

Linear programming applied to the diet model for higher education students

La programación lineal aplicada al modelo de la dieta para estudiantes de nivel superior

Jaime Alberto, ZARAGOZA-HERNÁNDEZ^{1*}, Claudia, SÁNCHEZ-GARCÍA¹

¹*Tecnológico Nacional de México / ITS del Oriente del Estado de Hidalgo, Carretera Apan-Tepeapulco Km 3.5, Colonia Las Peñitas, C.P. 43900, Apan, Hidalgo, México.
(0000-0003-0213-9797, 0000-0002-0872-3612)*

Sent date: 19/September/2023 Acceptance date: 24/June/2024

Abstract:

Linear programming has a widespread application in science, technology, engineering and human organizations where decision making is involved. Its use has been extended to the present day to design models of fortified diets at the lowest cost, mainly for children and vulnerable populations in poor countries and regions of the planet. The objective is to design a food menu with optimal combination of ingredients and low cost for students attending college at an altiplano hidalguense Public Institution of Higher Education, applying a linear programming tool with data from nutrition standard information published by the mexican government and private companies, considering local market prices of season food.

Keywords: linear programming, optimization, diet, nutrients.

Resumen:

La programación lineal tiene una aplicación amplia en la ciencia, la tecnología, la ingeniería y en las organizaciones donde se tomen decisiones. En sus orígenes, se aplicó en el diseño de una dieta saludable para adultos. Su uso se ha extendido hasta la actualidad para diseñar modelos de dieta fortificada al más bajo costo, principalmente para niños y población vulnerable en países y regiones pobres del planeta. El objetivo es mostrar una metodología básica para el diseño de un menú de alimentos con una combinación óptima de ingredientes y bajo costo para los estudiantes que asisten a una Institución Pública de Educación Superior (IPES), aplicando una herramienta de programación lineal ("Costo de la Dieta") con datos de información estándar de nutrición, teniendo en cuenta los precios del mercado local de los alimentos de temporada.

Palabras clave: programación lineal, optimización, dieta, nutrientes.

* Corresponding author. E-mail: jzaragoza@gmail.com
Tel. 7911067894

1. Introducción

La investigación de operaciones (IO) o ciencia administrativa, aplica métodos y modelos matemáticos por medio de equipos de trabajo multidisciplinarios, a problemas productivos en las organizaciones para hallar la mejor solución (Prawda, 2019).

Una de las áreas de la IO es la programación matemática, de la cual se desprenden la programación lineal (PL) y la programación no lineal (PNL). En el estudio y aplicación de la PL, se proponen soluciones en áreas como el transporte de mercancías, el control de los inventarios, la asignación de mano de obra y maquinaria, la toma de decisiones financieras, y en problemas de balance nutricional en la dieta alimenticia para seres humanos y animales, entre otras más.

En relación con el problema de la dieta, este se presenta en prácticamente cualquier texto de investigación de operaciones, artículos de investigación y proyectos de tesis. La información respecto al problema de la dieta destaca el balance entre lo nutrimental y el costo de los ingredientes. Se trata de formular un modelo que toma en cuenta los requerimientos nutrimentales de la población objetivo, el aporte de energía y de nutrientes de cada uno de los alimentos propuestos y el costo por porción de cada ingrediente.

Es común la existencia de cafeterías en las IPES, donde se venden y consumen diversidad de alimentos que son comunes también en los hogares mexicanos. Uno de estos platillos es el conocido como desayuno. Este por lo general se compone de huevo que se prepara por un lado como “huevo revuelto” y por otro como “huevo estrellado”. Es usual que al platillo huevo revuelto se le añadan carnes frías. A ambas alternativas de preparación se le complementa con frijoles, salsa y queso rallado, por supuesto, en el menú no pueden faltar la tortilla de maíz.

En el problema de la dieta, se diseñan alimentos con los ingredientes y las porciones adecuadas para satisfacer los requerimientos mínimos y máximos recomendados por instituciones gubernamentales de salud y nutrición. Zheng (2022), relata el trabajo del economista George Stigler ganador del premio nobel de economía en 1982, sobre el problema de la dieta. Stigler propone el siguiente problema: Para un hombre con una actividad moderada, con un peso de 154 libras, y una selección de 77 alimentos que representan una posible ingestión diaria de nueve nutrientes (incluyendo calorías) ¿cuánto de cada alimento debe consumir para igualar la ingesta diaria recomendada sugerida por el National Research Council de 1943, al costo mínimo?

En el caso de Stigler, se diseñó el menú y el tamaño de las porciones, para el caso que aquí se trata, el desayuno típico en una cafetería de una IPES, ya se cuenta con las combinaciones y las porciones bien definidas. En este trabajo se pretende responder a través de la PL a si ¿estas porciones son las adecuadas para hombres y mujeres jóvenes de 18 o más años que asisten a las IPES? También se responde a la pregunta ¿Cuál es el tamaño que deben tener las porciones, considerando que los ingredientes ya están definidos?

2. Marco teórico

La nutrición humana describe el proceso por el cual las células, tejidos, órganos, sistemas y el cuerpo como un todo, obtienen y usan las sustancias necesarias provenientes de los alimentos para mantener la integridad estructural y funcional (Gibney, Lanham-New, Cassidy & Vorster, 2009).

Los nutrientes son compuestos orgánicos o inorgánicos que se encuentran en los alimentos y que el organismo puede utilizar para llevar a cabo algunos procesos importantes (regulación energética, estructural o funcional del organismo). Los alimentos se digieren, absorben y metabolizan. El catabolismo y el anabolismo son los dos aspectos o formas esenciales del metabolismo. El primero es un proceso de “fragmentación”, como la glucólisis, proceso en el cual la glucosa se descompone para elaborar productos y generar energía. El anabolismo es un proceso de “construcción”, por ejemplo, la biosíntesis de proteínas, en el que los aminoácidos se unen para formar proteínas. El metabolismo entonces es un proceso que en términos de energía consiste en el balance entre el catabolismo que entrega energía y el anabolismo que requiere de energía (Van De Graff, Rhees & Palmer, 2011). Una nutrición adecuada entonces es un balance entre la demanda y entrega de energía y el mantenimiento y funcionamiento del organismo, el diagrama de la **Figura 1** ilustra esta relación.

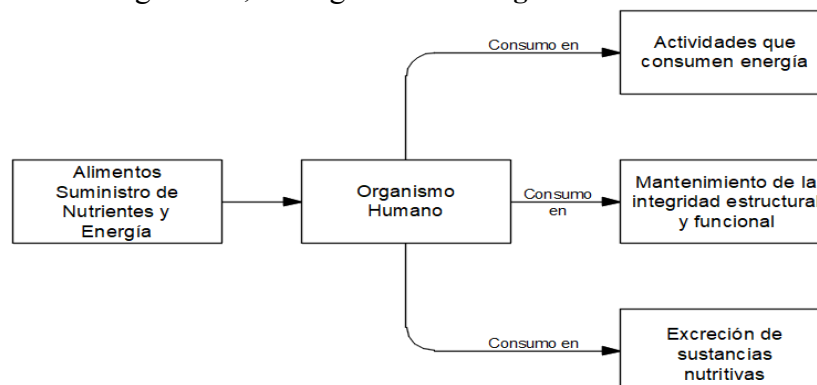


Figura 1. Uso de nutrientes y energía proveniente de los alimentos

La PL se ha empleado para determinar la mejor combinación de alimentos y sus porciones al menor costo para hacer accesible económicamente la nutrición en poblaciones vulnerables y de escasos recursos.

Okubo, et al. (2015), indica que la metodología PL generalmente se usa para formular patrones dietéticos nutricionalmente óptimos, para examinar la relación entre el costo y la calidad de una dieta en los países occidentales y para elaborar guías de alimentación en países en desarrollo.

La aplicación de la PL al problema de la dieta se encuentra generalmente en estudios dirigidos a poblaciones o segmentos de poblaciones vulnerables económica y socialmente, en dietas para preservar la salud y prevenir enfermedades. Frega, et al. (2012) describen la aplicación

de la PL en la determinación de la mejor estrategia para la preparación de alimentos fortificados en Mozambique.

Allen (2018), describe como mediante la programación lineal ha logrado determinar porciones de dieta en 20 países alrededor del mundo. Alani, et al. (2019) aplicó la programación lineal para generar planes de alimentación de bajo costo que se ajustan a los requerimientos dietéticos claves publicados por el World Cancer Research Fund/American Institute of Cancer Research (WCRF/AICR).

Otra área de aplicación del modelo de la dieta es la relacionada con el pienso para para animales, Martínez, presentó un estudio sobre la influencia del sistema de valoración de alimentos en el costo y características nutricionales de raciones para caballos estabulados, que no tenían acceso a pastos y presentaban diferentes estados fisiológicos (citado en Bermúdez, 2011).

3. Metodología

La ventaja de la aplicación de la PL en relación con el método de prueba y error en el diseño de la dieta es que, una vez reunidos los datos sobre nutrientes, requerimientos mínimos y precios, es más rápido obtener resultados sobre los tipos de alimentos y porciones necesarios para lograr el balance nutricional (Briend et al., 2003).

En la **Figura 2**, se muestra el desarrollo metodológico de la manera en que se maneja la información sobre nutrientes, Ingestión Diaria Recomendada (IDR) y precios de los alimentos, para obtener el modelo de PL que ayude a determinar el tamaño de las porciones del desayuno a base de huevo que se sirve en la cafetería de una IPES.

3.1 Datos de requerimiento nutricional diario.

Se estima que la demanda energética y de nutrientes depende del género, el peso y la estatura (Energía Proteínas Hidratos de carbono Lípidos Vitaminas Sales minerales Agua. (s/f)). En la tabla 1 se muestran los requerimientos energéticos y proteicos de los jóvenes, hombres y mujeres, de 18 a 30 años.

Tabla 1. Recomendaciones aproximadas de energía para jóvenes adolescentes

Necesidades promedio diarias de energía para hombres y mujeres de 18 a 30 años			
	Peso Kg	Energía Kcal	Proteína g/día
Hombres	65	3000	65
Mujeres	55	2100	55

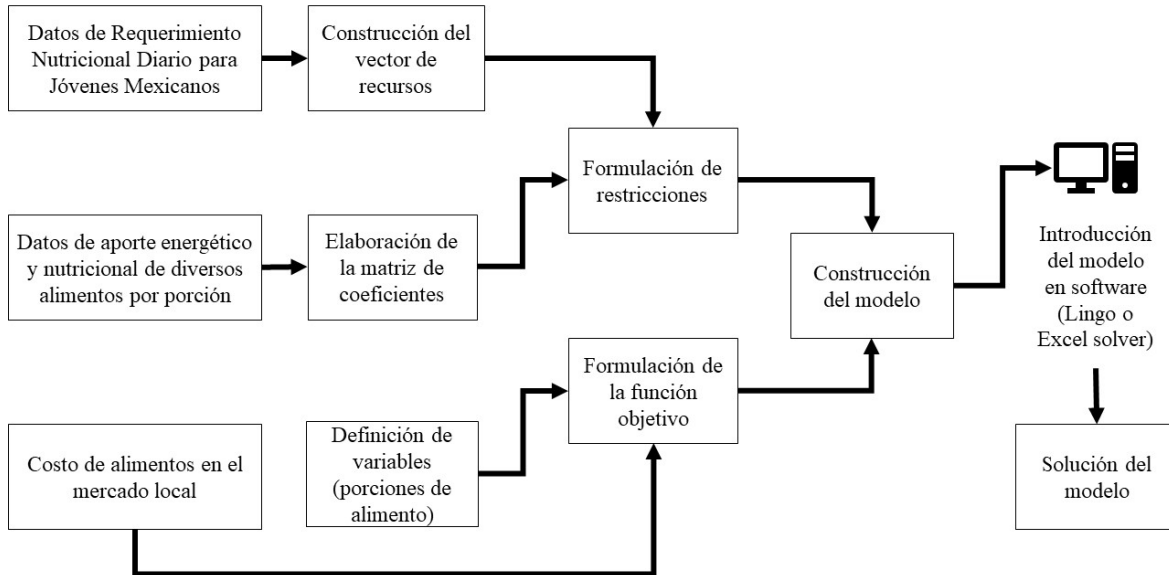


Figura 2. Actividades para la formulación del modelo de la dieta.

De las tres comidas que hacemos al día, el desayuno se considera una de las comidas más importantes del día. La literatura científica al respecto coincide en que resulta necesaria para el desarrollo físico e intelectual de niños y adolescentes. Arsenault et al, indican que un desayuno bien equilibrado permite evitar la falta de energía que sobre sus alumnos describen los profesores a lo largo de la mañana escolar y reconstituye reservas de energía utilizadas durante la noche (citado en Herrera-Genes, 2016). El desayuno representa el 20 al 25% del aporte energético diario, el resto se distribuye entre la comida y la cena (López-Sobaler, 2018).

3.2 Costo de los alimentos.

El tipo de platillo seleccionado que se ofrece en la cafetería de la IPES se presenta con cinco opciones diferentes: huevo con salchicha, con longaniza, con jamón, a la mexicana y estrellados. Es importante aclarar que no se consideró en el desarrollo del modelo la sal, la pimienta ni el aceite para freír, por ser condimentos que se añaden al gusto. La tabla 2 proporciona la configuración de los desayunos y el costo por porción de 100 gramos de cada ingrediente (precios obtenidos del mercado local).

3.3 Aporte energético y nutricional de los ingredientes.

Con la alimentación se pretende atender una demanda energética y de nutrientes que consiste en el requerimiento diario de macronutrientes como los carbohidratos, las proteínas y las grasas y de micronutrientes como las vitaminas y los minerales (Levetin & McMahon, 2024). La IDR de macronutrientes recomendada para hidratos de carbono es de 50% a 70% de la dieta total, un 10 al 15% de proteína, la mayor parte proveniente de los vegetales y respecto

a la grasa se recomienda no más del 15 al 20% de las calorías de la dieta considerando una adecuada relación de ácidos grasos saturados, monoinsaturados y poliinsaturados (INCMNSZ, 2016).

Los requerimientos de vitaminas recomendadas que contribuyen a la síntesis de proteínas, el crecimiento y el desarrollo son la A, D, niacina, tiamina, riboflavina, piridoxina y la cobalamina. Los minerales esenciales son el calcio, el hierro y el zinc. La tabla 3 muestra la ingesta diaria recomendada para estos nutrientes.

Tabla 2. Menús ofrecidos para el desayuno y precios de sus ingredientes por porciones de 100 gramos (precios obtenidos del mercado local).

Tipo de desayuno que se ofrecen en la cafetería de la IPES							
<i>j</i>	Alimento	Con salchicha	Con longaniza	Con jamón	A la mexicana	Estrellados	Costo _{ci} \$/100 g
1	Huevo	x	x	x	x	x	4.70
2	Tortilla	x	x	x	x	x	2.30
3	Queso rallado	x	x	x	x		11.80
4	Salchicha	x					4.90
5	Longaniza		x				9.20
6	Jamón			x			12.00
7	Jitomate				x		3.00
8	Cebolla				x		2.00

Tabla 3. Ingestión Diaria Recomendada para individuos de 18 a 30 años.

Tabla de requerimientos diarios recomendados IDR			
Macronutrientes	Unidad	Mujeres	Hombres
Proteínas	g/día	46	54
Grasas totales	g/día	<=70	<=100
Colesterol	mg	<=300	<=300
Hidratos de carbono	g/día	<=130	<=130
Micronutrientes	Unidad	Mujeres	Hombres
Vitamina A	µg	570	730
Tiamina B1	mg	0.0009	0.001
Riboflavina B2	mg	0.0009	0.001
Niacina B3	mg	0.012	0.013
Piridoxina B6	mg	0.001	0.0011
Cobalamina B12	µg	2.4	2.4
Calcio	mg	1000	1000
Hierro	mg	21	15
Zinc	mg	11	15
Energía	Kcal	2100	3000

3.4 Construcción del modelo.

Un modelo de programación lineal consiste en una función objetivo, un conjunto de restricciones funcionales y la condición de no negatividad.

Modelo de programación lineal.

Función objetivo

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{x}$$

Sujeto a un conjunto de restricciones funcionales

$$A\mathbf{x} \geq \mathbf{b}$$

Condición de no negatividad.

$$\mathbf{x} \geq \mathbf{0}$$

Donde:

\mathbf{x} es un vector de n variables de decisión.

\mathbf{c} es un vector de n componentes que son los precios o costos unitarios.

\mathbf{b} es un vector columna con m componentes conocidos como vector de recursos disponibles.

$\mathbf{0}$ es el vector columna de ceros.

A es la matriz de coeficientes tecnológicos. Cada elemento a_{ij} , con $i = \{1, \dots, m\}$ y $j = \{1, \dots, n\}$ representa el recurso j por cada variable de decisión i .

Vector de recursos. El vector de recursos \mathbf{b} tiene como elementos los requerimientos energéticos recomendados en la IDR para mujeres y hombres de entre 18 y 30 años. La información se obtiene de los datos de la tabla 3. Para facilitar la identificación de los requerimientos de IDR en el modelo, se asignan subíndices a cada elemento o tipo de requerimiento de \mathbf{b} como se muestra en la tabla 4.

Matriz de coeficientes tecnológicos. Para la construcción del modelo PL se requiere conocer el valor del aporte energético y nutrimental de cada alimento considerado como ingrediente. Cada valor es un coeficiente tecnológico por unidad de ingrediente, en este caso, la unidad en las es la porción de 100 gramos. La matriz de coeficientes para cada opción de desayuno se construye a partir de la tabla 5.

Tabla 4. Asignación de subíndices a los elementos del vector de recursos disponibles o de tipos de requerimiento de IDR y a las variables de decisión o porciones de ingrediente.

Tipo de requerimiento b_i	i	Ingrediente x_j	j
Proteína	1	Huevo	1
Grasa Totales	2	Tortilla	2
Colesterol	3	Queso rallado	3
Hidrato de carbono	4	Salchicha	4
Vitamina A	5	Longaniza	5
Vitamina B1	6	Jamón	6
Vitamina B2	7	Jitomate	7
Vitamina B3	8	Cebolla	8
Vitamina B6	9		
Vitamina B12	10		
Calcio	11		
Hierro	12		
Zinc	13		
Energía	14		

Tabla 5. Aporte de los macronutrientes y micronutrientes, para cada ingrediente*.

Ingrediente	Proteínas	Grasas Totales	Colesterol	Hidratos de Carbono	Vit. A	Vit. B1	Vit. B2	Vit. B3	Vit. B6	Vit. B12	Ca	Fe	Zn	Energía
	g	g	mg	g	µg	mg	mg	mg	mg	µg	mg	mg	mg	Kcal
Huevo	13.29	8.62	562.1	1.12	149	0.03	0.38	0.06	0.12	1.11	100.06	0.88	0.95	171
Tortilla	5.5	3.02	0	47.47	20	0	0.05	1.02	0	0	66.66	1.4	1.53	239
Queso rallado	17.14	14.64	69	5.25	0	0	0.33	0.14	0	1.75	563	1	0.5	921
Salchicha	12.13	13.45	72	5.9	13	0.1	0.1	2.53	0.31	0.85	37	4.55	2.17	529
Longaniza	11.6	46.4	0	4.5	0	0.36	0.19	1.82	0	0	41	3.7	0	486
Jamón	13.65	2.7	0	4.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97
Jitomate	0.69	0.12	0	1.3	0	0.05	0.07	0.64	0	0	10.5	0.39	2.34	13
Cebolla	3.25	0.49	0	7.9	0	0.03	0.08	1.01	0.16	0	69	9.64	3.55	38

*En una porción equivale a 100 gramos

Variables de decisión. son las porciones de cada ingrediente que se desea determinar y que se incluyen en la preparación de cada tipo de desayuno. Ver tabla 4,

$$x_i, \quad i = \{1, \dots, 8\}$$

Sea

x_1 cantidad de porciones de huevo.

x_2 cantidad de porciones de tortilla de maíz.

x_3 cantidad de porciones de queso rallado.

x_4 cantidad de porciones de salchicha.

x_5 cantidad de porciones de longaniza.

x_6 cantidad de porciones de jamón.

x_7 cantidad de porciones de jitomate.

x_8 cantidad de porciones de cebolla.

3.5 Formulación de la función objetivo y de las restricciones.

Se presenta el modelo de programación lineal para el desayuno “a la mexicana”, la manera de obtener los modelos para el resto de las opciones es la misma. El modelo que se muestra con la solución completa es el primero de los dos modelos diferenciados que se encuentran en la tabla 3. El menú seleccionado incluye cinco ingredientes (ver tabla 4).

Sea

X_1 = cantidad de porciones de 100 gramos de huevo.

X_2 = cantidad de porciones de 100 gramos de tortilla.

X_3 = cantidad de porciones de 100 gramos de queso rallado.

X_4 = cantidad de porciones de 100 gramos de jitomate.

X_5 = cantidad de porciones de 100 gramos de cebolla.

Función objetivo.

$$\text{Minimizar } 4.7x_1 + 2.3x_2 + 11.8x_3 + 3x_7 + 2x_8$$

Sujeto a

Restricción de proteína.

$$13.29x_1 + 5.5x_2 + 17.14x_3 + 0.69x_7 + 3.25x_8 \geq 11.5$$

Restricción de proteína.

$$8.62x_1 + 3.02x_2 + 14.64x_3 + 0.12x_7 + 0.49x_8 \leq 17.5$$

Restricción de colesterol.

$$562.1x_1 + 69x_3 \leq 75$$

Restricción de hidratos de carbón.

$$1.12x_1 + 47.47x_2 + 5.25x_3 + 1.30x_7 + 7.9x_8 \leq 32.5$$

Restricción de vitamina A

$$149x_1 + 20x_2 \geq 142.5$$

Restricción de vitamina b_1

$$0.03x_1 + 0.05x_7 + 0.03x_8 \geq 0.000225$$

Restricción de vitamina b_2

$$0.38x_1 + 0.05x_2 + 0.33x_3 + 0.07x_7 + 0.08x_8 \geq 0.000225$$

Restricción de vitamina b_3

$$0.06x_1 + 1.02x_2 + 0.14x_3 + 0.64x_7 + 1.01x_8 \geq 0.003$$

Restricción de vitamina b_6

$$0.12x_1 + 0.16x_8 \geq 0.00025$$

Restricción de vitamina b_{12}

$$1.11x_1 + 1.75x_3 \geq 0.6$$

Restricción de calcio.

$$100.06x_1 + 66.66x_2 + 563x_3 + 10.5x_7 + 69x_8 \geq 250$$

Restricción de calcio.

$$0.88x_1 + 1.40x_2 + x_3 + 0.39x_7 + 9.64x_8 \geq 5.25$$

Restricción de hierro.

$$0.95x_1 + 1.53x_2 + 0.5x_3 + 2.34x_7 + 3.55x_8 \geq 2.75$$

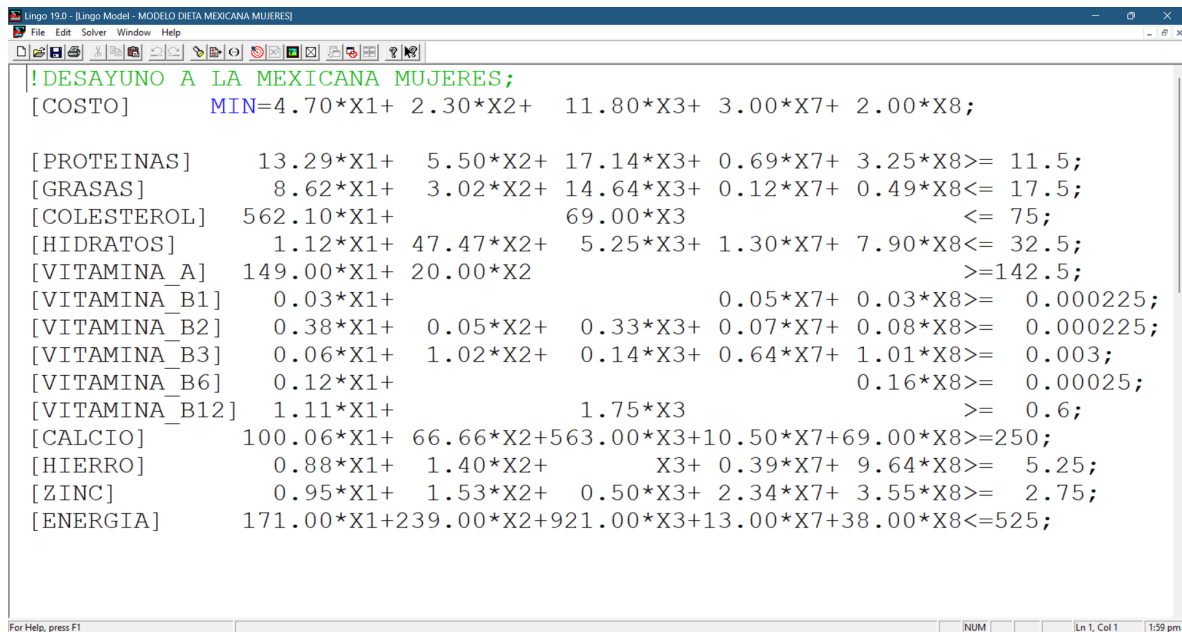
Restricción de zinc.

$$171x_1 + 239x_2 + 921x_3 + 13x_7 + 38x_8 \geq 525$$

$$\forall x_i \geq 0, \quad i = \{1,2,3,7,8\}$$

3.6 Introducción del modelo en software de computadora.

El modelo se introdujo en el software Lingo, de la empresa Lindo Systems Inc. En la **Figura 3**, se muestra una captura de pantalla del modelo diferenciado para el desayuno “a la mexicana”. Lingo es una herramienta que ayuda a resolver modelos de programación lineal de manera fácil y eficiente. El modelo se escribe como se haría en un block de notas.



```

Lingo 19.0 - [Lingo Model - MODELO DIETA MEXICANA MUJERES]
File Edit Solver Window Help
!DESAYUNO A LA MEXICANA MUJERES;
[COSTO] MIN=4.70*X1+ 2.30*X2+ 11.80*X3+ 3.00*X7+ 2.00*X8;

[PROTEINAS] 13.29*X1+ 5.50*X2+ 17.14*X3+ 0.69*X7+ 3.25*X8>= 11.5;
[GRASAS] 8.62*X1+ 3.02*X2+ 14.64*X3+ 0.12*X7+ 0.49*X8<= 17.5;
[COLESTEROL] 562.10*X1+ 69.00*X3 <= 75;
[HIDRATOS] 1.12*X1+ 47.47*X2+ 5.25*X3+ 1.30*X7+ 7.90*X8<= 32.5;
[VITAMINA_A] 149.00*X1+ 20.00*X2 >=142.5;
[VITAMINA_B1] 0.03*X1+ 0.05*X7+ 0.03*X8>= 0.000225;
[VITAMINA_B2] 0.38*X1+ 0.05*X2+ 0.33*X3+ 0.07*X7+ 0.08*X8>= 0.000225;
[VITAMINA_B3] 0.06*X1+ 1.02*X2+ 0.14*X3+ 0.64*X7+ 1.01*X8>= 0.003;
[VITAMINA_B6] 0.12*X1+ 0.16*X8>= 0.00025;
[VITAMINA_B12] 1.11*X1+ 1.75*X3 >= 0.6;
[CALCIO] 100.06*X1+ 66.66*X2+563.00*X3+10.50*X7+69.00*X8>=250;
[HIERRO] 0.88*X1+ 1.40*X2+ X3+ 0.39*X7+ 9.64*X8>= 5.25;
[ZINC] 0.95*X1+ 1.53*X2+ 0.50*X3+ 2.34*X7+ 3.55*X8>= 2.75;
[ENERGIA] 171.00*X1+239.00*X2+921.00*X3+13.00*X7+38.00*X8<=525;
    
```

Figura 3. Introducción del modelo diferenciado de un desayuno “a la mexicana” en el software Lingo, de la empresa Lindo Systems Inc.

4. Resultados y discusión

El resultado generado por Lingo es una solución no factible (**Figura 4**). Por tratarse de un modelo de programación lineal, la obtención de la solución óptima requiere que se cumplan todas las restricciones. La no factibilidad de este modelo se atribuye a que la ingestión recomendada para la vitamina A está por debajo del mínimo recomendado por una diferencia de 116.94 μg . La **Figura 5** muestra los resultados obtenidos para las porciones de alimentos y su desviación de los valores de ingestión recomendados (columna Slack or Surplus). Destaca el tamaño de las porciones. La cantidad de huevo es de aproximadamente 9.8 gramos, muy lejos de los 125 gramos que tiene dos huevos que se suelen servir en un

desayuno común. La cantidad propuesta reduce la magnitud de las grasas totales y el colesterol. En el caso de la tortilla, la porción es de alrededor de 0.055 que en gramos es de 5.5. El queso rallado es cerca de 0.29 de una porción o 29 gramos. El jitomate es 1.5 porciones y la es de cebolla 0.36, es decir, 150 y 36 gramos respectivamente. A pesar de no cumplir con la recomendación de vitamina A, el tamaño de las porciones no tiene sentido en un menú real, la cantidad de huevo en gramos en tan pequeña que es preferible no consumirlo, pasa lo mismo con la tortilla.

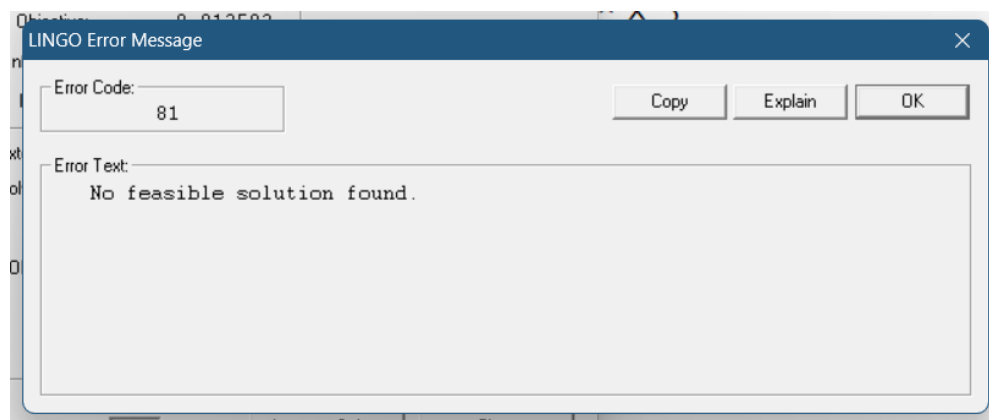


Figura 4. Modelo diferenciado del desayuno “a la mexicana”. La solución que se genera se presenta como no factible, debido a la violación de una de las restricciones.

La tabla 6, muestra los valores establecidos de las restricciones funcionales, los resultados obtenidos para cada una y la diferencia entre ambos valores, que en el software Lingo se presentan como holguras o excesos (Slack or Surplus, ver **Figura 5**). Se muestra el dato que causa la no factibilidad.

Variable	Value	Reduced Cost
X1	0.9799406E-01	0.1147389E-04
X2	0.5480214	-0.1072884E-05
X3	0.2886600	-0.1899898E-06
X7	1.523665	0.8754432E-07
X8	0.3644861	-0.3576279E-06
Row	Slack or Surplus	Dual Price
COSTO	0.9135817	-1.000000
PROTEINAS	0.000000	-0.2046319E+09
GRASAS	10.41285	0.000000
COLESTEROL	0.000000	0.8846898E+08
HIDRATOS	0.000000	0.1646031E+09
VITAMINA A	-116.9385	-0.3125000E+09
VITAMINA_B1	0.8983265E-01	0.000000
VITAMINA_B2	0.2954871	0.000000
VITAMINA_B3	1.945550	0.000000
VITAMINA_B6	0.6982706E-01	0.000000
VITAMINA_B12	0.1392842E-01	0.000000
CÁLCIO	0.000000	-6108264.
HIERRO	0.000000	-0.2218261E+08
ZINC	3.185199	0.000000
ENERGIA	77.75191	0.000000

Figura 5. Resultados para el modelo diferenciado del desayuno “a la mexicana” en tamaño de porción. Se observa la restricción que no se cumple.

En la tabla 6, se muestran los valores de los requerimientos para el desayuno “a la mexicana” en la forma de restricciones, se observa que, de acuerdo a la solución propuesta, el requerimiento de vitamina A está por debajo del mínimo recomendado. También se muestran los resultados alcanzados para cada tipo de restricción y la diferencia entre lo recomendado y obtenido con el modelo de PL.

Tabla 6. Valor de las restricciones, resultados para cada restricción y valores de holgura y exceso (Diferencia).

Tipo de restricción	Valor de la restricción	Resultado	Diferencia	Cumple con la restricción	
Proteína	\geq 11.5 g	11.5 g	0 g	Sí	
Grasas	\leq 17.5 g	7.08715 g	10.41285 g	Sí	
Colesterol	\leq 75 mg	75 mg	0 mg	Sí	
Hidratos de carbono	\leq 32.5 g	32.5 g	0 g	Sí	
Vitamina A	\geq 142.5 μ g	25.5615 μ g	116.9385 μ g	No	Causa de la no factibilidad
Vitamina B1	\geq 0.000225 mg	0.090062 mg	0.089837 mg	Sí	
Vitamina B2	\geq 0.000225 mg	0.295715 mg	0.29549 mg	Sí	
Vitamina B3	\geq 0.003 mg	1.94855 mg	1.94555 mg	Sí	
Vitamina B6	\geq 0.00025 mg	0.07008 mg	0.06983 mg	Sí	
Vitamina B12	\geq 0.6 μ g	0.58607 μ g	0.01393 μ g	Sí	
Calcio	\geq 250 mg	250 mg	0 mg	Sí	
Hierro	\geq 5.25 mg	5.25 mg	0 mg	Sí	
Zinc	\geq 2.75 mg	5.9352 mg	3.1852 mg	Sí	
Energía	\leq 525 Kcal	447.24809 Kcal	77.75191 Kcal	Sí	

Para el resto de las opciones de desayuno, se presentan en la tabla 7 el resumen de los resultados obtenidos para cada modelo. Se aprecia que la carencia en el aporte de vitamina A, al menos para las porciones determinadas por el modelo de PL, se mantiene para todas las opciones. Aunque se ha diferenciado el planteamiento de cada modelo de acuerdo con la tabla 3, en la práctica no es posible, pero, la información nos permite ver que hay pocas diferencias significativas.

Tabla 7. Tablas resumen de los resultados de cada opción de desayuno. Se observa que en ningún caso se cumplen todas las restricciones. La deficiencia en vitamina A para el tipo de preparación propuesta es común.

Ingrediente	Nombre de la Variable	A la mexicana			Con salchicha			Con longaniza			Con jamón			Estrellado		
		Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones
Huevo	x ₁	0.098	9.8	Viola la restricción de la cantidad de vitamina A	0.082	8.2	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.091	9.1	Viola la restricción de la cantidad de vitamina A, hierro y zinc.	0.086	8.6	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.086	8.6	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.
Tortilla	x ₂	0.548	54.8	restricción de la cantidad de vitamina A	0.635	63.5	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.637	63.7	restricción de la cantidad de vitamina A, hierro y zinc.	0.638	63.8	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.64	64	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.
Queso rallado	x ₃	0.288	28.8	vitamina A	0.35	35	proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.347	34.7	vitamina A, hierro y zinc.	0.387	38.7	vitamina A, hierro y zinc.	0.39	39	proteína, vitamina A, hierro y zinc.
Salchicha	x ₄				0.07	7	vitamina A, hierro y zinc.									
Longaniza	x ₅							0.078	7.8							
Jamón	x ₆										0.016	1.6	interesante, que el valor para la variable jamon sea cero.			
Jitomate	x ₇	1.524	152.4													
Cebolla	x ₈	0.365	36.5													

Ingrediente	Nombre de la Variable	A la mexicana			Con salchicha			Con longaniza			Con jamón			Estrellado		
		Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones	Porción de 100 gramos	Peso gramos	Restricciones
Huevo	x ₁	0.099	9.9	Viola la restricción de la cantidad de vitamina A	0.019	1.9	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.076	7.6	Viola la restricción de la cantidad de vitamina A, hierro y zinc.	0.054	5.4	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.054	5.4	Viola la restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.
Tortilla	x ₂	0.458	45.8	restricción de la cantidad de vitamina A	0.576	57.6	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.599	59.9	restricción de la cantidad de vitamina A, hierro y zinc.	0.612	61.2	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.	0.612	61.2	restricción de la cantidad de proteína, vitamina A, hierro y zinc.
Queso rallado	x ₃	0.28	28	vitamina A	0.335	33.5	vitamina A	0.466	46.6	vitamina A, hierro y zinc.	0.645	64.5	vitamina A, hierro y zinc.	0.645	64.5	vitamina A, hierro y zinc.
Salchicha	x ₄				0.568	56.8										
Longaniza	x ₅							0.339	33.9							
Jamón	x ₆										0	0	interesante, que el valor para la variable jamon sea cero.			
Jitomate	x ₇	7.048	704.8													
Cebolla	x ₈	0	0													

5. Trabajo a futuro

La no factibilidad obtenida para cada uno de los modelos puede no serlo si el análisis se realiza en un trabajo a futuro mediante la programación por metas múltiples o la programación multiobjetivo. Si se emplea la programación por metas múltiples, el objetivo será reducir el valor de las desviaciones para cada meta o recomendación nutricional. Si se emplea la programación multiobjetivo, se establece el número y tipo de objetivos relevantes que se deseen alcanzar, por ejemplo, a la función de costo, agregar una función de nivel de vitamina A cumpliendo con las restricciones funcionales.

6. Conclusiones

Desde la perspectiva de la PL, los resultados nos permite concluir que antes la restricción de consumo de grasas, colesterol y energía se confirma que las proporciones de alimentos tipo cárnicos, aves y lácteos deben ser muy reducidos o nulos y que los desayunos de la cafetería escolar a base de huevo no cumplen con todas las recomendaciones de IDR, por lo que debe existir un balance entre las preferencias de consumo, las recomendaciones nutricionales y el costo, con un sacrificio en algunas o en todas las restricciones.

7. Referencias

- Alaini, R., Rajikan, R., & Elias, S. M. (2019). Diet optimization using linear programming to develop low cost cancer prevention food plan for selected adults in Kuala Lumpur, Malaysia. *BMC Public Health*, 19 (Suppl 4), 546. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-6872-4>
- Allen, R. C. (2017). Absolute poverty: When necessity displaces desire. *American Economic Review*, 107(12), 3690–3721. <https://doi.org/10.1257/aer.20161080>
- Briend, A., Darmon, N., Ferguson, E., & Erhardt, J. G. (2003). Linear programming: a mathematical tool for analyzing and optimizing children's diets during the complementary feeding period. *Journal of pediatric gastroenterology and nutrition*, 36(1), 12-22.
- Energía Proteínas Hidratos de carbono Lípidos Vitaminas Sales minerales Agua. (s/f). <https://www.fao.org/3/am401s/am401s03.pdf>. Consultado el 8 de noviembre de 2023,
- Frega, R., Lanfranco, J. G., De Greve, S., Bernardini, S., Geniez, P., Grede, N., & de Pee, S. (2012). What linear programming contributes: World Food Programme experience with the “Cost of the Diet” tool. *Food and nutrition bulletin*, 33(3_suppl2), S228-S234.
- Gibney, M. J., Lanham-New, S. A., Cassidy, A., & Vorster, H. H. (Eds.). (2009). *Introduction to human nutrition*. John Wiley & Sons.

- Herrera Genes, A. (2016). El desayuno y su importancia ¿es realmente el desayuno una necesidad fisiológica o un hábito saludable? *Gastrohnutp*, 15(2), 20-27.
- INCMNSZ. (2016). Tablas de composición de alimentos y productos alimenticios mexicanos (versión condensada 2015). https://www.incmnsz.mx/2019/TABLAS_ALIMENTOS.pdf
- Levetin, E., McMahon, K. (2024). *Plants and society. Ninth edition*. McGraw-Hill. EUA.
- López-Sobaler, A. M. a., Cuadrado-Soto, E., Peral Suárez, Á., Aparicio, A., & Ortega, R. M. a. (2018). Importancia del desayuno en la mejora nutricional y sanitaria de la población. *Nutricion hospitalaria: organo oficial de la Sociedad Española de Nutrición Parenteral y Enteral*, 35(6). <https://doi.org/10.20960/nh.2278>
- Nieves-Alonso, J. M., Hernández, R. M., Rueda, F. R., & Roca, A. P. (2022). Los equivalentes metabólicos estimados no se relacionan con el consumo máximo de oxígeno calculado en pacientes candidatos a cirugía de resección pulmonar. *Revista Española de Anestesiología y Reanimación*, 69(7), 437-441.
- Menchú, M. T., Méndez, H. (2012). Organización Panamericana de la Salud. Available at: <http://www.incap.int/mesocaribefoods/dmdocuments/TablaCAAlimentos.pdf>
- Okubo, H., Sasaki, S., Murakami, K., Yokoyama, T., Hirota, N., Notsu, A., Fukui, M. and Date, C. (2015). Designing optimal food intake patterns to achieve nutritional goals for Japanese adults through the use of linear programming optimization models. *Nutrition Journal*. 14(1), 57.
- Prawda, J. (2019). *Métodos y Modelos de Investigación de operaciones: modelos determinísticos*. (Vol. 1) Editorial Limusa. México.
- Van De Graff, K. M. Rhees, R. W. Palmer, S. L. (2011). *Human Anatomy and Physiology*. Schaum Series. Third edition. McGraw-Hill. USA.
- Zheng, J. (2022). Diet problem and the method linear programming. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 26, 124–129. <https://doi.org/10.54097/hset.v26i.3697>