



Diseño de un modelo de producción para huertas urbanas

Design of a production model for urban orchards

Edilberto Hinestroza Obregón¹; José Luis Forero Castro²; Rubén Darío Bonilla Isaza³

Para citar este artículo: E. Hinestroza-Obregón, J. L. Forero-Castro, R. D. Bonilla-Isaza, "Diseño de un modelo de producción para huertas urbanas". *Revista Vínculos: Ciencia Tecnología y Sociedad*, vol. 16, no. 2, julio-diciembre de 2019, pp. 196 - 208. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.15460>

Enviado: 12/08/19/ Recibido: 23/09/19/ Aprobado: 11/09/2019

Resumen

Los modelos de producción podrían garantizar el uso eficiente de los recursos en las huertas urbanas empleando herramientas de optimización que potencialicen los cultivos en términos de rendimiento y costo-beneficio. Sin embargo, en Colombia se ha detectado que el porcentaje de implementación de estos modelos de optimización han sido bajos, por tal motivo el objetivo de este artículo es diseñar un modelo de producción para huertas urbanas empleando un modelo de programación lineal que optimice las variables que interactúan en ella. La metodología está basada en el modelamiento, simulación y diseño de cultivos urbanos de tipo suelo, hidropónicos y aeropónicos, lo cual lleva a la selección óptima de alternativa de producción según los parámetros técnicos de los cultivos, y a la garantía de un máximo volumen de producción al menor costo posible. Finalmente, se concluye diseñando el modelo de producción mediante la selección de la alternativa de producción del suelo con sus respectivas plantas a sembrar.

Palabras Clave: diseño, huerta urbana, modelo, optimización, producción, recursos.

Abstract

Production models could guarantee the efficient use of resources in urban orchards using optimization tools that potentiate crops in terms of yield and cost-benefit. However, in Colombia it has been detected that the percentage of implementation of these optimization models has been low, for this reason the objective of this article is to design a production model for urban orchards using a linear programming model that optimizes the variables that interact in it. The methodology is based on the modeling, simulation and design of urban soil type, hydroponic and aeroponic crops, which leads to the optimal selection of production alternative according to the technical parameters of the crops, and to the guarantee of a maximum production volume at the lowest possible cost. Finally, we conclude by designing the production model by selecting the production alternative of the soil with its respective plants to be sown.

Keywords: design, urban garden, model, optimization, production, resources.

1. Tecnólogo Industrial, Colombia, Inemflex S.A.S. Correo electrónico: godislove077@hotmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1099-8180>
2. Tecnólogo Industrial, Colombia, Pinturas Imperio SAS. Correo electrónico: joseto_777@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8241-2460>
Ingeniero Electricista, M.Sc Ingeniería,-Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Profesor asociado Universidad Distrital Francisco
3. José de Caldas, Grupo de investigación: DEDALO. Correo electrónico: rdbonillai@yahoo.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4607-7479>

1. Introducción

1.1 Contextualización y problemática

En Colombia se han desarrollado iniciativas en el uso de las huertas urbanas como alternativa en la producción de insumos agrícolas muy importantes en la canasta familiar, tales como el tomate, la cebolla, la zanahoria, la lechuga, la papa entre otros, que representan un alto consumo en sectores densamente poblados [1]. No obstante, aunque la implementación de estas iniciativas se encuentra en curso en ciudades principales como Bogotá D.C., el porcentaje de uso de las huertas urbanas en áreas residenciales constituye el 0.075% [1], el cual es un valor casi nulo en relación con la cantidad de familias que eventualmente se podrían beneficiar de estas iniciativas. Por tanto, la problemática de esta investigación se enfoca en la ausencia del uso de las huertas urbanas como fuente de abastecimiento alimenticio en las distintas comunidades urbanas, presumiendo que una de las causas de este hecho se debe a la baja implementación de estrategias en modelamiento y simulación que tengan efecto en la maximización del potencial aprovechamiento de estos recursos.

En esta medida, el objetivo de este artículo es diseñar un modelo de producción para huertas urbanas basado en la aplicación de un modelo de optimización que potencialice las variables que interactúan en ella, incentivando así el uso de las huertas urbanas como medio de abastecimiento alimenticio en comunidades urbanas. Como caso de uso, se seleccionó el barrio Sierra Morena de la localidad Ciudad Bolívar en la ciudad de Bogotá D.C. Una de las características de esta localidad, es el estrato socioeconómico 1 y 2 de la comunidad con una densidad de 5252,78 habitantes por kilómetro cuadrado.

1.2. Concepto, beneficios y riesgos de una huerta urbana

Las huertas urbanas han tenido una gran participación en las comunidades desde hace muchos años atrás, un ejemplo de ello es que durante la segunda guerra mundial se llegaron a consumir el 40% de los alimentos procedentes de

las huertas, a tal punto que llegaron a convertirse en una fuente indispensable de autoabastecimiento alimenticio en las distintas comunidades. Las huertas urbanas se definen como espacios de cultivo destinados a la producción limpia de alimentos que suelen desarrollarse en jardines, balcones, terrazas o espacios comunitarios no productivos, como terrenos baldíos [3].

Aunado a lo anterior, la agricultura urbana contribuye a las comunidades en la sustentabilidad socio-ecológica [4], al convertir áreas recreativas, baldíos, azoteas y otros espacios de tamaños variables en áreas productivas multifuncionales, convirtiéndose en una efectiva estrategia que contribuye en aspectos esenciales, tales como: la soberanía alimentaria, la generación de empleo, la mejora de la calidad de vida, la educación ambiental, las relaciones sociales, la transformación social y la regeneración urbana [5]. Complementariamente, se define a las huertas urbanas como la práctica agrícola y pecuaria en áreas intra y periurbanas de las ciudades, que por iniciativa de los productores afincados muchas veces en los barrios marginales (favelas, rancherías o barriadas), utilizan los mismos recursos locales, como mano de obra, espacios, agua y desechos sólidos orgánicos, con el fin de generar productos de autoconsumo y también destinados a la venta en el mercado [6].

En este sentido, la implementación de una huerta urbana en una comunidad juega un papel importante en el desarrollo económico, ecológico y social de esta, tal como se mencionaba anteriormente en términos de la generación de ingresos monetarios, el aumento de la calidad alimentaria gracias a la mayor diversidad de la ingesta, el mejoramiento del medio ambiente como consecuencia del reciclado de los desechos, la protección de la biodiversidad local [7], y sobre todo en el aspecto en la seguridad alimentaria que se plantea en el proyecto de ley 128 del 2010 donde el 40.8% de los hogares en Colombia padecen de inseguridad alimentaria debido a que solo se consumen 30 gramos de hortalizas y frutas en el día por persona, cuando la OMS (Organización Mundial de la Salud) sugiere que una persona debería consumir 400 gramos por día entre hortalizas y frutas [1].

Uno de los factores más importantes en los cuales la agricultura urbana le lleva una gran ventaja a la agricultura convencional es en el rendimiento de los cultivos. Esto en la medida en que la agricultura urbana al tener espacios más limitados intensifica el uso del suelo, lo cual hace que se tenga un mayor rendimiento por metro cuadrado en una gran cantidad de cultivos [1] (Tabla 1).

Cultivo	Rendimiento Estándar (Kg/m ²)	Rendimiento promedio agricultores urbanos (Kg/m ²)
Lechuga	1,6	1,6
Haba	0,25	1,85
Papa	1,9	10,4
Repollo	3,25	3
Arveja	0,1	1,9
Uchuva	1,7	3,75
Tomate	2,5	0,3
Frijol	0,45	1,4

Tabla 1. Rendimiento de cultivos en agricultura convencional vs agricultura urbana

En la Tabla 1 se evidencia como un cultivo que tiene gran importancia en la canasta familiar como lo es la papa, tiene un mayor rendimiento en la agricultura urbana aproximadamente 10 veces más respecto a la convencional, lo cual valida la importancia de la implementación de las huertas urbanas en las distintas comunidades. Sin embargo, así como la implementación de una huerta urbana conlleva un sinnúmero de benéficos, también existen algunos riesgos que se pueden presentar si no se hace una adecuada implementación y uso de esta, dentro de ellos están: la generación de impactos negativos en el medio ambiente y la salud de los habitantes, el aumento de recursos como agua, tierra, energía y mano de obra, la reducción de la capacidad del medio ambiente para absorber la contaminación, entre otros [8].

1.3. Tipos y métodos de producción en una huerta urbana

Las huertas urbanas pueden producir hortalizas, frutas, hierbas aromáticas, flores y plantas ornamentales. Existen dos tipos de huertas urbanas que se diferencian por el terreno y objetivo de desarrollo de implementación, las huertas urbanas

comunitarias y las huertas familiares o domésticas. Las huertas comunitarias tienen lugar en una pequeña zona de tierra ubicada en espacios públicos, mientras que las huertas familiares o domésticas de Maceto, están ubicadas en balcones, terrazas, jardineras o mesas de cultivo [1].

Para la huerta urbana que se desea desarrollar se tuvieron en cuenta para el análisis de selección, tres métodos diferentes de producción como lo son la hidroponía, la aeroponía, y la producción típica en tierra (suelo). Un cultivo hidropónico se refiere al cultivo de plantas sin usar tierra, nutridas por soluciones de agua y sales minerales en lugar de usar los métodos tradicionales de cultivo [9]. La aeroponía, en cambio, es el sistema más rápido para cultivar plantas, dado que estas viven en el aire, y de forma similar a la hidroponía, dichas plantas se deben sostener de forma que se mantengan las raíces en un espacio total o parcialmente cerrado donde las sales necesarias se hacen llegar en una solución de nutrientes que por medio de un spray o su vaporización entran en contacto con las raíces de las plantas, dicha solución es a partir de gotas de tamaño normal a una neblina de microgotas de 50 micrómetros o menos (lo que usan en la NASA) para facilitar la humedad y el transporte de nutrientes necesarios permitiendo además que las raíces tomen todo el oxígeno y CO₂ que necesiten del aire [10].

1.4. Modelos de producción y optimización

Actualmente es notable encontrar en las organizaciones deficiencias, a nivel funcional, en la infraestructura tecnológica que tienen implementada, considerando aún más el que no esté integrada a la estructura organizacional y a la generación de valor, tanto de la productividad como del sistema de información [11]. Esto refleja un nivel de desempeño bajo de los procesos y de las capacidades operativas y, por lo tanto, no constituye el soporte eficaz del cumplimiento de la misión empresarial y de sus lineamientos estratégicos, de allí nace la importancia de la implementación de metodologías que permitan optimizar los procesos en los diferentes modelos de producción dentro de las organizaciones. Un modelo de producción son los métodos y procedimientos que sirven como patrón, arquetipo, molde o marco de referencia para la elaboración y producción de bienes y/o servicios, en donde existe la entrada de unos recursos (mano

de obra, materiales, maquinas, materia prima), los cuales se combinan y sufren una transformación en el proceso, agregando valor para la elaboración de dichos bienes y/o servicios.

En este artículo se presenta una estrategia en la determinación de un modelo de producción eficiente implementado en huertas urbanas usando como herramienta modelos de optimización que podrían garantizar el adecuado aprovechamiento de los recursos en el proceso productivo. Sentado esto, un modelo de optimización trata de encontrar valores, entre el conjunto de todos los valores para las variables de decisión, que optimicen (maximicen o minimicen) una función objetivo y que satisfaga las restricciones dadas [12].

Para desarrollar el modelo de producción ya mencionado se eligió dentro de la rama de modelos de optimización la programación lineal, debido a la naturaleza de las variables de decisión que intervienen en el proceso, así como la función objetivo y sus restricciones hacen que este modelo sea el que mejor se ajuste a lo que se desea mostrar en los resultados. La importancia de los modelos de programación lineal se refleja en que estos abarcan cualquier tipo de actividad humana, haciendo de ellos modelos muy apetecidos en las distintas industrias como en la organización de la producción, planificación de la operación, selección de procesos, asignación de tareas, agronomía, en desarrollo económico, entre otras aplicaciones [13]. Para el caso de estudio se desarrollaron tres modelos diferentes de optimización, los cuales tienen como función objetivo maximizar el volumen de producción, las utilidades de la huerta y minimizar los costos de producción de los cultivos, que podría conllevar a que la huerta urbana sea autosostenible en los hogares donde se implemente.

2. Materiales y métodos

El diseño metodológico incluyó tres etapas, modelamiento, simulación y diseño, las cuales se describen a continuación.

2.1. Modelamiento

Con el propósito de obtener un modelo matemático

mediante el cual se desea optimizar el potencial de cada uno de los cultivos a sembrar en la huerta en cuanto a rendimiento y costo-beneficio, aprovechando al máximo cada uno de los recursos disponibles, se procedió con la evaluación técnica de 13 plantas de tipo hortaliza (ajo, apio, arveja, cebolla cabezona blanca, cebolla junca, cilantro, espinaca, frijol, habichuela, lechuga, papa, tomate, zanahoria) cuyos parámetros técnicos de cultivo se muestran a continuación en la Tabla 2.

Parámetro	Unidad
Distancia Entre Plántulas	<i>M</i>
Distancia Entre Surcos	<i>M</i>
Densidad Poblacional	<i>plantas/m²</i>
Tiempo Primera Cosecha	<i>Meses</i>
Tiempo Medio de Vida	<i>Meses</i>
Altura	<i>Msnm</i>
Fertilizantes Mayores	<i>NPK</i>
Rendimiento	<i>kg/m²</i>
Consumo de Agua	<i>l/(m²*mes)</i>
Valor Medio en el Mercado	<i>\$/kg</i>
Costos de Producción	<i>\$/#plantas</i>

Tabla 2. Parámetros técnicos evaluados en la determinación de la producción agrícola en la región de Bogotá D.C.

Fuente: elaboración propia.

Los parámetros de la Tabla 2 fueron la base del desarrollo de un modelo matemático basado en programación lineal entera, desarrollado y ejecutado en el software algebraico GAMS. Los conjuntos establecidos fueron la determinación de la producción agrícola de un cultivo de dimensión *j* (ajo, apio, arveja, cebolla cabezona blanca, cebolla junca, cilantro, espinaca, frijol, habichuela, lechuga, papa, tomate, zanahoria), para una alternativa de cultivo tipo *i* (suelo, aeropónico, hidropónico), y una cantidad de fertilizante aplicada tipo *k* (nitrógeno, fósforo, potasio).

El modelo de programación lineal permitió el desarrollo de tres modelos de optimización que buscan garantizar el uso eficiente de los recursos en una huerta urbana. La función mono-objetivo del primer modelo busca la maximización del volumen de producción en términos del consumo promedio en las familias de Bogotá, en cada uno de los

cultivos, lo cual conlleva a que la huerta urbana sea autosostenible. La variable de salida del sistema es el número de metros cuadrados a sembrar de cada uno de los cultivos en la alternativa seleccionada, que se presentan a continuación:

- $X(i, j)$ Área en metros cuadrados a sembrar de cada cultivo j en la alternativa i .

Los parámetros ingresados en el modelo son:

- $R(i, j)$ Rendimiento por metro cuadrado en cada cultivo, de cada alternativa.
- $A(i, j)$ Cantidad de agua a consumir en cada cultivo, de cada alternativa.
- $C_{min}(j)$ Cota mínima esperada de producción de cada cultivo.
- $L_{max}(i)$ Longitud máxima en metros cuadrados disponibles en cada alternativa de producción.
- $PV(j)$ Precio de venta de cada cultivo.
- $CP(j)$ Costo de producción de cada cultivo.
- $Fert(j, k)$ Cantidad de fertilizante en cada cultivo.
- $Fert_{total}(j)$ Cantidad de fertilizante NPK total disponible.
- $A_{max}(i)$ Cantidad de agua disponible en los tanques por cada alternativa.
- $Costo(i)$ Costo total por cada alternativa de producción en la huerta.

Con el propósito de representar un problema de optimización para huertas urbanas, se formuló un modelo matemático en términos de las variables y los parámetros previamente mencionados; el modelo propuesto es el siguiente:

2.2. Ecuaciones del modelo

F= Volumen de producción mensual en la huerta urbana

$$\text{Max } F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{minj} * X_{ij} \quad (1)$$

Maximización del volumen de producción

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq L_{max\ i} \forall i \quad (2)$$

Restricción de área de cultivo máxima en cada tipo de alternativa i

$$\sum_{i=1}^m R_{ij} * X_{ij} \geq C_{min\ j} \forall j \quad (3)$$

Restricción de cota mínima de cosecha de cada tipo de cultivo j

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} * X_{ij} \leq A_{max\ i} \forall i \quad (4)$$

Restricción de consumo de agua disponible en cada alternativa i .

$$\sum_{j=1}^n (PV_j - CP_j) * X_{ij} * R_{ij} \geq Costo\ i \forall i \quad (5)$$

Restricción de punto de equilibrio en la alternativa i

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} * Fert_{jk} \geq Fert_{totalj} \forall j \quad (6)$$

Restricción de cantidad de fertilizante para cada cultivo j

2.3. Simulación

Con el propósito de validar el modelo propuesto y garantizar un horizonte de planeación de la producción de los cultivos en la huerta urbana, se ejecutó la simulación de algunos parámetros técnicos de esta usando como herramienta un software altamente desarrollado y conocido en la industria agrícola llamado APSIM MODEL, que fue desarrollado para simular procesos biofísicos en sistemas agrícolas, en particular cuando hay interés en los resultados económicos y ecológicos de la práctica de manejo frente al riesgo climático. En esta simulación se analizó el rendimiento de un cultivo en específico respecto a la cantidad de fertilizante usado en la siembra del cultivo en un periodo de simulación de 6 meses. Posteriormente se identificó el impacto de estos parámetros en la solución del modelo de optimización con el fin de validar los resultados de esta.

En la simulación se parametrizaron las variables exógenas de los cultivos propuestos en las restricciones del modelo de programación, tales como la distancia entre plantas, la densidad de plantas por metro cuadrado, la cantidad de agua usada para el riego del cultivo en (L/M²), la fecha de inicio de la ventana de siembra, la profundidad de siembra, la cantidad y el tipo de fertilizante a usar en el cultivo, entre otras, dicha parametrización se realiza en el módulo de reglas del cultivo. Luego, la parametrización de la variable de salida que es el rendimiento en un periodo de tiempo establecido se realizó en el componente de archivo de salida, dentro del módulo Paddoc de la simulación. Con la parametrización en las variables exógenas se

hicieron distintas comparaciones respecto a la cantidad a usar de cada una de ellas, con el fin de identificar el impacto que tienen estas sobre las variables de salida, las cuales se representan mediante distintas graficas que permiten analizar el tipo de función que definen el comportamiento de estas variables. En la Figura 1 se presenta el esquema que ilustra el desarrollo de la simulación en APSIM:

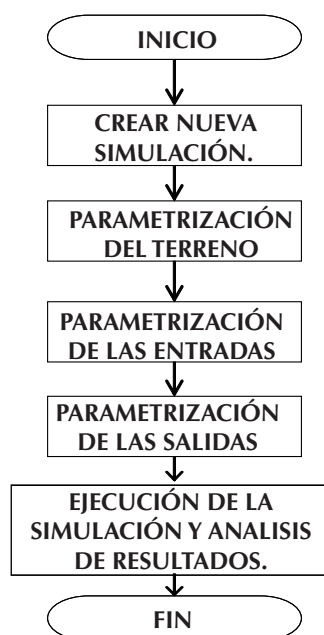


Figura 1. Diagrama de flujo de la simulación en el programa APSIM.

Fuente: elaboración propia.

3. Diseño

El diseño del modelo de producción tendrá como variables de entrada las variables exógenas descritas en la Tabla 2, los cuales se transformarán para tener como variable de salida el número de metros cuadrados que se deben sembrar de cada cultivo seleccionado en la huerta urbana que lleve a la maximización del rendimiento y utilidad de la huerta al menor costo posible.

En la etapa de diseño se realizó una distribución en planta de la huerta urbana teniendo en cuenta el área disponible que es de 84 metros cuadrados, se tomaron en cuenta las distintas alternativas de producción como lo son suelo, aeropónico y hidropónico con sus respectivas estructuras y diseños; las zonas de invernadero donde se plantan

las semillas que después serán trasplantadas al área de hidroponía y aeroponía; las zonas de los tanques de agua que abastecen a los sistemas anteriormente mencionados; y por último, los pasillos por donde se transitará en la huerta urbana, el área total productiva teniendo en cuenta cada una de las zonas descritas anteriormente es de 84, 52.5, 49.5 metros cuadrados para la alternativa de suelo, hidropónico y aeropónico, respectivamente. El diseño de la distribución del cultivo se realizó en el software SketchUp de Google para dar texturas y acabados a los diseños, al igual que simular entornos de luz y sombra. Este diseño se realizó con las medidas específicas presentes en el número de surcos que debe tener la huerta y la distancia entre cada plata que se elija para cultivar, con el objetivo de mostrar a las comunidades una forma de distribución óptima que busque la maximización del volumen de producción de los productos agrícolas.

4. Resultados y discusión

4.1. Modelamiento

4.1.1. Maximización volumen de producción

El modelo desarrollado en GAMS, de acuerdo con los parámetros técnicos de las plantas descritos en la Tabla 2 y el área disponible en cada alternativa, usó en total 36 ecuaciones y 40 variables de selección, el resultado final fue la selección de la alternativa óptima de producción y las plantas que se deben sembrar en dicha alternativa, arrojando así la cantidad de metros cuadrados óptimos que se deben sembrar de cada planta que garantice el máximo volumen de producción. Con este dato de los metros cuadrados óptimos que se deben sembrar por cada planta, se puede calcular el número de plantas que se deben sembrar multiplicando este valor por la densidad de población de cada planta, además se puede conocer la cantidad de producto que se estima en la cosecha, multiplicando este mismo valor de cada planta por su rendimiento por metro cuadrado respectivo.

La alternativa óptima de producción se escogió en función del área disponible productiva y el costo de implementación y producción de cada una de ellas,

en este modelo se buscó maximizar el volumen de producción teniendo en cuenta el consumo mínimo por persona de cada cultivo en la ciudad de Bogotá D.C., de acuerdo con los valores dispuestos por la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), con el fin de garantizar la producción de alimentos con mayor demanda en la comunidad estudiada. Los resultados del modelo de programación lineal se presentan en la Tabla 3.

ALTERNATIVA DE PRODUCCIÓN	PLANTAS PARA SEMBRAR	M ² A SEMBRAR	RENDIMIENTO ESPERADO(KG)	TIEMPO PRIMERA COSECHA (Semanas)	COSTO DE IMPLEMENTACIÓN	VOL. DE PRODUCCIÓN ESPERADO (KG)
SUELO	CEBOLLA CABEZONA BLANCA	1	1,2	13	\$ 1.451.178	298,502
	CEBOLLA JUNCA	1	2	20		
	PAPA	70	280	16		
	ARVEJA	3,8	0,95	16		
	FRÍJOL	2,2	0,352	16		
	LECHUGA	1	3	10		
	ESPINACA	1	2	8		
	HABICHUELA	1	1,2	16		
	ZANAHORIA	1	3	16		
	CILANTRO	1	0,8	8		
	REPOLLO	1	4	24		
HIDROPÓNICO	PAPA	12,861	51,444	16	\$ 10.259.053	210
	TOMATE	39,639	158,556	12		
AEROPÓNICO	AJO	10,247	20,494	24	\$ 12.346.231	177,506
	TOMATE	39,253	157,012	12		

Tabla 3. Plantas para sembrar en cada alternativa de producción para maximizar el volumen de producción. Fuente: elaboración propia.

Tomando como base la Tabla 3, se opta por elegir la alternativa de producción de suelo, debido a que conlleva menor costo de implementación, manejo y producción, a su vez que es la que aprovecha todos los 84 metros cuadrados que se tienen disponibles para la siembra de los cultivos. En la Tabla 3 se muestran las plantas que se deben sembrar en la alternativa de suelo, así como el número de metros cuadrados que se deben sembrar de cada planta respectivamente para que maximice el volumen de producción en la huerta urbana teniendo como resultado total 298.5 Kg en todos los productos sembrados.

La alternativa de producción de suelo es 86% más económica que la alternativa hidropónica y a su vez 88% más económica que la alternativa aeropónica,

lo cual representa una gran diferencia en cuanto a los costos de implementación y los costos de producción de cada una de las alternativas y sus respectivos cultivos a sembrar. Este es un valor muy determinante que permite garantizar un adecuado uso y aprovechamiento de los recursos en una huerta urbana, y que podría conllevar a incentivar el uso de estas como medio de producción en las comunidades urbanas. Respecto al área usada en cada alternativa de producción, la alternativa de suelo tiene una mayor participación en el 37.5% que la alternativa hidropónica y un 41.07% que la aeropónica, lo cual representa un 29.7% y un 40.5% de aumento en el volumen de producción respectivamente. Todas estas variables se tuvieron en cuenta para tomar la decisión de elegir la

alternativa de producción de suelo, considerando la función objetivo del problema que es la maximización del volumen de producción. Las relaciones descritas anteriormente se reflejan en las Figuras 2 y 3 respectivamente.



Figura 2. Costo de implementación.
Fuente: elaboración propia.

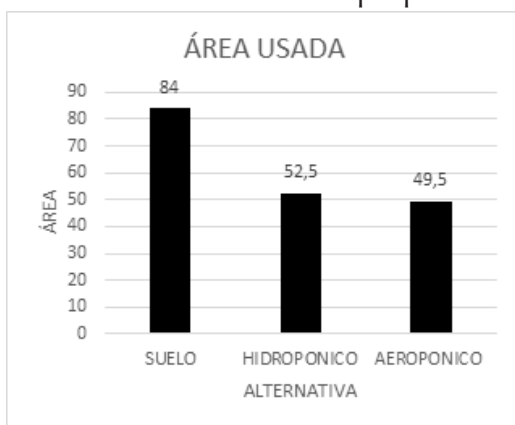


Figura 3. Área usada por alternativa.

Fuente: elaboración propia.

La Tabla 3 muestra que el cultivo que mayor asignación de área tiene, de acuerdo con el desarrollo del modelo de optimización para la siembra en la huerta es la papa, 70 metros

cuadrados, del cual se esperan 280 Kg de producción. Este resultado permite afirmar lo que dice el fondo para el financiamiento del sector agropecuario FINAGRO, cuando menciona que la papa es uno de los mayores alimentos consumidos por las comunidades en Bogotá, debido a que cada persona en Bogotá consume en promedio 1.17 Kg de papa semanalmente, dato que está por encima del consumo de hortalizas como la cebolla y el tomate de gran participación en la canasta familiar [15]. Así mismo, se comprueba lo que muestra la Tabla 1, en donde la papa es uno de los cultivos que mayor rendimiento tiene en la agricultura urbana en comparación a la agricultura convencional. Derivado del análisis de sensibilidad realizado al modelo, se identificó que los parámetros de la cantidad de agua y fertilizantes usados en la siembra de los cultivos son directamente proporcionales al rendimiento y volumen de producción que puedan tener los cultivos en la huerta, en la medida en que se tiene mayor disponibilidad de alguna de ellas se garantiza aumentar el rendimiento esperado en la huerta urbana, respetando los mínimos y máximos de uso de estos parámetros en la siembra.

4.2 Maximización de la utilidad de los cultivos

El segundo modelo de programación lineal que se desarrolló busca maximizar las utilidades de los cultivos en la huerta urbana, manteniendo las mismas restricciones del modelo anterior, pero modificando la función objetivo de acuerdo con el precio de venta de cada cultivo. A continuación, se muestra la función objetivo del modelo y una matriz con sus respectivos resultados.

Max F

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n PV_j * X_{ij} \tag{7}$$

ALTERNATIVA	PLANTAS PARA SEMBRAR	M ² A SEMBRAR	UTILIDAD OBTENIDA	VALOR DE FUNCIÓN OBJETIVO
SUELO	CEBOLLA CABEZONA BLANCA	1	\$ 992	\$ 610.023
	CEBOLLA JUNCA	1	\$ 1.329	
	PAPA	1	\$ 1.544	

ALTERNATIVA	PLANTAS PARA SEMBRAR	M ² A SEMBRAR	UTILIDAD OBTENIDA	VALOR DE FUNCIÓN OBJETIVO
SUELO	AJO	67,9	\$ 568.187	\$ 610.023
	ARVEJA	3,8	\$ 19.707	
	FRÍJOL	2,2	\$ 6.600	
	LECHUGA	1	\$ 1.060	
	ESPINACA	1	\$ 1.544	
	HABICHUELA	1	\$ 1.903	
	ZANAHORIA	1	\$ 1.739	
	CILANTRO	1	\$ 2.056	
	TOMATE	1	\$ 2.691	
	REPOLLO	1	\$ 671	
HIDROPÓNICO	AJO	52,5	\$ 439.320	\$ 439.320
AEROPÓNICO	AJO	49,5	\$ 414.216	\$ 414.216

Tabla 4. Metros cuadrados a sembrar de cada cultivo para maximizar la utilidad.
Fuente: elaboración propia.

La Tabla 4 muestra los resultados del modelo de programación lineal con la maximización de la utilidad de los cultivos en la huerta urbana, en donde se puede notar que la alternativa que mayor utilidad genera para la huerta en estudio es la del suelo, lo que valida la decisión tomada en el anterior modelo acerca de elegir dicha alternativa de producción para los cultivos en la huerta urbana. De esta manera también se refleja que el ajo es el cultivo de mayor participación en la huerta con 67.9 metros cuadrados a sembrar, el cual representa un 80.8% del área total disponible, esto es debido a que el cultivo del ajo es el que mayor precio de venta presenta en huerta urbana con 8368 \$/Kg y por ende es el que mayor utilidad generará.

4.3 Minimización de costos de producción

El tercer modelo de programación lineal busca calcular el número de metros cuadrados a sembrar si se desea minimizar los costos de producción en cada uno de los cultivos de la huerta urbana teniendo en cuenta para la formulación del modelo en la función objetivo el parámetro que describe los costos de producción de los cultivos. A continuación, se presentan los resultados (Tabla 5).

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n CP_j * X_{ij} \quad (8)$$

SUELO	CEBOLLA CABEZONA BLANCA	1	\$ 343	\$ 24.301
	CEBOLLA JUNCA	1	\$ 379	
	PAPA	1	\$ 450	
	LECHUGA	1	\$ 14.133	
	ESPINACA	1	\$ 2.389	
	HABICHUELA	1	\$ 416	
	ZANAHORIA	1	\$ 342	
	TOMATE	9,8	\$ 3.427	
	REPOLLO	1	\$ 2.030	
CILANTRO	1	\$ 392		
HIDROPÓNICO	ARVEJA	3,8	\$ 1.930	\$ 18.378
	FRÍJOL	2,2	\$ 674	
	TOMATE	45,1	\$ 15.773	
AEROPÓNICO	AJO	10,247	\$ 12.320	\$ 26.019
	TOMATE	39,253	\$ 13.699	

Tabla 5. Metros para sembrar de cada cultivo para minimizar los costos de producción. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la programación de la minimización de costos de producción, el tomate es el cultivo que tiene mayor participación dado que su costo de producción es uno de los más bajos, por ende, se sugiere que si se busca minimizar los costos de producción en la huerta urbana de estudio se debe disponer mayor cantidad de área en cultivos de tomate. En este caso la alternativa de producción hidropónica sugiere un costo de producción más económica que la del suelo a causa del elevado costo de producción que tiene la lechuga, ya que representa el 58.1% de todos los costos totales de producción semanal de los cultivos en la alternativa del suelo. El planteamiento anterior busca segmentar, es decir apartar, de los parámetros i , j valores puntuales donde la función objetivo toma un punto máximo o mínimo, teniendo en cuenta el

requerimiento que se quiere modelar.

4.4 Simulación

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a las simulaciones del modelo propuesto, en donde se relaciona un parámetro de vital importancia en la entrada al proceso de producción en los cultivos, como lo es la cantidad de fertilizante a usar en la siembra, lo cual afecta directamente al rendimiento de cada cultivo. Para este caso particular se decidió simular el cultivo de la papa ya que es el cultivo que mayor participación tuvo en la maximización del volumen de producción en la huerta urbana. La Tabla 6 representa el resultado de la simulación ejecutada de acuerdo con lo anteriormente planteado:

RENDIMIENTO CULTIVO PAPA VS FERTILIZANTE USADO (Kg/ha)		
0 kg FERTILIZANTE	30 kg FERTILIZANTE	60 kg FERTILIZANTE
7203	24143	36390
7239	24222	36667
7267	24300	36938
7293	24343	37102
7311	24402	37304
7326	24457	37491
7345	24513	37682
7361	24550	37792
7375	24584	37884
7383	24584	37884

Tabla 6. Rendimiento cultivo de papa vs fertilizantes usado. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 6 se representa un rango establecido del rendimiento esperado del cultivo de papa de acuerdo con la cantidad de fertilizante usado en la huerta urbana respectivamente, en un rango de tiempo determinado. Las siguientes funciones reflejan el comportamiento de esta variable exógena (Figura 4).

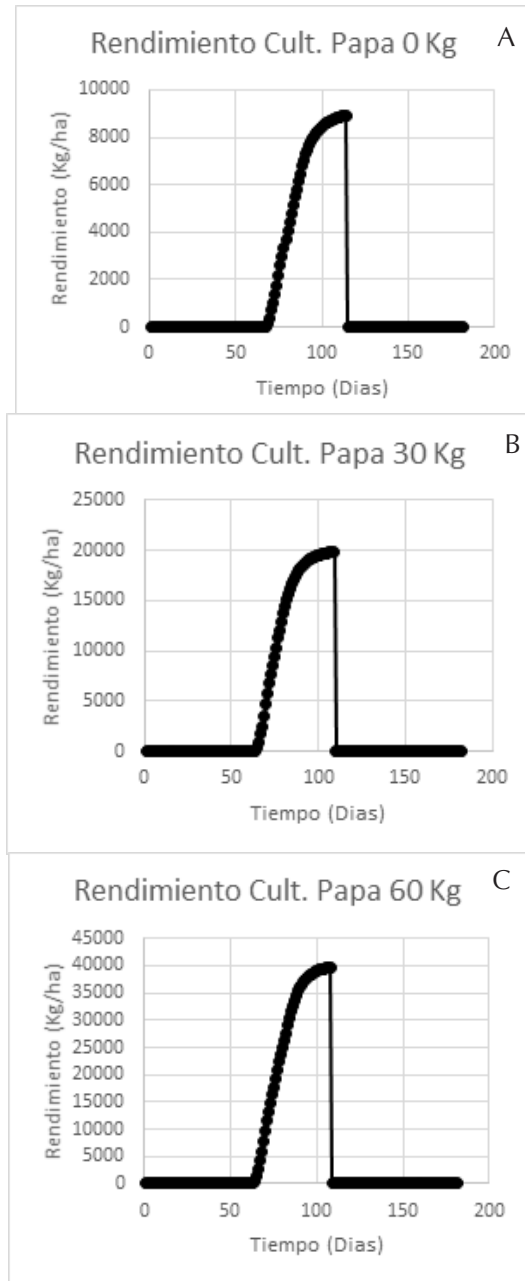


Figura 4: Simulación de rendimiento vs cantidad de fertilizante usado en el cultivo de papa. (a) Rendimiento con 0 Kg de Fertilizante usado. (b) Rendimiento con 30 Kg de Fertilizante usado. (c) Rendimiento con 60 Kg de Fertilizante usado. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4 se representan 3 gráficas tipo diente de sierra en donde se observa el comportamiento del rendimiento del cultivo de la papa, evidenciándose una relación creciente respecto al rendimiento del cultivo con la cantidad de fertilizante usado en su etapa de siembra, dicha relación en esta grafica describe una función cuadrática cóncava hacia abajo, la cual se representa a continuación en las siguientes ecuaciones:

• **Cantidad de fertilizante usado:**

Para la gráfica de 0Kg: $Y(t) = -5,1207t^2 + 1121,5t - 54005$, D: {100,116} (9)

Para la gráfica de 30Kg: $Y(t) = -18,106t^2 + 3673,3t - 161614$, D: {100,108} (10)

Para la gráfica de 60Kg: $Y(t) = -18,035t^2 + 4015t - 184637$, D: {100,108} (11)

Los puntos máximos de cada una de estas funciones describen el mayor punto de rendimiento que alcanza respecto a cada criterio analizado. En el primer caso donde no se usa fertilizante para el cultivo de la papa se nota un punto máximo de rendimiento de 7383 Kg/ha, lo cual equivaldría en escala de un huerto urbano a 0.7383 Kg/m². En el segundo caso se nota un crecimiento en el cultivo cuando se usan 30 Kg de Fertilizante, tal cual como lo describe el aumento de la pendiente en la función cuadrática alcanzando un punto máximo de 24584 Kg/ha (2.45 Kg/m²). En el último caso donde se usan 60 Kg de fertilizante, el punto máximo del rendimiento es 37884 Kg/ha (3.784 kg/m²). Estos resultados validan una de las conclusiones arrojadas del modelo de programación lineal, en donde las restricciones de fertilizante y cantidad de agua usada afectaban directamente el rendimiento de cada cultivo. Hay que tener en cuenta que dicha simulación se hizo a una escala de 1:10.000, teniendo en cuenta que las medidas usadas en la programación lineal son Kg/m² y en la simulación son Kg/ha

4.5. Diseño

En este apartado del diseño se representa una distribución en planta de tipo lineal de los cultivos

seleccionados en el modelo de programación lineal en donde se optó por sembrar los cultivos en la alternativa de suelo, la cual aprovecha la totalidad del área disponible que son 84 metros cuadrados y permite tener un mayor volumen de producción, generando mayores utilidades en la huerta. El prototipo planteado se desarrolló de la siguiente manera: el área total de la huerta que son 84 m² se distribuyeron en 15 surcos de 0.4 m de ancho, 0.2 m de alto y 6.2 m de largo con una distancia entre cada surco de 0.80 m. Lo anterior, considerando la mayor distancia de surcos que tienen las plantas elegidas a cultivar, que garantice las óptimas condiciones de crecimiento en las mismas, mitigando las probabilidades de competencia entre las plantas por espacio u otro factor negativo que afecten el rendimiento de las plantas.

La medida de los pasillos se hizo de 0.4 m cada uno, asegurando que fuera un espacio óptimo para el paso de las personas que trabajaran la huerta urbana y que contaran con un tanque de agua de 3000 litros para abastecer todos los cultivos. Este lugar va a ser cubierto, por lo cual se recreó la manera en la que se va a tener la distribución y la estructura, como el sistema de riego para cada surco. A continuación, se muestra el prototipo diseñado de distribución de la huerta urbana (Figuras 5 y 6).

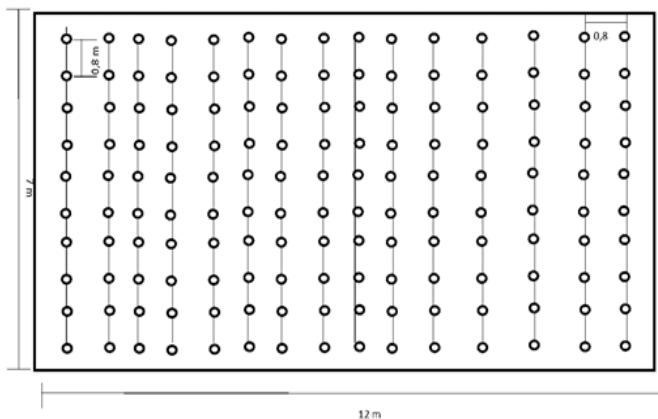


Figura 5: Diseño de la distribución en planta en línea de la huerta urbana en Sierra Morena, Bogotá D.C. Vista Superior.
Fuente: elaboración propia.

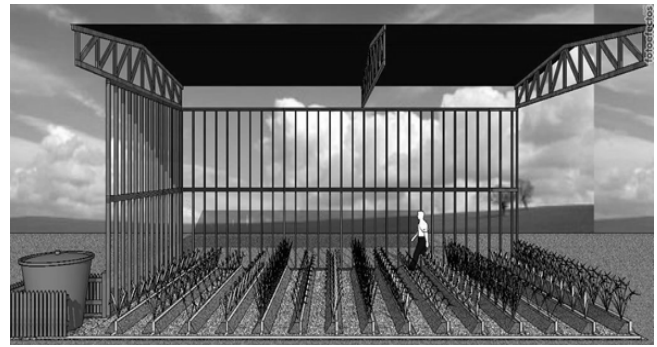


Figura 6: Diseño de la distribución en planta en línea de la huerta urbana en Sierra Morena, Bogotá D.C. Vista Frontal.
Fuente: elaboración propia

5. Conclusiones

Finalmente, se concluye diseñando el modelo de producción mediante la selección de la alternativa óptima que es la del suelo con base en la formulación de un modelo de programación lineal y con su respectivo espacio en m² asignado para cada planta, de tal modo que permitan optimizar (maximizar o minimizar) las variables que interactúan en la huerta urbana. Dicha alternativa de producción tiene un costo de implementación y de producción menor en un 86% y 88% comparado con la alternativa de producción de hidroponía y aeroponía respectivamente, del mismo modo que tiene un mayor porcentaje de utilización del espacio disponible en un 37.5% y 41.07%. Si para la huerta urbana en estudio se desea generar una fuente de ingresos sostenible, entonces se debe escoger sembrar el cultivo de ajo en la alternativa de suelo que generará ingresos después de su cosecha iguales a \$568.187 pesos semanales en la huerta urbana.

Así, el uso de los modelos de optimización tiene una gran relevancia en el diseño de los modelos de producción en las huertas urbanas, ya que mediante ellos se potencializan los recursos disponibles en ella garantizando encontrar una optimización (máxima o mínima) respecto al volumen de producción, las utilidades generadas y/o los costos de producción de acuerdo con lo que se desee modelar que conlleve a un uso eficiente de los recursos.

Referencias

- [1] Gomez, "Universidad Nacional Abierta y a distancia" [En línea] Disponible en: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/2749/1/15385851.pdf>
- [2] Sostenibilidad, "Sostenibilidad para todos" [En línea] Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/construccion-y-urbanismo/origen-de-los-huertos-urbanos/>
- [3] M. Navarrete, "Kolumbien" [En línea] Disponible en: <https://www.goethe.de/ins/co/es/kul/mag/20872601.html>
- [4] J. Mercon, M. Escalona, M. Noriega, I. Figueroa, A. Atenco y E. Gonzalez, "Cultivando la educación agroecológica: el huerto colectivo urbano como espacio educativo" *Revista mexicana de investigación educativa*, vol. 17, no. 55, 2012.
- [5] M. Zaar, "Agricultura urbana: algunas reflexiones sobre su origen e importancia actual" *Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*, vol. 8, no. 944, pp. 1-15, octubre 2011.
- [6] K. Cantor, "Agricultura urbana: elementos valorativos sobre su sostenibilidad" *Cuadernos de desarrollo rural*, vol. 7, no. 65, diciembre 2010.
- [7] C. Landon-Lane, "FAO" [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/3/y5112s/y5112s00.htm#Contents>
- [8] M. Mendez, L. Ramirez y A. Alzate, "La práctica de la agricultura urbana como expresión de emergencia de nuevas ruralidades: reflexiones en torno a la evidencia empírica" *Cuadernos De Desarrollo Rural*, vol. 2, no. 55, pp. 55, abril 2011.
- [9] J. Douglas, "HIDROPONIA- Como cultivar sin tierra", Mexico: Ateneo, 1990.
- [10] M. Basterrechea, "Hidroponia Casera" [En línea] Disponible en: <https://www.hidroponiacasera.net/aeroponia-la-guia-basica/>
- [11] C. A. Perez Valderrama, "BPM: mejora de procesos e integración tecnológica" *Revista Vínculos*, vol. 12, no. 1, pp. 80-88, enero-junio de 2015.
- [12] W. Winston, "Investigacion de Operaciones, aplicaciones y algoritmos", Mexico D.F.: Thomson, 2005.
- [13] A. Ramos, P. Sanchez y J. Ferrer, "Modelos Matematicos de Optimizacion" [En línea] Disponible en: http://wZww.doi.icaei.upcomillas.es/intro_simio.htm
- [14] H. J. campesinos, "interactiva alfabetica del campo", Bogota D.C.: Grania Hogares Juveniles Campesinos Ltda., 2012.
- [15] FINAGRO, "FINAGRO- Fondo para el financiamiento del sector agropecuario" [En línea] Disponible en: <https://www.finagro.com.co/noticias/sector-papero-se-prepara-para-aumentar-el-consumo-de-papa-en-colombia>