



## FERTIDIF: software para la planificación de fertilización agrícola basado en optimización lineal con costos difusos

### FERTIDIF: software for farmland fertilization planning based in linear programming with fuzzy cost

Esmelin Niquin-Alayo<sup>1</sup>; Edmundo Vergara-Moreno<sup>2,\*</sup>; Marks Calderón-Niquín<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz.

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo.

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de ESAN.

Received November 11, 2016. Accepted March 11, 2018.

#### Resumen

Se utilizó la teoría de conjuntos difusos para la modelación del problema de abonamiento y fertilización de terrenos agrícolas considerando los costos difusos. Con la ayuda de los lenguajes de programación y herramientas informáticas, se diseñó un software denominado FERTIDIF, que puede coadyuvar a la toma de una decisión apropiada sobre el uso de fertilizantes o abonos necesarios para un determinado cultivo. El problema de fertilización se resolvió mediante la adaptación de metodologías de solución, propuestos por Lai-Hwang y Leberling; metodologías que transforman un problema de programación difuso (costos difusos) en un problema de optimización multi-objetivo, el mismo que mediante la ayuda del software FERTIDIF se resuelve fácilmente y se ayuda a los especialistas en fertilización agrícola, a tomar decisiones sobre las cantidades de abonos o fertilizantes a utilizar, así como determinar el costo mínimo del proceso de fertilización de un cultivo determinado.

**Palabras clave:** optimización lineal difusa; fertilización agrícola; costos difusos; planificación de nutrientes para vegetales; modelo difuso.

#### Abstract

The concepts of fuzzy sets theory for the mathematical modelling of fertilization farmland problems, considering fuzzy costs, are used. With support of programming languages and computer tools, a software called FERTIDIF to contribute in making decisions about the utilization of fertilizer and nutrients required for a particular crop, has been designed. The fertilization problem has been solved by means of the adaptation of methodologies of solution proposed by Lai-Hwang and Leberling; methodologies transforming a fuzzy problem with fuzzy cost into a multi-objective optimization problem and solved easily by using the FERTIDIF software, providing to the agricultural fertilization specialists to take decisions about the amounts of fertilizer as well as to determine the minimum cost of the fertilization process for a given crop.

**Keywords:** fuzzy linear optimization; farmland fertilization; fuzzy cost; nutrient planning for vegetable; fuzzy model.

#### 1. Introducción

El fin supremo de la sociedad es el bienestar de las personas que lo conforman. Una de los componentes de este bienestar es la buena salud y esto se consigue con una adecuada alimentación. La base de la alimentación son los productos agrícolas y ganaderos de buena calidad, provenientes directa o indirectamente de la agricultura.

La cantidad y calidad de la producción agrícola depende de la planta que se cultiva y de factores, como la capacidad del suelo, y los factores externos, como la remoción, irrigación, fertilización, etc. que contribuyen en la dinámica del suelo para generar los cambios físicos, químicos, biológicos que se producen en la capa superficial (Hernández, 2013; Ferro *et al.*, 2016).

\* Corresponding author

E-mail: [evergara@unitru.edu.pe](mailto:evergara@unitru.edu.pe) (E. Vergara-Moreno).

En el contexto mundial, en que la población se incrementa, mientras que existen muy pocos espacios de tierra para la incorporación a cultivo, la única alternativa para satisfacer el consumo alimenticio humano es el incremento de la productividad. Para este incremento resulta fundamental la fertilización. La fertilización adecuada de tal manera que no solo debe incrementar la productividad, sino también la producción sea saludable y que no genere la contaminación ni la degradación del suelo. Esto implica la selección de los tipos de fertilizantes en cantidades adecuadas según el tipo de cultivo y adoptar los procedimientos de aplicación recomendados para evitar pérdidas de nutrientes; de tal manera que mantengan la proporción ideal del suelo con 50% de materia sólida (45% de materias no orgánicas y 5% de materias orgánicas), además de 25% de agua y 25% de aire (Hernández, 2013).

En los cultivos, las plantas absorben nutrientes del suelo y del aire atmosférico a través de su raíz, hojas y tallos verdes, también pueden asimilarlos cuando se mojan las partes aéreas con soluciones acuosas nutritivas. Cierta número de nutrientes son utilizados en cantidades importantes, mientras otros lo son en pequeñas dosis. Los que se utilizan en mayor cantidad son: Carbono (C), Hidrogeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Azufre (S), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Hierro (Fe) y Cobre (Cu); en pequeñas cantidades, Zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Boro (Bo), Cloro (Cl) y Molibdeno (Mo) (Hernández, 2013).

Para que los vegetales puedan captar los nutrientes en cantidades óptimas, el suelo debe exhibir fertilidad física (textura, porosidad, permeabilidad y profundidad adecuada para favorecer la circulación del aire y agua), fertilidad química (con PH, CIC-capacidad de intercambio catiónico, CE-conductividad eléctrica, P y K adecuados) y fertilidad biológica (materia orgánica, drenaje, productos agroquímicos adecuados) ideales (Hernández, 2013).

Para mantener la optimalidad del suelo es necesario fertilizar, adicionando los nutrientes necesarios para obtener un nivel de productividad alto. Existe abundante información sobre la fertilización (Carvajal-Muñoz y Mera-Benavides, 2010; Echevarría y García, 2005; Hernández, 2013; Ferro *et al.*, 2016, Giletto *et al.*, 2012; Suñer y Galantini, 2012). También se utilizan modelos clásicos de optimización o sistemas expertos de decisión o heurísticos (Aguilar-Acuña *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2015; Elías, 2010; Elferjani *et al.*, 2013; Liu

*et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2013; López *et al.*, 2017; Luo, 2013; Yingjie *et al.*, 2010; Yuan *et al.*, 2016); Salazar *et al.* (2017) utilizan modelos difusos para la planificación de producción utilizando precios imprecisos del agua para el riego. Por otro se tienen trabajos que utilizan la lógica difusa para determinar el nivel óptimo de fertilización expresado en etiquetas lingüísticas (Ashraf *et al.*, 2014; Singh y Sharma, 2014); pero no se ha encontrado trabajos con modelos difusos en los costos de los fertilizantes.

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

Por tales razones, el objetivo de este trabajo fue construir el modelo con costo difuso que sirva para determinar un plan de fertilización óptima de un cultivo, resolverlo y luego desarrollar un software accesible para el usuario.

## 2. Materiales y métodos

En el desarrollo del sistema de ayuda a la decisión FERTIDIF, se ha utilizado los fundamentos del desarrollo de software y como base teórica, un modelo matemático para la toma de decisión de la planificación de fertilización agrícola, con la información difusa de los costos de los fertilizantes, se ha empleado información bibliográfica para la representación de la información difusa y solución del modelo.

### 2.1 Modelo de difuso

El problema de la dieta, en su forma clásica, fue planteado por Jerome Cornfield en 1941 y resuelto por primera vez mediante la programación lineal por Stigler. En la forma difusa ha sido planteado, resuelto y aplicado a las granjas avícolas en Perú (Vergara-Moreno *et al.*, 2006) y a las granjas de ganado vacuno en Argentina (Pelta *et al.*, 2012).

El problema de la dieta difusa (PD) tiene como meta determinar la combinación más económica de productos alimenticios de tal manera que satisfaga las necesidades nutricionales mínimas o máximas requeridas. Para el caso de la fertilización, el modelo difuso determina la combinación más económica de los abonos y fertilizantes, que satisfacen los requerimientos nutricionales de las plantas en un determinado terreno de cultivo, esto se logra resolviendo el problema de programación lineal, siguiente:

$$\text{Min } \sum_{j=1, \dots, n} C_j x_j$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} p_i &\leq \sum_{j=1, \dots, n} a_{ij} x_j \leq P_i, \quad i=1, \dots, m \quad (1) \\ m_j &\leq x_j \leq M_j, \quad j=1, \dots, n \end{aligned}$$

Donde:

$x_j$  representa la cantidad de abono  $j$  que debe incluirse en la fertilización.

$a_{ij}$  representa la cantidad del nutriente  $i$  contenido en el fertilizante  $j$ .

Las  $m$  primeras restricciones acotan las cantidades totales de nutrientes en la fertilización, es decir, cada nutriente  $i$  no debe ser inferior a la cantidad  $p_i$  ni superior a la cantidad  $P_i$  (mínimas y máximas necesarios), mientras que las otras  $n$  restricciones acotan la cantidad de cada fertilizante  $j$  permitido, que no debe ser inferior a  $m_j$  ni superior a  $M_j$ .

$c_j$ : el costo unitario del fertilizante  $j$ ; que, multiplicado por la respectiva cantidad fertilizante y sumado para todos los fertilizantes, proporciona el costo total.

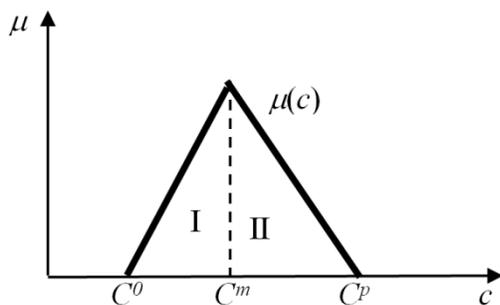


Figura 1. Número difuso.

Los precios de los productos que no son estables en periodos de tiempo prolongados, se representó mediante números difusos (Brunelli y Mezei, 2013; Ezzati et al., 2012; Liang et al., 2013; Wang et al., 2013), que en su forma más simple está representado mediante una terna de números reales, denominado números difusos triangulares. Cada costo difuso ( $\tilde{c}_i$ ) (número difuso triangular que es definido como un conjunto difuso, convexo normal y acotado en los números reales) denominado distribución posibilística, está descrito por una función de pertenencia

seccionalmente lineal como se muestra en la Figura 1.

Luego el modelo con costos difusos, tiene como función objetivo:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n \tilde{c}_i x_i \quad (2)$$

Manteniendo las restricciones igual que en (1).

### 2.2 Métodos de solución del modelo difuso

Existen varios métodos para resolver modelos con costos difusos (Dubey et al, 2012; Ezzati et al, 2015; Lai y Hwang, 1992; Leberling, 1981; Li y Wan, 2013; Luhandjula, 2015; Sakawa et al, 2013). Por su simplicidad para la implementación, se ha utilizado el método de Lai y Hwang (1992) que, basado en la filosofía del empresario (la de enrumbar sus actividades a fin de aumentar su posibilidad de ganancia), proponen transformar el problema de costos difusos en un problema con tres objetivos: maximizar la posibilidad de realizar menor gasto (maximizar el área I), minimizar la posibilidad de tener el más alto costo ( $c^m$ ) y minimizar la posibilidad de realizar mayor gasto (minimizar el área II, riesgo de mayor costo, de la Figura 1). Así, se tiene el modelo equivalente a (2):

$$\begin{aligned} \max z_1 &= (c^m - c^p)^T x \\ \min z_2 &= (c^m)^T x \\ \min z_3 &= (c^0 - c^m)^T x \end{aligned} \quad (3)$$

Sujeto a:  $x \in F$

Dónde:  $F$  es el conjunto de valores  $x$  que satisface las restricciones del modelo (1).

Para la solución del modelo (3) se han utilizado dos métodos, uno propuesto por Zimmermann (1978) y mejorado por Lai y Hwang (1992), y otro propuesto por Leberling (1981).

Tanto Lai y Hwang, así como Leberling proponen construir una meta difusa, definido por una función de pertenencia, como se muestra en la Figura 2 para la función objetivo de maximización y como se muestra en la Figura 3, para la función objetivo de minimización. En ambos casos se tienen una meta  $b_1$ ,  $b_2$  y su respectiva tolerancia  $t_1$  y  $t_2$ , que le da la naturaleza de meta difusa. Según Lai y Hwang (1992) la meta  $b_i$  y la tolerancia  $t_i$ , debe ser proporcionado por el decisor basado en su experiencia, mientras que Leberling (1981) propone la obtención de la meta y tolerancia mediante la solución de cada uno de los objetivos por separado con la restricción común.

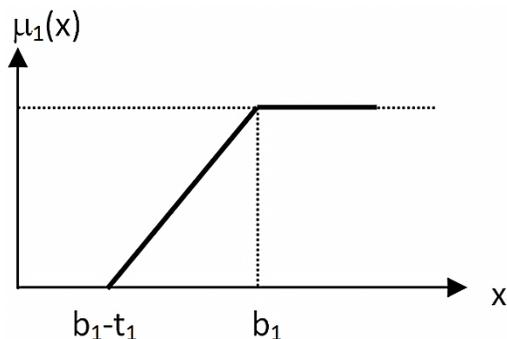


Figura 2. Función de pertenencia de meta de maximización.

Luego a partir de la formulación difusa, utilizando el criterio de la mejor decisión (Li y Wang, 2013) se obtiene el siguiente modelo lineal clásico:

$$\begin{aligned} & \max \quad \alpha \\ \text{sujeto a:} & \mu_i \geq \alpha \quad i = 1, 2, 3 \\ & x \in F \end{aligned} \quad (4)$$

que se ha resuelto utilizando el método simplex (Luenberger y Ye, 2016; Vanderbei, 2014).

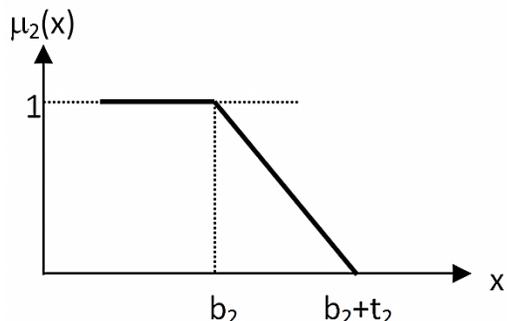


Figura 3. Función de pertenencia de meta de minimización.

### 2.3 Desarrollo del software FERTIDIF

Para el desarrollo del software se ha utilizado PC COREL I7-4771-3.5 GHZ, con el sistema operativo Windows XP Profesional. Se ha desarrollado siguiendo el modelo UML (Unified Modelling Language) (Mouheb et al., 2015, Zhang et al., 2016), utilizando el lenguaje de Programación Visual C++ (Acera, 2014), y se basa en los modelos y métodos de la programación lineal difusa descritos en las secciones 2.1 y 2.2; así como el método simplex para la solución de la programación lineal.

Para la validación del software se ha utilizado las metodologías recogidas por Puello (2013).

Los datos correspondientes a los fertilizantes y sus respectivos componentes

nutricionales se han recogido de Aguilar-Acuña et al. (2005); Carvajal-Muñoz y Mera-Benavides (2010); Echevarría y García (2005). Se utilizó la fórmula general de abonamiento siguiente:

$$Q(\cdot) = \frac{E - S(F1) - M(F2)}{F3} \quad (5)$$

donde, E es la cantidad de nutriente que requiere el suelo, S es el aporte del suelo, F1 es el coeficiente del uso del nutriente del suelo, M el coeficiente de uso de la materia orgánica, F2 cantidad de materia orgánica, F3 el coeficiente del uso del nutriente del fertilizante.

Los costos difusos se obtuvieron del recojo de los precios en el mercado.

La validación se efectuó mediante la comparación de los resultados obtenidos con el software diseñado y los resultados obtenidos con el programa WINQSB (2018), un software libre utilizado para resolver el modelo de la programación lineal clásica.

### 3. Resultados y discusión

El resultado tangible es el software FERTIDIF, que permite al usuario (agricultor) determinar una mezcla de abono óptimo, en el sentido de que satisface las condiciones de fertilización mediante una cantidad adecuada y con el menor costo. El software incluye la programación del modelo de optimización con costo difuso y los procedimientos de los métodos de solución. Por lo tanto, primero se describe muy brevemente el FERTIDIF y luego se presenta su uso ilustrando la solución de un problema típico.

#### 3.1 Descripción del Software FERTIDIF

El detalle de la descripción y las instrucciones de su uso comprenden varias páginas, pero aquí se presenta los aspectos fundamentales: (3.1.1) la herramienta para los decisores que corresponde a la parte de interface con el usuario, (3.1.2) el sistema de base de datos y (3.1.3) la base de modelos y métodos.

##### 3.1.1 La interface

Cuenta con un menú con las opciones típicas: Archivo, Ejecutar, Reporte, Fertilizantes y Abonos, Cultivos y Ayuda (Figura 4). En el menú de Archivo se encuentran las opciones de abrir, guardar, imprimir, y cerrar. En el menú Ejecutar se encuentran las opciones de Lai-Hwang y Leberling que son los dos métodos de solución que presenta el software.

En el menú Reporte se encuentra la opción generar, que es la que estructura los resultados. En el menú Fertilizantes y Abonos se encuentra la opción de modificar la base

de datos de estos, tanto en su composición química, así como en sus costos difusos. En el menú Cultivos también se incluye la opción de modificar, que corresponde a la opción de los cultivos, con sus requerimientos de diferentes nutrientes. Finalmente, la ayuda, que comprende la Guía de Instrucciones para el manejo del software, y los datos sobre FERTIDIF.

**3.1.2 Base de datos**

Cuando se pretende utilizar FERTIDIF para la planificación de fertilización agrícola, se necesita una serie de datos del suelo en donde se planifica cultivar un determinado tipo de cultivo, que requerirá la fertilización para lograr una alta productividad. En tal sentido, se ha incluido en el software los datos de los Fertilizantes y Abonos, así como de los Cultivos:

**Fertilizantes y Abonos:** Comprende la relación de los fertilizantes y Abonos existentes, con sus componentes nutricionales y con sus precios difusos expresado mediante una terna (menor costo, moda y mayor costo). Las modificaciones de esta base se realizan a través del menú Fertilizantes y Abonos. Al momento de utilizar el sistema, se seleccionan los Fertilizantes o Abonos disponibles en el mercado que se comprará, cuyos datos se encuentran almacenados.

**Cultivos:** al ingresar en esta opción se activa la ventana de ingreso de datos del suelo, tipo de suelo, capacidad de absorción del suelo en relación al tipo de cultivo, tanto de los nutrientes del suelo, así como del fertilizante y abono, para ingresar al sistema. En esta parte se incluye la cantidad de cada tipo de nutriente que requiere cada cultivo. Estos datos deben ser proporcionados por el usuario a la hora de la planificación, como resultado del estudio del suelo en relación a un determinado cultivo.

**3.1.3 Base de modelos y métodos**

El FERTIDIF en su primera versión, incluye un modelo, el de costos difusos, con dos métodos de solución; el de Lai-Hwang y el de Leberling, descritos en la sección 2.2. Todo el procedimiento, a partir de los datos ingresados, que requiere la solución del

modelo está programado en el FERTIDIF, que incluye la construcción de un modelo multiobjetivo, la transformación a la programación con metas difusas, la construcción de la función de pertenencia de las metas difusas, la transformación de las metas difusas a la programación lineal mediante la aplicación de los alfa-cortes de metas difusas, y finalmente la programación del método simplex. Todos ellos a través de módulos y subrutinas enlazadas, que se activan en cadena, cuando se hace clic en el icono cadena o mundo, según se desea obtener la solución mediante el método de Lai-Hwang o Leberling.

**3.2 Aplicación de software en la planificación de la fertilización agrícola**

Como ilustración, se planifica la fertilización de una hectárea de terreno en la costa peruana para el cultivo de la papa (Egúsqüiza y Catalán, 2011). El FERTIDIF sirve para la elaboración de planes de fertilización en dimensiones reales; sin embargo, en esta ilustración solo se considera las tres sustancias nutricionales básicas, nitrógeno (N), fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> representado simplemente por P) y potasio (K<sub>2</sub>O, simplemente K). Los datos principales del suelo, con el requerimiento mínimo y máximo para la fertilización se proporcionan en la [Tabla 1](#). También se ha considerado tres fertilizantes cuyas componentes nutricionales y precios se indica en la [Tabla 2](#).

**Tabla 2**  
Fertilizantes con sus componentes y precios en el mercado

Fertilizante	% N	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% K <sub>2</sub> O	Costo por kg en soles
Super Guano	20	20	15	$\tilde{c}_1=(1; 1,2; 1,5)$
Guano de la Isla	10	10	2	$\tilde{c}_2=(0,8; 1; 1,2)$
Fosfato de Amónico	16	48	0	$\tilde{c}_3=(1; 1,15; 1,3)$

El modelo para determinar la cantidad óptima de cada fertilizante o abono que se debe administrar con costo mínimo está dado por:

Minimizar  $W=(1;1,2;1,5) \cdot X_1+(0,8;1;1,2) \cdot X_2+(1;1,15;1,3) \cdot X_3$   
 Sujeto a:  
 $150 \leq 0,20X_1 + 0,10X_2 + 0,16X_3 \leq 190$  .....(N)  
 $140 \leq 0,20X_1 + 0,10X_2 + 0,48X_3 \leq 160$  .....(P).....(6)  
 $115 \leq 0,15X_1 + 0,02X_2 + 0,0X_3 \leq 155$  .....(K)  
 $X_1, X_2, X_3 \geq 0$

**Tabla 1**  
Datos relativos al suelo y requerimientos nutricionales de la papa

	Requerimientos kg/ha	Aporte del suelo kg/ha	Coefficiente de suelo F1	Coefficiente MO	F3	Requerimiento min-max kg/ha
Nitrógeno	120	17,5	0,2	1,4	0,70	150 - 190
Fosfato	60	128	0,2	1,4	0,25	120 - 160
Potasio	200	235	0,4	1,4	0,80	115 - 155

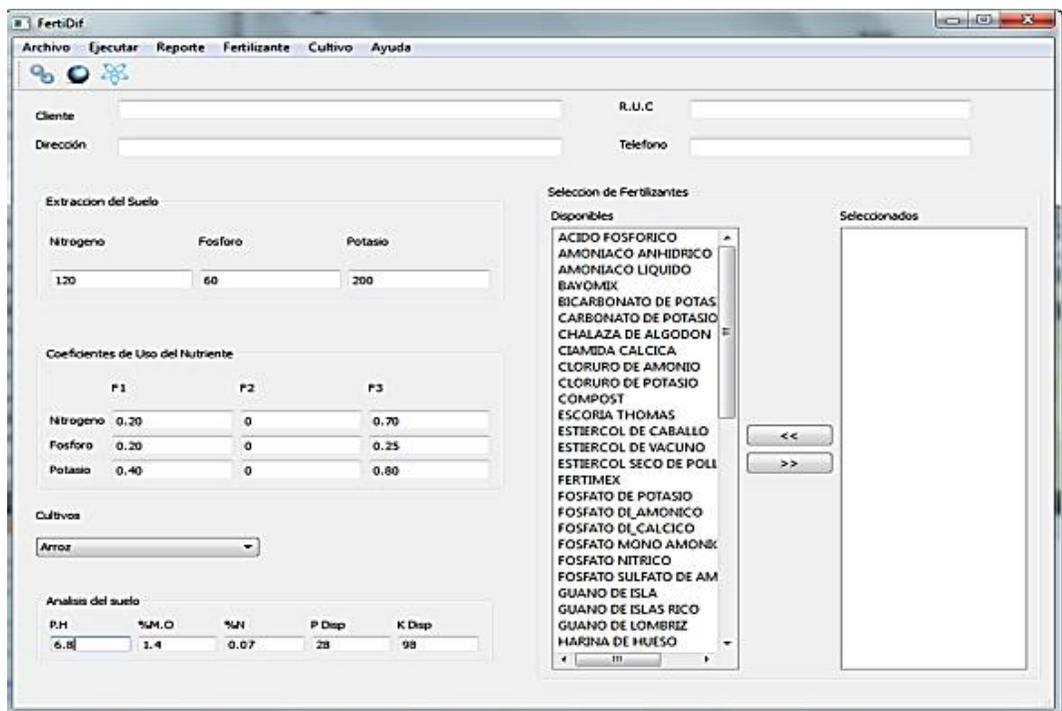


Figura 4. Ventana principal de FERTIDIF.

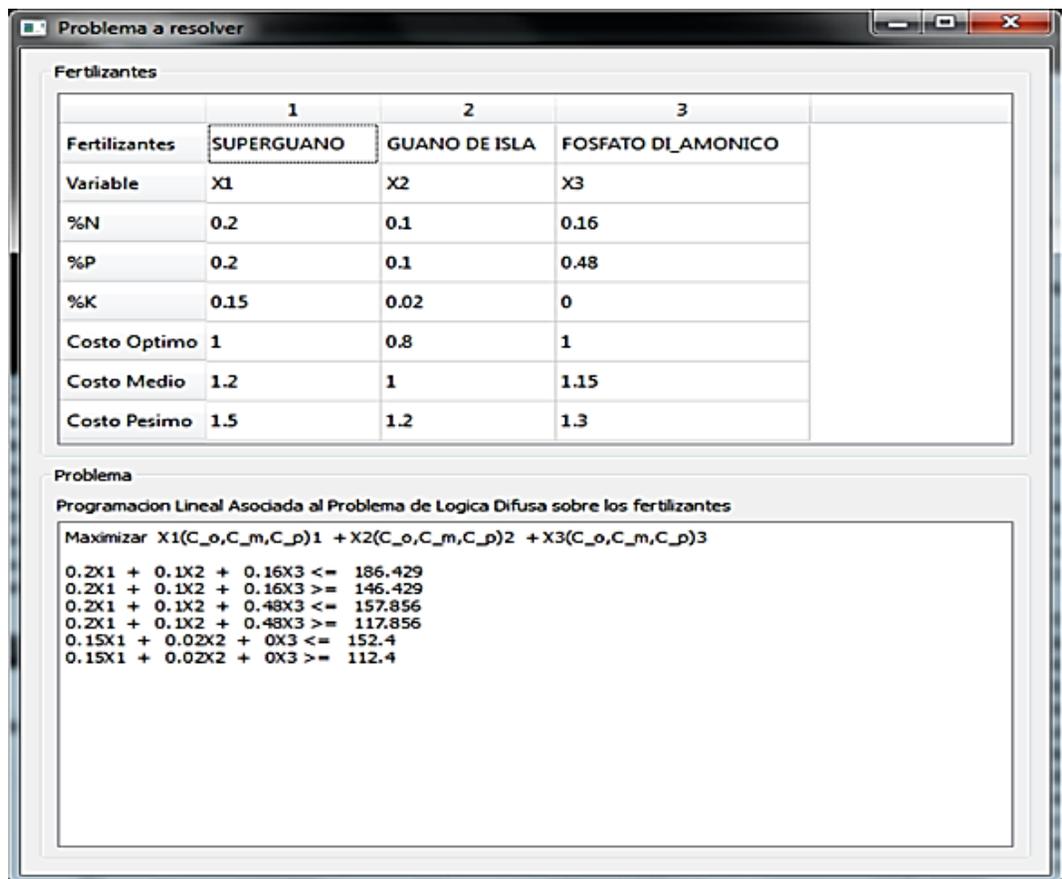


Figura 5. Reporte del problema de fertilización.

Form

1

```
Z1pis = min 0.2x1 + 0.2x2 + 0.15x3
X1_pis= {734.807,108.945,0}

Z1nis = max 0.2x1 + 0.2x2 + 0.15x3
X1_nis= {749.333,0,0}

Z1pis = 168.751
Z1nis = 149.867
```

2

```
Z2pis = min 0.3x1 + 0.2x2 + 0.15x3
X2_pis= {749.333,0,0}

Z2nis = max 0.3x1 + 0.2x2 + 0.15x3
X2_nis= {734.807,108.945,0}

Z2pis = 224.8
Z2nis = 242.231
```

3

```
Z3pis = min 1.2x1 + 1x2 + 1.15x3
X3_pis= {749.333,0,0}

Z3nis = max 1.2x1 + 1x2 + 1.15x3
X3_nis= {734.807,108.945,0}

Z3pis = 899.2
Z3nis = 990.714
```

4

```
X4 = alpha

0.2X1 + 0.2X2 + 0.15X3 + 18.8839X4 >= 149.867
0.3X1 + 0.2X2 + 0.15X3 + 17.4313X4 <= 242.231
1.2X1 + 1X2 + 1.15X3 + 91.5142X4 <= 990.714
0.2X1 + 0.1X2 + 0.16X3 + 0X4 <= 186.429
0.2X1 + 0.1X2 + 0.16X3 + 0X4 >= 146.429
0.2X1 + 0.1X2 + 0.48X3 + 0X4 <= 157.856
0.2X1 + 0.1X2 + 0.48X3 + 0X4 >= 117.856
0.15X1 + 0.02X2 + 0X3 + 0X4 <= 152.4
0.15X1 + 0.02X2 + 0X3 + 0X4 >= 112.4

X= {749.333,0,0,1}

Minimo : 749.333 899.2 1124
```

Resultados

Salir

Figura 6. Reporte de la solución obtenida mediante el método de Lai-Hwang.

Resultados Leberling

1

```
max Z1 = 0.2x1 + 0.2x2 +
min Z2 = -0.3x1 -0.2x2
min Z3 = -1.2x1 -1x2
X°1= {734.807,108.945,0}
Z°1 = 168.751

X°2= {749.333,0,0}
Z°2 = 224.8

X°3= {749.333,0,0}
Z°3 = 899.2
```

2

```
Z1m = min (Z'1(X°2) , Z'1(X°3))
Z1m = 149.867

Z2m = max (Z'2(X°1) , Z'2(X°3))
Z2m = 224.8

Z3m = max (Z'3(X°1) , Z'3(X°2))
Z3m = 899.2
```

3

```
Maximizar Z: alpha
X4 = alpha

0.2X1 + 0.2X2 + 0.15X3 -18.8839X4 >= 149.867
-0.3X1 -0.2X2 -0.15X3 + 0X4 <= 224.8
-1.2X1 -1X2 -1.15X3 + 0X4 <= 899.2
0.2X1 + 0.1X2 + 0.16X3 + 0X4 <= 186.429
0.2X1 + 0.1X2 + 0.16X3 + 0X4 >= 146.429
0.2X1 + 0.1X2 + 0.48X3 + 0X4 <= 157.856
0.2X1 + 0.1X2 + 0.48X3 + 0X4 >= 117.856
0.15X1 + 0.02X2 + 0X3 + 0X4 <= 152.4
0.15X1 + 0.02X2 + 0X3 + 0X4 >= 112.4

X= {734.807,108.945,0,1}

Minimo : 821.964 990.714 1232.95
```

Salir

Figura 7. Reporte de la solución obtenida mediante el método de Leberling.

Para resolver este modelo se utiliza FERTIDIF, mediante los siguientes pasos:

- 1) En el escritorio principal del programa (Figura 4), en la parte de Cultivos, seleccionar el cultivo (papa), inmediatamente se activa la opción para ingresar los datos del Suelo (Tabla 1).
- 2) Asimismo, se activa la opción de selección de Fertilizantes y Abonos, al realizarse la elección se carga la proporción de los componentes nutricionales y los costos difusos.
- 3) Una vez cargado los datos del problema, se puede visibilizar el modelo, como se muestra en la Figura 5.
- 4) Cuando se tiene el modelo completo, se hace doble clic en el icono cadena, y se obtienen la solución mediante el método de Lai-Hwang (Figura 6), y haciendo doble clic en el icono mundo, se obtiene la solución mediante el método de Leberling (Figura 7).

Los resultados obtenidos mediante el FERTIDIF se comparan con los resultados que se ha obtenido para el mismo problema utilizando la versión prueba de WINQSB, lo que se muestra en la Tabla 3. Se presenta la solución del problema (6), mediante los métodos de Lai-Hwang y Leberling utilizando por un lado el software desarrollado con FERTIDIF, y por otro lado utilizando el software WINQSB (2018).

En todos los casos la solución satisface los requerimientos nutricionales, en el ejemplo no se considera las cotas de los fertilizantes, la diferencia está en los costos. El costo proporcionado por WINQSB es mayor que el costo proporcionado por FERTIDIF en ambos métodos.

**Tabla 3**  
Soluciones mediante WINQSB y FERTIDIF

RESULTADOS COMPARATIVOS		
WINQSB	LAI: $X_1 =$	$\alpha = 0,61$
	781,38	Mínimo $\bar{W} = (789,13;$
	$X_2 = 0$	953,11;
	$X_3 = 7,75$	1182,77)
LEBERLING	$X_1 =$	$\alpha = 0,5$
	783,32	Mínimo $\bar{W} = (783,32;$
	$X_2 = X_3 = 0$	939,98;
		1174,98)
LAI-HWANG (FERTIDIF)	$X_1 =$	$\alpha = 0,616279$
	766,984	Mínimo : $\bar{W} = (776,274;$
	$X_2 = 0$	931,064; 1162,55)
	$X_3 = 9,289$	
LEBERLING (FERTIDIF)	$X_1 =$	$\alpha = 0.5$
	769.307	Mínimo : =
	$X_2 = 0$	$\bar{W} = (769.307, 923.168, 115$
	$X_3 = 0$	3.96)

La mayoría de los artículos (Aguilar-Acuña et al, 2005; Efferjani et al, 2013; Luo, 2013; Yuan et al, 2016) relacionados con la fertilización, fundamentalmente se dedican a la determinación de la proporción de los componentes básicos (N, P, K) que permi-

tan mejorar la productividad, y la reducción de los efectos negativos en el suelo. Por ejemplo, Cao et al. (2015) utiliza un sistema experto para la fertilización eficiente del cultivo de arroz, buscando la reducción de los efectos negativos.

Liu et al. (2013) analiza los efectos medioambientales de la fertilización por riego utilizando sensores inalámbricos. Adicionalmente, Liu et al. (2015) incorpora en el sistema otras informaciones como el control de plagas, seguridad y regulaciones. Pero ninguno de ellos incluye el costo difuso. En este trabajo además de proporcionar la fertilización requerida, se da el costo difuso que da flexibilidad al decisor para la mejor toma de decisión.

#### 4. Conclusión

Los números difusos han permitido representar la información de costos variados en el mercado. Con esta ayuda se ha podido representar la problemática de la planificación en fertilización de cultivos agrícolas mediante el modelo difuso. La solución que se obtiene luego de resolver el problema es dada por un número difuso, pero que el software reporta con un determinado grado de aceptación. Por otro lado, en el mismo reporte se proporciona el menor costo, el costo intermedio y el mayor costo, dependiendo que el costo de adquisición sea el menor, intermedio o mayor costo, la decisión queda a criterio del especialista. De los resultados obtenidos se ha podido inferir que ambos métodos de solución proporcionan resultados con muy pocas diferencias, lo cual garantiza la consistencia de los métodos y algoritmos para la solución al problema planteado.

Usando el modelo difuso y los correspondientes métodos de la Programación Lineal Difusa, se ha desarrollado el software FERTIDIF, que en su versión primera servirá de herramienta de apoyo en la planificación de fertilización de terrenos y cultivos agrícolas.

FERTIDIF permitirá determinar la cantidad de cada tipo de insumo que se debe incluir en un proceso de fertilización agrícola, de manera tal que satisfaga los requerimientos nutricionales de un determinado cultivo y con la ventaja de generar un menor costo.

#### Agradecimiento

Parte del trabajo ha sido desarrollado dentro del marco de Proyecto CYTED P515RT0123 (BIGDSSAGRO): Red Iberoamericana de Agro-BigData y Decision Support Systems (DSS) para un sector agropecuario sostenible.

## Referencias Bibliográficas

- Acera, M. A. 2014. C/C++ Curso de programación 2015. Editorial Anaya Multimedia. Madrid, España.
- Aguilar-Acuña, J.L.; Grageda-Cabrera, O.A.; Vuelvas-Cisneros, M.A.; Martínez-Hernández, M.; Solis-Moya, E.; Medina-Cázares, T.; Ramírez-Ramírez, A. 2005. Eficiencia de Fertilizantes aplicados con fertirriego en Chile Ancho. *Agricultura Técnica en México* 31(2): 177-189.
- Ashraf, A.; Akram, M.; Sarwar, M. 2014. Type-II fuzzy decision support system for fertilizer. *Hindawi* 9:1-10.
- Brunelli, M.; Mezei, J. 2013. How different are ranking methods for fuzzy numbers?: A numerical study. *International Journal of Approximate Reasoning* 54: 627-639.
- Cao, S.; Zhou, W.; Wang, F.; Luo, S.; Deng, R.; Xie, T. 2015. Development and promotion of expert information system on rice soil testing and formulated fertilization in Dong'an County. *Agriculture Network Information* 09.
- Carvajal-Muñoz, J.S.; Mera-Benavides, A.C. 2010. Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible. *Producción + Limpia* 5(2): 77-96.
- Dubey, D.; Chandra, S.; Mehra, A. 2012. Fuzzy linear programming under interval uncertainty based on IFS representation. *Fuzzy Sets and Systems* 188(1): 68-87.
- Echevarría, H.E.; García, F.O. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Egúszquia, R.; Catalán W. 2011. Guía Técnica, curso taller, Manejo Integrado de Papa. Universidad Agraria la Molina, Lima, Perú.
- Elferjani, R.; DesRochers, A.; Tremblay, F. 2013. DRIS-based fertilization efficiency of young hybrid poplar plantations in the boreal region of Canada. *New Forests* 44(4): 487-508.
- Elias, I. 2010. La estrategia competitiva del sector agrario a través de la innovación y desarrollo. Cuadernos de Investigaciones EPG, Escuela de Postgrado de la UPC, Edición N° 10 – Abril 2010, Lima, Perú.
- Ezzati, R.; Allahviranloo, T.; Khezerloo, S.; Khezerloo, M. 2012. An approach for ranking of fuzzy numbers. *Expert Systems with Applications* 39(1): 690-695.
- Ezzati, R.; Khorram, E.; Enayati, R. 2015. A new algorithm to solve fully fuzzy linear programming problems using the MOLP problem. *Applied Mathematical Modelling* 39(12): 3183-3193.
- Ferro, D.; Pellegrini, A.; Chamorro, A.; Bezuz, R.; Golik, S. 2016. Balance simplificado de nutrientes del suelo en secuencias trigo/soja2da y colza/soja2da. *Acta de XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. pp. 18.
- Giletto, C.M.; Magnoni, J.M.; Echevarría, H.E. 2012. Fertilización con azufre en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) para la industria en el sudeste Bonaerense. *Revista Ciencia del Suelo* 30(1): 75-84.
- Hernández, J.C. 2013. Edafología y fertilidad. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia.
- Lai, Y.J.; Hwang, C.L. 1992. A new approach to some possibilistic linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems* 49(2): 121-133.
- Leberling, H. 1981. On finding compromise solutions in multicriterial problems using the fuzzy min operator. *Fuzzy Sets and Systems* 6(2): 105-118.
- Liang, D.; Liu, D.; Pedrycz, W.; Hu, P. 2013. Triangular fuzzy decision theoretic rough sets. *International Journal of Approximate Reasoning* 54(8): 1087-1106.
- Li, D.F.; Wan, S.P. 2013. Fuzzy linear programming approach to multiattribute decision making with multiple types of attribute values and incomplete weight information. *Applied Soft Computing* 13(11): 4333-4348.
- Liu, T.; Li, T.; Wang, Y.; Zhang, X.; Zheng, Z. 2015. Design and application of fertilization information system for farmland of village scale. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 03.
- Liu, Y.; Zhu, L.; Huang, D. 2013. The system design of farmland environmental monitoring based on GPRS and wireless sensor network. *Journal of Agricultural Mechanization Research* 07.
- López, J.; Carrillo, P.; Valenzuela, O. 2017. A multicriteria group decision model for ranking technology packages in agriculture. In: Cruz Corona C. (eds) *Soft Computing for Sustainability Science. Studies in Fuzziness and Soft Computing* 358: 137-161.
- Luenberger, D.; Ye, Y. 2016. *Linear and Nonlinear Programming*. International Series in Operations Research & Management Science 228, Springer US, New York, USA.
- Luhandjula, M.K. 2015. Fuzzy optimization. *Fuzzy Sets and Systems* 274 (C): 4-11.
- Luo, M.Y. 2013. Calculation of theoretical model on balanced fertilization in soil. *Advanced Materials Research* 610-613: 2931-2936.
- Mouheb, D.; Debbabi, M.; Pourzandi, M.; Wang, L.; Nouh, M.; Ziarati, R.; Alhadidi, D.; Talhi, C.; Lima, V. 2015. Aspect-Oriented Security Hardening of UML Design Models. Springer International Publishing, Switzerland.
- Parent, S.; Leblanc, M.; Parent A.; Coulibali, Z.; Parent, L. 2017. Site-Specific multilevel modelling of potato response to nitrogen fertilization. *Frontiers in Environment Science-Environmental Informatics* 5: 81.
- Pelta, D.A.; Verdegay, J.L.; Cadenas, J.M. 2012. Introducing SACRA: A Decision support. *Applied Decision Support with Soft Computing* 124: 391-401.
- Puello, O.R. 2013. Modelo de verificación y validación basado en CMMI. *Investigación e Innovación en Ingenierías* 1(1): 20-27.
- SAGARPA (Secretaría de agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, de Estados Unidos de México). 2015. *Ficha técnica del cultivo de la Caña de azúcar*. México.
- Sakawa, M.; Yano, H.; Nishizaki, I. 2013. *Linear and Multiobjective Programming with Fuzzy Stochastic Extensions*. International Series in Operations Research & Decision Theory 203, Springer, New York, USA.
- Salazar, M.; Fitz, R.; Pérez, S. 2017. Agricultural production planning in a fuzzy environment. In Akio Matsumoto (Ed.). *Optimization and dynamics with their applications*. Springer, Singapore: 281-293.
- Singh, H.; Sharma, N. 2014. Optimization of fertilizer rates for wheat crop using fuzzy expert system. *International Journal of Computer Applications* 100(1): 36-40.
- Suñer, L.G.; Galantini, J. A. 2012. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región sudoeste papeana. *Revista Ciencia del Suelo* 30(1): 57-66.
- Vanderbei, R. 2014. *Linear programming, foundations and extensions*. International Series in Operations Research & Management Science 196, Springer US, New York, USA.
- Vergara-Moreno, E.; Rodríguez-Novoa, F.; Saavedra-Sarmiento, H. 2006. Métodos de optimización lineal difusa para la planificación nutricional en granjas avícolas. *Mosaico Científico* 3: 16-29.
- Wang, J.; Nie, R.; Zhang, H.; Chen X. 2013. New operators on triangular intuitionistic fuzzy numbers and their applications in system fault analysis. *Information Sciences* 251(1): 79-95.
- WINQSB. 2018. Programa para soluciones problemas de decisión. <https://winqsb.waxoo.com/>, visitado el 23 de enero de 2018.
- Yingjie, L.; Xiaoqin, Z.; Youhua, M.; Mingan, Z.; Juan, Z.; Nan, S. 2010. Review on Application of information technology in soil testing and formulated fertilization. *Agriculture Network Information*. 2:11.
- Yuan, C.; Li, D.; Li, Y. 2016. Application of BP neural network base on MapReduce in precisión ferti-

- zation. Journal of Chinese Agricultural Mechanization 02.
- Zhang, L.; Williams, R. A.; Gatherer, D. 2016. Rosens's (M,R) systems in Unified Modelling Language. Biosystems 139: 29-36.
- Zimmermann, H. J. 1978. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, Fuzzy Sets and Systems 1(1): 45-55.