Los aforos corresponden a los meses críticos de Enero a Abril; el caudal mínimo observado es de 183 Lts./seg., que corresponde a un año de registro.

5. Esquema General del Proyecto:
El bosquejo general del sistema, tal como fue considerado por Gómez (1983) es como se presenta en la figura No. 3 que corresponde a un área potencialmente irrigable de 49 Has.

6. Especificaciones del Sistema:
Gómez concluye su estudio con las siguientes especificaciones:

6.1 Especificaciones Técnicas Para las Condiciones de Diseño:

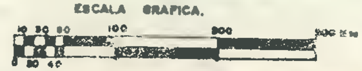
6.1.1 De cultivo.

Cultivo	Tabaco
Ciclo Vegetativo	4 meses (120 días)
Siembra	1ro. de enero
Cosecha	30 de abril
Profundidad radicular (mayor absorción de agua).	60 Cm.
Altura Media	1.50 mt.
Lámina de evapotranspiración durante el ciclo.	48.83 Cm.

FIGURA. 3
PLANO GENERAL DEL PROYECTO.

PLANTA

ESCALA GRAFICA.



6.1.2 De riego.

a) Generales:

-Lámina de riego neta	5.36 Cm.
-Lámina de riego bruta	7.13 Cm.
-Intervalo de riego crítico	10 días
-Mes crítico	Marzo
-Número de riegos por Ciclo	10
-Tiempo de riego diario	18 horas.
-Número de turnos diarios	3
-Tiempo para cambio de posiciones del lateral	2 horas
-Total hrs. trabajadas por año	4104 horas

b) Aspersores:

Boquilla	1/4" x 1/8"
Caudal	17 gpm
Presión	55 psi
Diámetro de cobertura	115 pies
Traslape entre aspersores	50%
Separación entre aspersores	18 mt.
Modelo recomendado	30 EPS 6 5201 - 2x

c) Laterales:

Diámetro	3 pulgadas
Material	Aluminio
Separación	18 Mt.

Longitud Máxima	212 Mts.

d) Principal:

Diámetros	8,6,4 pulgadas
Material	P.V.C.

e) Bombeo:

Carga dinámica total	104.36 Mt.
Unidades de bombeo a utilizar	2
Potencia de cada bombeo	50.00 Hp.

6.2 Especificaciones de Operación y Manejo:

Area total de riego	49 Ha.
Area de riego por día	4.9 Ha.
Area de riego por turno	1.63 Ha.
Area de riego máximo por lateral	2106 mt^2.
Número de laterales por turno	8
Número de aspersores por lateral	6
Caudal por lateral	102 gpm.

7. Costos de Tubería.

En el cuadro No. 4 se especifican los díametros de tubería y sus respectivos costos con los cuales Gómez realizó su diseño. En el mismo se presentan precios de tubería vigentes hasta - Diciembre de 1983. Los costos consignados son tomados del listado de Precios de contrato abierto que tiene el gobierno de

Guatemala y el fabricante de tubería.

CUADRO No. 4

COSTOS DE TUBERIA

Diámetro (mms.)	Costo por C/tubo * Qs.	Costo/100 Mt. de tubo Qs.	Costo por c/tubo** Qs.	Costo/100 M. de tubo
63.5	8.16	138.72	9.68	164.56
76.2	12.18	207.06	14.45	245.65
101.6	20.07	341.19	24.82	421.94
152.4	43.59	741.03	51.73	879.41
203.4	75.56	1225.62	87.65	1490.05

Para el tramo de 100 mts. se tomaron 17 tubos, ya que c/u mide 6.10 Mts.

8. Diseño por Programación Lineal:

8.1 Esquema del Sistema.

El esquema general de la red se presenta en la figura - No. 4

8.2 Datos generales para el diseño.

-Ubicación de la bomba: Nodo 1

-Elevación de la bomba: 10 Mts.

* Precios usados por Gomez en su diseño

** Precios vigentes en el mercado hasta Diciembre de 1983.

(1) NODO

1 SECCION

FIGURA 4
ESQUEMA DE LA RED.

ESCALA GRAFICA.

-Eficiencia de la bomba:	80%
-Tiempo Anual de riego:	4104 Hrs.
-Factor de recuperación del capital	0.061157*
-Costo actual de energía:	Q.0.0593/H.P.
-Caudal a bombear:	198 $Mts.^3$ /Hora
-Tubería a usar:	PVC

8.3 Secciones del Sistema:

De acuerdo a figura 4 el sistema consta de 34 secciones, las características de cada sección se detallan en el - cuadro No. 5

8.4 Carga Requerida en Nodos Críticos del Sistema.

Para asegurar una aplicación uniforme del agua y con la presión requerida en todas las partes del proyecto, se - consideró 6 nodos críticos en función de la elevación y de la carga requerida a la entrada del lateral.

Los laterales lo conforman tuberías portátiles de aluminio de 3 pulgadas de diámetro, material que se escogió - por su versatilidad. Para el diseño se utilizó el criterio de mínima variación de presión, es decir se tomó en cuenta que la variación total de carga de presión en linea, - debida a la elevación y a las pérdidas de rozamiento, no exceda en 20% la presión de operación proyectado de los - aspersores, puesto que esto significa una variación del 10% traducido en descarga.

* En función de un interés compuesto de 2% anual definido por - AID y 20 años de vida útil del proyecto. (ver tabla No. 3 - del apéndice).

CUADRO No. 5.

SECCIONES DEL SISTEMA

Secc.	Longitud Mts.	Flujo $m^3/H.$	Diametros Disponibles mms.	Costo (C_{ij}) Q./mts *	Costo (C_{ij}) Q./mts. **	Gradiente de pérdida(J_{ij}) mt/mt	Long.seleccionada del diametro j(Mts.)
1	44	[illegible]	152.4	c_1 0.4512	0.53282	J_1 0.04378	x_1
			203.4	c_3 0.24955	0.91127	J_2 0.01073	x_2
2	[illegible]	[illegible]	26.2	c_3 0.12663	0.150232	J_3 0.21178	x_3
			101.6	c_4 0.20866	0.25804	J_4 0.02422	x_4
			152.4	c_5 0.45128	0.53282	J_5 0.00336	x_5
3	193	[illegible]	153.4	c_6 8.45128	0.53782	J_8 0.04178	x_6
			203.4	c_7 0.24955	0.93127	J_7 8.01023	x_7
4	72	[illegible]	101.4	c_8 0.20866	0.25804	J_8 0.08743	x_8
			152.4	c_9 0.45120	0.53382	J_9 0.01211	x_9
5	52	[illegible]	76.2	c_{10} 0.12663	0.150232	J_{10} 0.11128	x_{10}
			101.6	c_{11} 0.20866	0.258040	J_{11} 0.02422	x_{11}
			152.4	c_{12} 0.45320	0.53283	J_{12} 0.00336	x_{32}
6	84	[illegible]	76.2	c_{13} 0.12663	0.150232	J_{13} 0.11178	x_{13}
			101.6	c_{14} 0.30864	0.25804	J_{14} 0.02422	x_{14}
			152.4	c_{15} 0.4532	0.53282	J_{15} 0.00318	x_{15}
7	160	[illegible]	101.6	c_{16} 0.20866	0.25804	J_{16} 0.08743	x_{16}
			153.4	c_{17} 0.4532	0.53282	J_{17} 0.01211	x_{17}
8	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{18} 0.12663	8.150232	J_{18} 0.11178	x_{38}
			101.6	c_{19} 0.20866	0.25804	J_{19} 0.02422	x_{19}
			152.4	c_{20} 0.4532	0.53282	J_{20} 0.00336	x_{20}
9	124	48.5	76.2	c_{21} 0.12663	0.150232	J_{21} 0.11128	x_{21}
			101.6	c_{22} 0.20866	0.25804	J_{22} 0.02422	x_{22}
			152.4	c_{23} 0.4532	0.53242	J_{23} 0.00336	x_{23}
10	180	49.5	76.2	c_{24} 0.12661	0.150232	J_{24} 0.11128	x_{24}
			101.6	c_{35} 0.20866	0.25804	J_{25} 0.02422	x_{25}
			152.4	c_{26} 0.4532	0.53742	J_{26} 0.00338	x_{26}
11	124	[illegible]	078.3	c_{27} 0.12863	0.150232	J_{27} 0.11178	x_{27}
			101.6	c_{28} 0.20866	0.25804	J_{28} 0.02422	x_{28}
			352.4	c_{29} 0.4512	0.53782	J_{29} 0.00326	x_{29}
12	[illegible]	[illegible]	26.2	c_{30} 0.12662	0.150232	J_{30} 0.13178	x_{30}
			101.1	c_{31} 0.20866	0.25804	J_{31} 0.02422	x_{31}
			152.4	c_{33} 0.4522	0.52782	J_{32} 0.00336	x_{33}
13	[illegible]	49.5	24.3	c_{33} 0.12683	0.150232	J_{33} 0.11138	x_{73}
			101.6	c_{34} 0.20866	0.25804	J_{34} 0.02422	x_{34}
			152.4	c_{35} 0.4512	0.53782	J_{35} 0.00336	x_{35}
14	480	49.5	76.2	c_{36} 0.12661	0.150232	J_{36} 0.11178	x_{36}
			101.6	c_{37} 0.20866	0.25804	J_{37} 0.02422	x_{37}
			152.4	c_{38} 0.4512	0.53782	J_{38} 0.06326	x_{38}
15	56	49.5	76.2	c_{39} 0.12663	0.150232	J_{39} 0.11178	x_{39}
			101.6	c_{40} 0.20866	0.25804	J_{40} 0.02422	x_{40}
			152.4	c_{41} 0.4512	0.53282	J_{41} 0.00336	x_{41}
16	[illegible]	49.5	76.2	c_{42} 0.12663	0.150232	J_{42} 0.11178	x_{42}
			101.6	c_{43} 0.20866	0.23804	J_{43} 0.02422	x_{43}
			152.4	c_{44} 0.4532	0.53382	J_{44} 0.00338	x_{44}
17	[illegible]	[illegible]	38.2	c_{45} 0.12643	0.350232	J_{45} 0.11179	x_{45}
			101.6	c_{46} 0.20866	0.25804	J_{46} 0.03421	x_{46}
			152.4	c_{47} 0.4532	0.53782	J_{47} 0.00336	x_{47}
18	[illegible]	69.0	101.8	c_{86} 0.20866	4.25808	J_{48} 0.08743	x_{48}
			152.4	c_{49} 0.4522	0.53282	J_{49} 0.01212	x_{49}
19	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{50} 0.12662	0.150212	J_{50} 0.11138	x_{50}
			101.6	c_{51} 0.20866	0.25404	J_{51} 0.02433	x_{51}
			152.4	c_{52} 0.4532	0.53762	J_{52} 0.00238	x_{52}
20	[illegible]	[illegible]	101.6	c_{53} 0.20466	0.25804	J_{53} 0.08783	x_{53}
			252.4	c_{54} 0.4532	0.53387	J_{54} 0.033327	x_{54}
21	[illegible]	[illegible]	26.2	c_{55} 0.12663	0.150232	J_{55} 0.13138	x_{55}
			101.6	c_{56} 0.20666	0.25804	J_{56} 0.02427	x_{56}
			152.4	c_{57} 0.4532	0.53782	J_{57} 0.00336	x_{57}
22	[illegible]	48.5	76.2	c_{58} 0.12683	0.150332	J_{58} 0.11178	x_{58}
			101.6	c_{59} 0.20866	0.25804	J_{59} 0.02422	x_{59}
			152.4	c_{60} 0.4532	0.53782	J_{60} 0.08336	x_{60}
23	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{61} 4.13663	4.150232	J_{61} 0.11178	x_{61}
			101.6	c_{62} 4.20866	0.25864	J_{62} 0.62422	x_{62}
			152.8	c_{63} 0.4522	0.55782	J_{63} 0.60336	x_{63}
24	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{64} 0.13663	0.150232	J_{64} 0.31128	x_{64}
			101.6	c_{65} 0.20866	0.25804	J_{65} 0.03432	x_{65}
			152.4	c_{66} 0.4532	0.52282	J_{66} 4.00336	x_{66}
25	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{63} 0.12663	0.150222	J_{63} 0.11178	x_{67}
			101.6	c_{66} 0.20866	0.25804	J_{68} 0.62422	x_{61}
			153.4	c_{69} 0.04532	0.52782	J_{69} 0.00336	x_{69}
26	130	49.5	76.2	c_{70} 0.12663	0.150232	J_{70} 0.31178	x_{70}
			101.6	c_{71} 0.20866	0.25804	J_{71} 0.02422	x_{71}
			252.4	c_{72} 4.4532	0.53383	J_{73} 0.00326	x_{72}
27	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{73} 0.13843	0.150232	J_{73} 0.11178	x_{73}
			101.6	c_{74} 0.20966	0.25804	J_{24} 0.02422	x_{74}
			152.4	c_{75} 0.4522	0.53742	J_{75} 0.00336	x_{75}
28	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{36} 0.12663	0.150232	J_{76} 0.11178	x_{36}
			101.6	c_{37} 0.20866	0.25804	J_{22} 0.62423	x_{77}
			153.4	c_{78} 0.4532	0.53782	J_{78} 8.00336	x_{38}
29	[illegible]	[illegible]	76.2	c_{29} 0.13663	4.150332	J_{79} 0.33378	x_{79}
			101.6	c_{60} 0.20866	0.35804	J_{80} 0.62422	x_{80}
			153.4	c_{81} 0.4532	0.53783	J_{81} 0.00336	x_{01}
30	[illegible]	4x.5	76.3	c_{82} 0.12863	0.150332	J_{82} 0.11178	x_{82}
			101.6	c_{83} 0.20866	0.35804	J_{83} 0.03422	x_{83}
			152.4	c_{84} 0.4532	0.53782	J_{84} 0.00236	x_{84}
31	76	11.0	63.5	c_{85} 0.08484	0.10064	J_{85} 0.12823	x_{85}
			76.2	c_{86} 0.12663	0.150232	J_{86} 0.05275	x_{86}
32	157	49.5	76.2	c_{87} 0.13663	0.150222	J_{82} 0.11178	x_{87}
			101.6	c_{88} 0.20866	0.25804	J_{88} 0.02422	x_{88}
			153.4	c_{88} 0.4532	0.53782	J_{89} 0.00336	x_{89}
33	352	[illegible]	76.2	c_{90} 0.12663	0.150232	J_{80} 0.11378	x_{90}
			101.8	c_{91} 0.20866	0.35804	J_{91} 8.02423	x_{91}
			153.4	c_{92} 0.4513	0.53783	J_{92} 0.00316	x_{92}
34	[illegible]	[illegible]	36.2	c_{52} 0.12863	0.150332	J_{83} 0.11178	x_{93}
			101.6	c_{94} 0.20866	0.25804	J_{94} 0.02422	x_{94}
			152.4	c_{22} 0.4532	0.53782	J_{22} 0.00336	x_{95}

C_{ij} = Costo por unidad de longitud (Mts.) de tubería para la sección i de diámetro j, definido como el producto del costo inicial por el factor de recuperación del capital.

J_{ij} = Pérdida de carga por unidad de longitud de tubería (Mt./Mt.) para la sección i de diámetro j, calculado de acuerdo a fórmula 32 con HZ_{ij} según tabla 1 del apéndice.

i = 1, 2, 3,..............34 secciones

j = 1, 2, 3, 4, 5 diámetros

* Costos usados por Gómez

** Costos vigentes hasta [illegible] de [illegible].

Para el cálculo de la carga requerida a la entrada del lateral se usó la siguiente expresión:

$$Pp = Pa + 3/4\ (Phf + ph) + Pe + 0.1\ Phf \qquad (37)$$

Donde:

Pp = Presión requerida a la entrada del principal

Pa = Presión de operación del aspersor.

3/4= Usado para considerar el promedio de la presión de operación en el centro de la linea.

ph = Pérdida por desnivel del terreno

Pe = Altura del elevador

0.1 Phf = Pérdida de carga por accesorios.

Phf = pérdida de carga por fricción en el lateral, para riego por aspersión es recomendable usar la fórmula (32).

Para el cálculo de Phf se debe tomar en cuenta el factor de corrección de salidas múltiples (tabla No.2 del apéndice), usando para este caso el factor de 6 salidas múltiples.

En el cuadro 6 se presentan las cargas requeridas a la entrada del lateral, cotas y carga total en nodos críticos del sistema.

CUADRO No. 6

CARGA EN NODOS CRITICOS

Nodo	Carga a la entrada del lateral (Mt.)	Cota Mts.	Carga total (Mts.)
14	45.46	58.00	103.46
17	45.38	33.25	78.63
25	46.56	20.52	67.08
28	46.56	7.20	53.76
34	45.76	8.38	54.15
35	45.76	20.08	65.84

8.5 Planteamiento del Modelo Matemático.

En función de la información anterior, se planteó un modelo con costos de tubería utilizados en el diseño por el método simplificado y de esta forma comparar los resultados de ambos. Además se formuló un segundo modelo con costos de tubería vigentes hasta Diciembre de 1983, para actualizar los costos del sistema. Para cada uno de los modelos citados se usaron dos costos de energía, el actual y uno estimado en función del comportamiento del precio de la energía en el tiempo; con el objeto de apreciar la influencia de éste sobre los resultados del modelo.

8.5.1 Costo Anual de operación del sistema por metro de carga de presión (C)

Según fórmula (27)

$$C = \frac{Q.\ t.\ CE}{270\ .\ E}$$

Para costo actual y de Gomez

C = Q.223.00

Para Costo estimado

C = Q.291.00

8.5.2 Función objetivo y restricciones.

Z = Valor presente del costo anual de tuberías y de operación de la bomba.

De acuerdo a ecuación (36), haciendo uso de datos de los cuadros 5 y 6 tenemos:

Minimizar $Z = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + \ldots + C_{95}X_{95} + C\,P.$

Sujeto a.

1. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_8x_8 + j_9x_9 + j_{16}x_{16} + j_{17}x_{17} + j_{18}x_{18} + j_{19}x_{19} + j_{20}x_{20} + j_{27}x_{27} + j_{28}x_{28} + j_{29}x_{29} + j_{33}x_{33} + j_{34}x_{34} + j_{35}x_{35} - P \leq -93.46$

2. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_8x_8 + j_9x_9 + j_{16}x_{16} + j_{17}x_{17} + j_{36}x_{36} + j_{37}x_{37} + j_{38}x_{38} + j_{42}x_{42} + j_{43}x_{43} + j_{44}x_{44} - P \leq -68.63.$

3. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_{48}x_{48} + j_{49}x_{49} + -----$
$j_{53}x_{53} + j_{54}x_{54} + j_{76}x_{76} + j_{77}x_{77} + j_{78}x_{78} + j_{82}x_{82}+$
$j_{83}x_{83} + j_{84}x_{84} + j_{87}x_{87} + j_{89}x_{89} + j_{90}x_{90} + j_{91}x_{91}+$
$j_{92}x_{92} - P \leq - 44.15$

4. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_{48}x_{48} + j_{49}x_{49} + j_{53}x_{53} +$
$j_{54}x_{54} + j_{76}x_{76} + j_{77}x_{77} + j_{78}x_{78} + j_{82}x_{82} + j_{83}x_{83} +$
$j_{84}x_{84} + j_{87}x_{87} + j_{88}x_{88} + j_{89}x_{89} + j_{93}x_{93} + j_{94}x_{94} +$
$j_{95}x_{95} - P \leq - 55.84.$

5. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_{48}x_{48} + j_{49}x_{49} + j_{53}x_{53} +$
$j_{54}x_{54} + j_{55}x_{55} + j_{56}x_{56} + j_{57}x_{57} + j_{61}x_{61} + j_{62}x_{62} +$
$j_{63}x_{63} + j_{67}x_{67} + j_{68}x_{68} + j_{69}x_{69} + j_{73}x_{73} + j_{74}x_{74} +$
$j_{75}x_{75} - P \leq - 43.76$

6. $j_1x_1 + j_2x_2 + j_6x_6 + j_7x_7 + j_{48}x_{48} + j_{49}x_{49} + j_{53}x_{53}$
$+ j_{54}x_{54} + j_{55}x_{55} + j_{56}x_{56} + j_{57}x_{57} + j_{61}x_{61} + ----$
$j_{62}x_{62} + j_{63}x_{63} + j_{64}x_{64} + j_{65}x_{65} + j_{66}x_{66}$ ------
$- P \leq - 57.08$

7. $x_1 + x_2 = 44$

8. $x_3 + x_4 + x_5 = 68$

9. $x_6 + x_7 = 193$

10. $x_8 + x_9 = 72$

11. $x_{10} + x_{11} + x_{12} = 52$

12. $x_{13} + x_{14} + x_{15} = 84$

13. $x_{16} + x_{17} = 160$

14. $x_{18} + x_{19} + x_{20} = 76$

15. $x_{21} + x_{22} + x_{23} = 328$

16. $x_{24} + x_{25} + x_{26} = 180$

17. $x_{27} + x_{28} + x_{29} = 124$

18. $x_{30} + x_{31} + x_{32} = 156$

19. $x_{33} + x_{34} + x_{35} = 264$

20. $x_{36} + x_{37} + x_{38} = 480$

21. $x_{39} + x_{40} + x_{41} = 56$

22. $x_{42} + x_{43} + x_{44} = 324$

23. $x_{45} + x_{46} + x_{47} = 275$

24. $x_{48} + x_{49} = 53$

25. $x_{50} + x_{51} + x_{52} = 72$

26. $x_{53} + x_{54} = 118$

27. $x_{55} + x_{56} + x_{57} = 263$

28. $x_{58} + x_{59} + x_{60} = 172$

29. $x_{61} + x_{62} + x_{63} = 303$

30. $x_{64} + x_{65} + x_{66} = 144$

31. $x_{67} + x_{68} + x_{69} = 121$

32. $x_{70} + x_{71} + x_{72} = 120$

33. $x_{73} + x_{74} + x_{75} = 181$

34. $x_{76} + x_{77} + x_{78} = 60$

35. $x_{79} + x_{80} + x_{81} = 172$

36. $x_{82} + x_{83} + x_{84} = 160$

37. $x_{85} + x_{86} = 76$

38. $x_{87} + x_{88} + x_{89} = 157$

39. $x_{90} + x_{91} + x_{92} = 353$

40. $x_{93} + x_{94} + x_{95} = 348$

$$x_i \,,\; P \geq 0$$

$$i = 1, 2, 3, \ldots, 95$$

8.6 Solución de Modelos.

Para resolver los modelos formulados, debido al alto número de variables de decisión y restricciones que los definen, fue necesario hacer uso de un computador Hewlet Packard 3220 del centro de cómputo de la empresa -- "TELECTRO S.A.", ya que dicho centro cuenta con algoritmo del método simplex para programación Lineal.

Posterior a este cálculo, se obtuvo de Gerez y Grijalva (1976) el programa para solución Por Simplex de Programación Lineal, el cual fue grabado con el nombre de Simplex en la biblioteca DAG1 del centro de cómputo de la facultad de Agronomía.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

1. Resultados Por El Método Simplificado.

Gomez aplicó el método simplificado únicamente en el diseño de la tubería principal de cada subramal de la red, sus resultados se presentan en los cuadros Nos. 7 y 8.

CUADRO No. 7

RESULTADOS DEL METODO SIMPLIFICADO

Tramo (nodos)	Longitud (mts.)	Diámetros en mms.			Costo Anual Qs.
		101.6	152.4	203.4	
1 - 4	237			237	177.64
4 - 8	232		232		105.18
8 - 14	464	140.4	323.6		176.00
8 - 17	804	522.53	281.47		243.00
4 - 21	171		171		77.50
21 - 34	730	730			152.32
21 - 28	868	868			181.12
OTROS*	2303	2303			480.55

* Los diámetros de tubería de otros tramos de la red (secundarios) no considerados en el análisis por el método simplificado corresponden a tubos de 101.6 mms.

CUADRO No. 8

RESUMEN DE COSTOS POR EL METODO SIMPLIFICADO

Costo de Energía Q./H.P.	Presión Bomba Mts.	Potencia Bomba H.P.	COSTO ANUAL (Q.)			% del costo de Op. respecto al Costo de ambos
			Op. Bomba	Tubos	Op. Bomba + Tubos	
0.0593	104.36	94.46	23285.66	1593.0	24878.66	93

2. Resultados Por Programación Lineal.

En el cuadro No. 9 se presentan los resultados que satisfacen el modelo matemático planteado para el sistema, usando costos de tubería seleccionados por Gomez (1983) para su diseño y -- costos vigentes hasta Diciembre de 1983 (cuadro No. 4) respectivamente. Los precios de energía usados para cada naturaleza de costos de tubería, son el costo actual y el estimado para apreciar el efecto del costo de la energía en la solución del modelo.

3. Carga Dinámica Total.

La altura de presión dado por el modelo está definido por:

$$Hm = Pp + Hfp + ph \qquad (38)$$

Donde:

Pp = Presión requerida a la entrada del principal en la posición crítica = 45.46 Mts.

CUADRO No. 9.

DISEÑOS POR PROGRAMACION LINEAL

C = Costo de la energía (Q./H.P.)

Secc.	Longitud Mts.	Flujo M^3/H.	diámetros disponibles mm.	Longitud Seleccionada: Costos de Gomez C=0.0593	Longitud Seleccionada: Costos de Gomez C=0.07715	Longitud Seleccionada: Costos Actuales C=0.0593	Longitud Seleccionada: Costos Actuales C=0.07715
1	44	198	153.4 201.4	44	44	44	44
2	68	49.5	76.2 203.6 152.4	68	68	68	68
3	193	198	152.4 203.4	193	193	193	193
4	72	99	101.6 152.4	72	72	72	72
5	52	49.5	76.2 101.6 152.4	53	52	52	52
6	84	49.5	76.2 101.6 152.4	84	84	84	84
7	160	49.5	76.2 101.6 152.4	160	160	160	160
8	76	49.5	76.2 101.6 152.4	76	76	76	76
9	328	49.5	76.2 101.6 152.4	328	328	328	328
10	180	49.5	76.2 101.6 152.4	180	180	180	180
11	124	49.5	36.2 101.6 152.4	124	124	124	124
12	156	49.5	76.2 101.6 152.4	156	156	156	156
13	264	49.5	36.2 101.6 152.4	264	264	264	264
14	480	49.5	76.2 101.6 152.4	480	480	121.7 358.3	480
15	56	49.5	76.2 101.6 152.4	56	56	56	56
16	324	49.5	76.2 101.6 152.4	121.7 202.3	121.7 202.3	324	121.7 302.3
17	275	49.5	76.2 101.6 152.4	275	275	275	275
18	53	99.0	101.6 152.4	49.5 3.5	49.5 3.5	46 7	46 7
19	72	49.5	76.2 101.6 152.4	72	72	72	72
20	118	99.0	101.6 152.4	118	118	118	118
21	263	49.5	76.3 101.6 152.4	263	263	3 260	263
22	172	49.5	76.3 101.6 152.4	172	172	172	172
23	303	49.5	76.2 101.6 152.4	303	303	303	3 300
24	144	49.5	76.2 101.6 152.4	144	144	144	144
25	121	49.5	76.2 101.6 152.4	121	71.4 49.6	121	121
24	120	49.5	76.3 201.6 152.4	120	120	130	120
27	181	49.5	76.2 101.6 152.4	131.4 49.6	181	131.4 49.6	131.4 49.6
28	60	49.5	76.2 101.6 152.4	60	60	60	60
29	172	49.5	76.2 101.6 152.4	172	172	172	172
30	160	40.5	76.2 101.60 152.40	160	160	160	160
31	74	33	63.5 76.2	76	76	76	76
32	157	49.5	76.2 101.6 152.4	154 3	154 3	157	157
33	353	49.5	74.2 101.6 152.4	309 44	309 44	312.5 0.5	212.5 40.5
34	348	49.5	76.2 101.6 152.4	340	348	348	348

PRESION DE LA BOMBA: 100.376 Mca.

hfp = Pérdida de carga por Fricción = 6.916 Mts.

ph = Diferencia de altura entre la bomba y la posición crítica a la entrada del lateral = 48.0 Mts.

Hm = 100.376 Mts.

La Carga Dinámica Total (CDT) se define en base a la - ecuación:

$$CDT = Hm + 0.1\ hfp + S + hfs \qquad (39)$$

Donde:

0.1 hfp = pérdida de carga por accesorios y válvulas = 0.6916 Mt.

S = Altura de succión = 3.00 Mts.

hfs = Pérdida de carga por Fricción en la Succión = 0.63 Mts.

CDT = 104.69 Mts.

4. Potencia Requerida.

Los caballos de fuerza requeridos para operar el sistema se calcula por:

$$Hp = \frac{Q.\ \gamma\ .\ CDT}{76.\ Ef.} \qquad (40)$$

Donde:

Hp = Caballos de fuerza requeridos para operar la bomba.

Q = Caudal del sistema = 0.055 m^3/seg.

γ = Peso específico del agua = 1000 Kgs./ m^3.

Ef = Eficiencia de la bomba (80 %) = 0.8

CDT= Carga Dinámica Total = 104.69 Mts.

Hp = 94.71

5. Costos Anuales por Programación Lineal.

De acuerdo a resultados de los modelos, los distintos costos anuales de la red se resumen en el cuadro No. 10

CUADRO No. 10.

RESUMEN DE COSTOS POR PROGRAMACION LINEAL

Naturaleza de Costos de Tuberia	Costo de Energía Q./H.P.	Presión de la Bomba.	Potencia De Bomba H.P.	COSTO ANUAL (Q.)			% del costo de Op. respecto al costo total.
				De Op. De Bomba.	De Tubos	De Op. de Bomba + Tubos	
No.							
Actuales	0.05930	104.69	94.71	23345.87	1279.172	24625.04	94.8
	0.07735	104.69	94.71	30464.79	1279.172	31743.96	95.9
Actuales	0.05930	104.69	94.71	23345.87	1544.680	24890.55	93.8
	0.07735	104.69	94.71	30464.79	1544.680	32009.47	95.1

Examinando el diseño de la red por el método simplificado o de las diferencias y por programación lineal (cuadros 7 y 9), observamos algunas diferencias, esencialmente en lo referente a los diámetros de tubería de las diferentes secciones de la misma.

Analizando la elección de tubería para la red principal de cada subramal, que son los mismos tramos seleccionados por Gomez, observamos que para los nodos del 1 al 4 y del 4 al 8, ambos métodos seleccionan igual diámetro de tubos.

Para el tramo del nodo 8 al 14, Gomez selecciona diámetros de 101.6 y 152.6 mms., mientras que por programación lineal se eligen únicamente de 152.6 mms.; esto seguramente debido a la mayor carga de altura a vencer.

Del nodo 8 al 17 se eligen diámetros de 101.6 y 152.4 - mms. por el método simplificado; por programación lineal se seleccionan de 76.2 y 101.6 mms.

Para el tramo del nodo 4 al 21, el método de las diferencias requiere tuberías de 152.4 mms.; la técnica de optimización selecciona de 101.6 mms. y en una mínima parte (3.5 mts.) tubería de 152.4 mms.

Del 21 al 34 Gomez requiere diámetros de 101.6 mms.; programación lineal elige en su mayor parte tubería de 76.2 mms. y en menor longitud de 101.6 mms.; debido sin duda a la carga de presión que se gana por la baja elevación de estas areas.

Para las secciones comprendidas del nodo 21 al 28, Gomez eligió tubería de 101.6 mms., mientras que por programación - lineal se necesitan diámetros de 76.2 y 101.6 mms.

Para las secciones de la red que no forman parte de la red principal, Gomez eligió tuberías de 101.6 mms.; en el diseño por Programación Lineal se requieren de 76.2 mms.

Debido a las diferencias en la tubería seleccionada por ambos métodos, al analizar los cuadros 8 y 10 vemos que el - costo de tubería es mayor en Q.313.828 para el diseño por el método simplificado, debido a la elección de tuberías de mayor diámetros respecto al método de optimización.

La altura de presión de la bomba seleccionada por ambos métodos corresponde aproximadamente a el mismo valor, por lo que los costos de operación anual de la bomba son similares, obteniéndose por programación lineal según cuadros 8 y 10 mayor costo anual, equivalente en Q.60.21. También se infiere de los cuadros 8 y 10 que el costo de operación en ambos métodos, representa un alto porcentaje del costo anual de la - red (del 93 al 95.9%).

En función de las diferencias en costo enumeradas anteriormente, inferimos que el método simplificado reporta un costo anual mayor que el requerido por programación lineal en Q.253.62, condición suficiente para aceptar la hipótesis planteada.

Del cuadro 9 se observa que el diseño por programación lineal con costos actuales de tubería es similar al obtenido con costos de Gomez, existiendo pocos cambios de diámetros en algunas secciones, mientras que la altura de presión de la bomba se mantiene constante; lo anterior probablemente causado por el bajo incremento en el precio de los tubos.

También del cuadro 9 vemos que el diseño obtenido con los costos de energía usados (Q.0.593 y Q.0.07735/H.P.), es similar en cada naturaleza de costos de tubería, existiendo algunas diferencias en diámetros, pero la altura de la bomba permanece con el mismo valor.

Comparando resultados hidráulicos y económicos de ambos métodos vemos que las diferencias son pequeñas, por lo que puede considerarse que el diseño por el método simplificado se encuentra muy cerca del óptimo económico. De cualquier forma es mejor usar el método de optimización, ya que el diseño obtenido es siempre el óptimo económico y con resultados más rápidos debido al uso de la computadora.

VII. CONCLUSIONES.

1. Con el uso de programación lineal en el diseño de la red de distribución del proyecto de riego por aspersión para la Aldea Marajuma, Morazán, El Progreso, Se obtiene el mínimo costo anual de la red.

2. La aplicación de los métodos simplificado y programación lineal en el diseño de la red del proyecto considerado, proporcionan resultados hidráulicos y de costos muy similares, obteniéndose el diseño óptimo económico con la técnica de optimización.

3. El costo anual de la red, usando programación lineal con precios no actuales de tubería, es de Q. 24625.04, mientras que por el método simplificado el costo requerido es de Q. 24878.66, lográndose un ahorro anual del sistema de Q. 253.62 con la técnica de optimización.

4. El costo anual actual de la red por programación lineal es de Q. 24890.55.

5. En ambos métodos el costo anual de los tubos representa un pequeño porcentaje del costo anual de la red, (del 4.1 al 9%), no así el costo de la energía que representa un alto porcentaje (del 93 al 95.9%).

VIII. RECOMENDACIONES.

En función de la investigación realizada se recomienda:

1. Enfocar desde el punto de vista de sistema, aquellos problemas en donde es importante analizar cualitativa y cuantitativamente las interrelaciones entre los componentes del mismo.

2. Utilizar programación lineal en la toma de decisiones de procesos productivos, donde las relaciones se comporten de una manera lineal y se desee efectuar la forma óptima de asignar recursos limitados a actividades que compiten entre sí y que constituyen las salidas del sistema considerado.

3. Después de resolver un problema por programación lineal, previo a la ejecución de los resultados, un análisis con criterio de los mismos es importante.

4. Aplicar programación lineal en el diseño de redes de distribución de sistemas de riego por aspersión, esencialmente en el caso de redes ramificadas.

5. Para el caso específico del proyecto de riego de Marajuma, usar los diámetros de tubería asignados por el método de optimización, y una potencia de 100 H.P. para la bomba repartidos en dos unidades de 50 H.P., ya que con dichas unidades el sistema puede trabajarse parcialmente dependiendo de las necesidades, además se dispone de cierto rango de seguridad en la potencia.

6. Debe plantearse con mucho cuidado el modelo matemático de cualquier problema de programación lineal para obtener resultados lógicos.

IX. APENDICE

Descripción del Programa de Solución por Simplex de Programación Lineal.

Para satisfacer con los objetivos de la presente investigación, se obtuvo de Gerez y Grijalva (1976) el programa para solución por Simplex de Programación Lineal, el cual fue grabado en la biblioteca DAGI del centro de cómputo de la facultad de Agronomía con el nombre de Simplex.

Para una mejor orientación en el uso del mismo se describe a continuación las características del programa y una salida del mismo.

1. Subrutinas requeridas:
   Ninguna

2. Descripción de las variables:
   Salida del programa e inciso 9.6.4.2.

3. Dimensiones:
   La proposición DIMENSION deberá modificarse cuando,

   $M > 30$ y/o $N > 30$

4. Instrucciones para ejecutar.

   4.1 Conectar el enchufe de la pantalla.
   4.2 Halar el boton que se encuentra en la esquina superior izquierda del monitor o pantalla.
   4.3 Esperar a que aparezca en la esquina superior izquierda un guión de color verde fosforescente (cursor).
   4.4 Con el cursor en la posición superior izquierda teclear la palabra ETSS y luego oprimir la tecla (intro).

4.5 Observar en el borde derecho de la pantalla, dependiendo si se encienden los cuadros verdes se sabrá si el sistema está disponible está en modalidad de incersión o la entrada inhibida. Para poder operar debe estar encendida la señal del sistema disponible.

4.6 En pantalla debajo del cursor aparecerá, si el sistema está disponible una serie de puntos intercalados. Esto aparece en la parte superior de la pantalla y la divide en 80 columnas. Además se leerá un mensaje solicitando LOGON. Esta señal activa - la unidad lógica (o sea la pantalla o terminal) dentro del sistema de la computadora central. Para activar la pantalla operar:

/LOGON DAGI (intro)

4.7 El sistema solicita el password, o palabra clave - secreta: xxxxxxxxxx

4.8 El sistema responde: SIGN ON COMPLETE, FECHA, HORA. Lo cual indica que el sistema está listo para operar en alguno de los posibles modos.

4.9 Ponerse en modo de entrada de datos: /INPUT (intro)

4.10 Cargar el programa SIMPLEX : /INCLUDE SIMPLEX -- (intro)

4.11 Introducir datos de la siguiente manera:

```
           1234567890123456789012345678 90 ...  (Cols. )
Linea 1    M (col.* 1-2)  N (col. 3-4)
Linea 2    A1i (col. 1-10, 11-20, ......................)
      3    A2i (col. 1-10, 11-20, ......................)
      .
      .
      .
      k+1  Aki (col. 1-10, 11-20, ......................)
      .
      .
      .
      m+1  Ami (col. 1-10 11-20, ........................)
      m+2  Bk  (col. 1-10, 11-20, ......................)
      m+3  Ci  (col. 1-10, 11-20, ......................)
      m+4  Max ó Min (col. 1-3)
      m+5  Linea en.blanco (intro)
      m+6  /END
```

NOTA:

Después de cada cifra entera poner punto (.)

Después de cada línea, teclear (intro)

$i = 1, 2, \ldots\ldots L$

4.12 Salirse del modo y ejecutar: /ENDRUN

4.13 Esperar despliegue de resultados.

5. Salida.

---

* Columna

```
C      PROGRAMA PARA APLICAR EL METODO    SIMPLEX EN UN SISTEMA DE ECUACIO-
C      NES LINEALMENTE INDEPENDIENTES DE ORDEN M POR N, QUE CONTIENE M VECTO-
C      RES INDEPENDIENTES.
C      EL SIGINIFICADO DE LAS VARIABLES EMPLEADAS ES
C      ASK=VARIABLE CON LA QUE SE INDICA EL TIPO DE OPTIMIZACION(MAX,MIN)
C      B=MATRIZ DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES
C      C=COEFICIENTES DE COSTOS DE LA FUNCION OBJETIVO A OPTIMIZAR
C      D=INDICES QUE INDICAN CUANDO DETENER EL METODO (EVALUADORES NETOS)
C      IR=UNIDAD DE LECTURA, EL PRINT ES IMPRESION
C      LA Y COI=INCOGNITAS Y SUS COEFICIENTES EN LA FUNCION A OPTIMIZAR
C      QUE FORMAN LA BASE
C      LIM=LIMITE DE ITERACIONES
C      M=NUMERO DE RENGLONES DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES
C      N=NUMERO DE COLUMNAS DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES
C      PO=VECTOR DE CONSTANTES INDEPENDIENTES O ESTIPULACIONES
C      VALZ=VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO A OPTIMIZAR
C
       DIMENSION B(30,30),PO(30,1),C(1,30),LA(30,1),COI(30,1),D(1,30)
       INTEGER ALF,ASK,MIN,MAX
       DATA ALF/3HMIN/,IR/1/,IW /3/
C
C      LECTURA DEL ORDEN DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES
C
     1 READ(IR,100) M,N
       IF(M) 2,2,3
     2 CALL EXIT
C
C      LECTURA DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES
C
     3 DO 4 I=1,M
     4 READ(IR,150) (B(I,J),J=1,N)
C
C      LECTURA DEL VECTOR DE CONSTANTES INDEPENDIENTES O ESTIPULACIONES
C
       READ(IR,150) (PO(I,1),I=1,M)
C
C      LECTURA DE LOS COEFICIENTES DE COSTOS DE LA FUNCION A OPTIMIZAR
C
       READ(IR,150) (C(1,J),J=1,N)
C
C      LECTURA DEL TIPO DE OPTIMIZACION DESEADO
C
       READ(IR,450) ASK
```

```
      C
      C     IMPRESION DE DATOS
      C
            PRINT 950, M,N
            PRINT 200
            DO 5 I=1,M
          5 PRINT 250, (B(I,J),J=1,N)
            PRINT 300
            DO 6 I=1,M
          6 PRINT 350, PO(I,1)
            PRINT 400
            PRINT 250, (C(1,J),J=1,N)
            PRINT 425, ASK
      C
      C     FIJAR LIMITE DE ITERACIONES Y OBTENER -Z SI SE DESEA MAXIMIZAR
      C
            LIM=4*M
            IF(ALF.EQ.ASK) GO TO 8
            DO 7 J=1,N
          7 C(1,J)=-C(1,J)
      C
      C     BUSQUEDA DE LOS M VECTORES UNITARIOS LINEALMENTE INDEPENDIENTES
      C     PARA LA PRIMERA ITERACION
      C
          8 DO 10 J=1,N
            L=0
            K=0
            DO 9 I=1,M
            IF(B(I,J).EQ.0.0) GO TO 9
            K=I
            L=L+1
          9 CONTINUE
            IF(L.NE.1) GO TO 10
            IF(B(K,J).NE.1) GO TO 10
            LA(K,1)=J
            COI(K,1)=C(1,J)
         10 CONTINUE
            ITERA=1
      C     PROCEDIMIENTO ITERATIVO
         11 IF(ITERA.LT.LIM) GO TO 12
            PRINT 500
            GO TO 1
         12 DO 13 I=1,N
```

```
FORTRAN IV 360N-FO-479 3-8          MAINPGM            DATE   21/11/83     TIME     14
      13 D(1,I)=0.0
         VALZ=0.0
C
C        OBTENCION DEL VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO QUE SE ESTA OPTIMIZANDO
C
         DO 14 K=1,M
      14 VALZ=VALZ + PO(K,1)*COI(K,1)
C
C        CALCULO DE LOS EVALUADORES NETOS QUE INDICAN CUANDO PARAR
C
         DO 17 J=1,N
         DO 16 I=1,M
      16 D(1,J)=D(1,J) + B(I,J)*COI(I,1)
         D(1,J)=D(1,J) - C(1,J)
      17 CONTINUE
C
C        IMPRESION DE LOS EVALUADORES NETOS
C
         PRINT 550, ITERA
         PRINT 600
         XMENOS= VALZ*(-1.00)
         DO 18 I=1,M
      18 PRINT 650, LA(I,1),PO(I,1)
         IF(ASK.EQ.ALF) PRINT 700,VALZ
         IF(ASK.NE.ALF) PRINT 700,XMENOS
      31 PRINT 750
         PRINT 250, (D(1,J),J=1,N)
         AMAX=D(1,1)
         LC=1
C
C        SE INDAGA SI YA TERMINO EL PROCESO, EN CASO CONTRARIO SE BUSCA LA
C        INCOGNITA QUE ENTRARA A LA BASE
C
         DO 19 J=1,N
         IF(AMAX.GE.D(1,J)) GO TO 19
         AMAX=D(1,J)
         LC=J
      19 CONTINUE
         IF(AMAX.GT.0.0) GO TO 21
C
C        IMPRESION DE LOS VALORES QUE OPTIMIZAN LA FUNCION
C
         PRINT 800
```

```
      DO 20 I=1,M
   20 PRINT 650, LA(I,1),PO(I,1)
      IF(ASK.EQ.ALF) PRINT 700,VALZ
      IF(ASK.NE.ALF) PRINT 700, XMENOS
   35 GO TO 1
   21 L=0
      K=0
C
C     BUSQUEDA DE LA INCOGNITA QUE SALDRA DE LA BASE
C
      DO 25 I=1,M
      IF(B(I,LC).LE.0.0) GO TO 22
      GO TO 23
   22 L=L+1
      GO TO 25
   23 K=K+1
      IF(K.NE.1) GO TO 24
      AMIN=PO(I,1)/B(I,LC)
      LR=I
      GO TO 25
   24 ATEMP=PO(I,1)/B(I,LC)
      IF(AMIN.LE.ATEMP) GO TO 25
      AMIN=ATEMP
      LR=I
   25 CONTINUE
C
C     VERIFICAR QUE LA SOLUCION ESTE ACOTADA
C
      IF(L.NE.M) GO TO 26
      PRINT 900
      GO TO 1
C
C     INSERTAR LA NUEVA INCOGNITA EN LA BASE
C
   26 LA(LR,1)=LC
      COI(LR,1)=C(1,LC)
C
C     TRANSFORMAR LA MATRIZ DE COEFICIENTES Y EL VECTOR DE CONSTANTES IN
C     DEPENDIENTES
C
      ATEMP=B(LR,LC)
      DO 27 J=1,N
   27 B(LR,J)=B(LR,J)/ATEMP
```

```
      PO(LR,1)=PO(LR,1)/ATEMP
      DO 29 I=1,M
      IF(I.EQ.LR) GO TO 29
      ATEMP=B(I,LC)
      DO 28 J=1,N
   28 B(I,J)=B(I,J) - ATEMP*B(LR,J)
      PO(I,1)=PO(I,1) - ATEMP*PO(LR,1)
   29 CONTINUE
      ITERA=ITERA + 1
      GO TO 11
C
C     FORMATOS DE LECTURA E IMPRESION
C
  100 FORMAT (2I2)
  150 FORMAT (8F10.2/F10.2)
  200 FORMAT (////,38X,  'LA MATRIZ DE COEFICIENTES ESTRUCTURALES DEL SI
     1STEMA ES',/)
  250 FORMAT (/,5X,8( E13.5,2X))
  300 FORMAT (////,45X,  ' EL VECTOR DE CONSTANTES INDEPENDIENTES ES',/)
  350 FORMAT (/,58X,E13.5)
  400 FORMAT (////,37X,  ' LOS COEFICIENTES DE COSTOS DE LA FUNCION A OP
     1TIMIZAR SON',/)
  425 FORMAT(////,37X ,'**TIPO DE OPTIMIZACION DESEADA= ',A4)
  450 FORMAT(A3)
  500 FORMAT(////,54X,  ' EL PROBLEMA ES CICLICO')
  550 FORMAT(////,53X,  ' +++ ITERACION NUMERO ',I2)
  600 FORMAT(////,18X,  ' INCOGNITAS QUE FORMAN LA BASE',32X,'VALOR DE L
     1AS INCOGNITAS',/)
  650 FORMAT (/,31X,'X',I2,50X,F15.8)
  700 FORMAT(////,35X,  ' VALOR DE LA FUNCION QUE SE ESTA OPTIMIZANDO ',
     *F20.8)
  750 FORMAT (////,37X,  ' EVALUADORES NETOS QUE INDICAN CUANDO DETENER
     1EL PROCESO',/)
  800 FORMAT(////,43X,  '*** LOS VALORES QUE OPTIMIZAN LA FUNCION SON',/
     1/,28X,  ' INCOGNITA',45X, 'VALOR',/)
  850 FORMAT(////,41X,  'EL VALOR OPTIMO DE LA FUNCION ES ',E15.8)
  900 FORMAT(////,51X,  'LA SOLUCION NO ESTA ACOTADA')
  950 FORMAT(1H1,////,42X,  ' EL ORDEN DE LA MATRIZ DE COEFICIENTES ES '
     1,I2,  'X',I2)
      END
```

TABLA No. 1

COEFICIENTE DE FRICCION SEGUN LAS CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DEL TUBO

TUBO	C
Plástico (4 ó más pulgadas	150
(2 y 3 pulgadas)	140
Asbesto cemento	140
Aluminio (con coplas cada 30 pies)	150
Hierro galvanizado	130
Hierro (nuevo)	130
(15 años de uso	100

Fuente: (ISRAELSEN y HANSEN, 1979)

TABLA No. 2

FACTOR (F) PARA CALCULAR PERDIDAS POR FRICCION EN TUBERIA CON SALIDAS MULTIPLES

Número de salidas	Valor de F	Número de salidas	Valor de F
1..............	1.000	17................	.375
2..............	.634	18................	.373
3..............	.528	19................	.372
4..............	.480	20................	.370
5..............	.451	21................	.369
6..............	.433	22................	.368
7..............	.419	23................	.367
8..............	.410	24................	.366
9..............	.402	25................	.365
10..............	.396	26................	.364
11..............	.392	27................	.364
12..............	.388	28................	.363
13..............	.384	29................	.363
14..............	.382	30................	.362
15..............	.379		
16..............	.377	35................	.359

FUETE: (Quiñonez, 1982)

TABLA No. 3

FACTOR DE RECUPERACION DE CAPITAL AL 2%

AÑO	RECUPERACION DE CAPITAL	AÑO	FACTOR RECUPERACION CAPITAL
1	1.020000	11	0.102178
2	0.515050	12	0.094560
3	0.346755	13	0.088118
4	0.262624	14	0.082602
5	0.212158	15	0.077825
6	0.178526	16	0.073650
7	0.154512	17	0.069970
8.	0.136510	18	0.066702
9	0.122515	19	0.063782
10	0.111327	20	0.061157

FUENTE: (Gomez, 1983)

X. BIBLIOGRAFIA

1. AMISIAL, R.A. La programación lineal en el análisis de sistemas de recursos hidráulicos. Mérida, Venezuela, CIDIAT, 1977. 62 p.

2. BUSTAMANTE PACAS, J.J. La programación lineal en ingeniería química; optimización de la formulación del vidrio. Tesis Ing. Químico. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 1977. 103 p.

3. CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO INTEGRAL DE AGUAS Y TIERRAS (CIDIAT). Manual de riego por aspersión. Mérida, Venezuela, 1980. (Serie Riego y Drenaje)

4. CUEVAS RENAUD, B. Análisis y diseño de sistemas de riego por aspersión. México D.F., Subsecretaría de Agricultura y Operación; Dirección General de Distritos y Unidades de Riego, 1978. 169 p. (Memorandum Técnico Num. 375)

5. ESCOBAR ECHEVERRIA, L.A. Teoría de sistemas. Tésis Ing. en Ciencias y Sistemas. Guatemala, USAC, Facultad de Ingeniería, 1976. 78 p.

6. FERNANDEZ FUENTES, J.G. Aplicación de la programación lineal a la localización de plantas industriales. Tesis Ing. Químico. Guatemala, USAC, Fac. de Ingeniería, 1980. 81 p.

7. GARCIA MARTINEZ, L.E. Copias del curso de sistemas de recursos hidráulicos. Guatemala, USAC, Fac. de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), 1982. s.p.

8. GARCIA MARTINEZ, L.E. Efecto de la información limitada en la aplicación del análisis de sistemas al planeamiento de proyect os de recursos-hidráulicos en paíces en vías de desarrollo. Guatemala, Instituo Geográfico Nacional/USAC-ERIS, 1973. 186 p.

9. GEREZ, V., GRIJALVA, M. El enfoque de sistemas. - México, Editorial Limusa, 1976. 575p.

10. GOMEZ CRUZ, C.A. Estudio de introducción y diseño- de riego por aspersión para la aldea Marajuma, Morazán, El Progreso. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Fac. de Agronomía, 1983. 89p.

11. HAIMEZ, J.Y. Técnicas de optimización y su aplicación a los problemas de recursos de agua. Mérida, Venezuela, CIDIAT, 1973. 16 p.

12. HART, R.D. Agroecosistemas; conceptos básicos. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 1979. 211 p.

13. ISRAELSEN, D., HANZEN, V. Principios y aplicaciones del riego. 2a. Ed. Madrid, España, Reverté, 1979. 315 p.

14. MENA MARTINEZ, J.A. Notas de programación lineal.- Chapingo, México, Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Irrigación, 1980. 195 p.

15. QUIÑONEZ DE LA CRUZ, O.L. Estudio de factibilidad para la introducción de riego por aspersión en los terrenos comunales de El Rodeo, Palo Amontonado. Tesis Ing. Agr. Guatemala, USAC, Fac. de Agronomía, 1982. 72 p.

16. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS, FACULTAD DE INGENIERIA, ESCUELA REGIONAL DE INGENIERIA SANITARIA (ERIS). Manual de cruso corto sobre análisis de siste - mas aplicado a problemas de ingeniería sanita - ria. Guatemala, 1978. 169 p.

17. U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. Irrigation water re queriments. Technical release No. 21, 1970. -- 11 p.

18. SILVA MORALES, S. Copias del curso de programación- y sistemas. Guatemala, USAC, Facultad de Inge- ría, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). 1982. s.p.

Vo Bo.

CARLOS DE GUATEMALA

DE AGRONOMIA
versitaria, Zona 12.
do Postal No. 1545
CENTRO AMERICA

Referencia

Asunto

"IMPRIMASE"

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DECANO
FACULTAD DE AGRONOMIA

Ing. Agr. César Castañeda S.
D E C A N O