



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO  
ESCUELA SUPERIOR TEPEJI**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**Desarrollo del programa OpenDEA para la medición de la eficiencia técnica  
mediante el Análisis Envolvente de Datos**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO INDUSTRIAL**

**PRESENTA:  
FRANCISCO MONTOYA CASAS**

**ASESOR:  
M. EN C. ÓSCAR OLVERA NERIA**

Tepeji del Río, Hgo., Octubre de 2010.

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Gracias a Dios**

Por permitirme llegar hasta este momento, también por haberme escuchado en los momentos de debilidad, donde dude de mis capacidades pero supe mejorar cada día.

### **Gracias a mis padres María Luisa y Lidio**

Por su tiempo, cariño, comprensión y apoyo sin condiciones ni medida. Gracias por guiarme sobre el camino de la educación, soy afortunado por contar con su ejemplo.

### **Gracias a mi hermana Delia**

Por tus comentarios, sugerencias y opiniones. Además de ser una buena amiga, eres la mejor compañía para compartir el mismo techo.

### **Gracias a mi asesor Óscar**

Por todos los conocimientos que compartió conmigo, además de todos los recursos que me proporcionó para poder desarrollarme y por la gran amistad que me brindó.

**Gracias a cada uno de mis maestros**

Que participaron en mi desarrollo profesional durante mi carrera, sin su ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora.

**Gracias a todos mis amigos**

Que estuvieron conmigo y compartimos tantas aventuras, experiencias, desvelos y triunfos.

Gracias a cada uno por hacer que mi estancia en la UAEH fuera más amena.

# ÍNDICE

## **Capítulo I ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BÁSICOS.....5**

1.1 Concepto y clasificación de las medidas de eficiencia .....	5
1.2 Eficiencia de precio (eficiencia asignativa) .....	7
1.3 Eficiencia global o económica .....	8
1.4 Técnicas de estimación de la eficiencia .....	9

## **Capítulo II ESTIMACIÓN DE LA FRONTERA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS.....12**

2.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA) .....	12
2.2 Caracterización de los modelos DEA .....	13
2.2.1 Orientación del modelo .....	13
2.2.2 Tipología de los rendimientos constantes a escala .....	14
2.3 Ventajas y desventajas del Análisis DEA .....	15

## **Capítulo III MODELO DEA-CCR.....17**

3.1 Introducción.....	17
3.2 Modelo DEA-CCR orientado a insumos en forma fraccional .....	17
3.3 Modelo DEA-CCR orientado a insumos en forma multiplicativa .....	20
3.3.1 Caracterización de la eficiencia .....	22
3.3.2 Significado de los pesos .....	23
3.4 Modelo DEA - CCR orientado a insumos en forma envolvente.....	24
3.4.1 Caracterización de la eficiencia y valores de holgura .....	25
3.4.2 “Benchmarking” en DEA: fijación de referencias para la mejora.....	27
3.5 Método de dos etapas del Modelo DEA-CCR orientado a insumos .....	28
3.6 Modelo DEA-CCR orientado a productos .....	30
3.6.1 Introducción.....	30

3.6.2 Método de dos etapas del Modelo DEA—CCR orientado a productos.....	31
<b>Capítulo IV DESARROLLO DEL PROGRAMA OpenDEA-1.0 .....</b>	<b>34</b>
4.1 Introducción .....	34
4.2 Modelo implementado del DEA-CCR orientado a insumos.....	34
4.3 Modelo implementado del DEA-CCR orientado a productos .....	35
4.4 Diagrama de flujo del programa OpenDEA-1.0 .....	36
4.5 Programa Frontier Analyst.....	39
<b>Capítulo V EVALUACIÓN DE ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA EN LA REPÚBLICA MEXICANA .....</b>	<b>41</b>
5.1 Introducción.....	41
5.2 Selección de los organismos operadores de agua potable en México.....	42
5.3 Selección de indicadores de gestión .....	43
5.3.1 Selección de insumos en los organismos operadores de agua .....	43
5.3.2 Selección de productos en los organismos operadores de agua.....	44
5.4 Consideraciones en la muestra de organismos operadores .....	45
5.5 Validación de variables de insumos y productos .....	45
5.6 Eficiencia técnica usando el programa OpenDEA-1.0 .....	47
5.6.1 Comparación del Modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos .....	47
5.6.2 Proyección del Modelo DEA—CCR orientado a insumos.....	49
5.6.2.1 Líneas de acción para el modelo DEA-CCR orientado a insumos .....	52
5.6.3 Proyección del Modelo DEA – CCR orientado a productos .....	53
5.6.3.1 Líneas de acción para el modelo DEA-CCR orientado a productos.....	55
5.7 Comparación del programa OpenDEA-1.0 con Frontier Analyst.....	56
5.7.1 Eficiencia técnica.....	56
<b>Conclusiones .....</b>	<b>58</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>64</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descomposición de la eficiencia.....	5
Figura 2. Eficiencia técnica radial.....	6
Figura 3. Frontera de isocostos $PP'$ .....	8
Figura 4. Métodos para estimar la eficiencia. ....	10
Figura 5. Frontera con rendimientos constantes a escala. ....	14
Figura 6. Consideración de dos insumos y un producto.....	26
Figura 7. Proyección en insumos del modelo DEA–CCR orientado a insumos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.....	49
Figura 8. Proyección en productos del modelo DEA–CCR orientado a insumos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.....	50
Figura 9. Proyección de insumos de modelo DEA-CCR orientado a productos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.....	53
Figura 10. Proyección de productos de modelo DEA-CCR orientado a productos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 .....	54
Figura 11. Eficiencia técnica y proyección del modelo DEA-CCR orientado a insumos con el programa Frontier Analyst .....	56
Figura 15. Formato para los datos de entrada de OpenDEA-1.0.....	76
Figura 16. Ejecución en pantalla de OpenDEA-1.0 .....	77
Figura 17. Menú mostrado en pantalla por OpenDEA-1.0 .....	78
Figura 18. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0. Al final de la ejecución. ....	80
Figura 19. Pantalla mostrando mensaje de error en la introducción de datos .....	81
Figura 20. Pantalla con los datos de salida para eficiencia técnica por OpenDEA-1.0 del modelo DEA-CCR orientado a insumos.....	82
Figura 21. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para proyección de modelo DEA-CCR orientado a insumos .....	84
Figura 22. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para la eficiencia técnica de modelo DEA-CCR orientado a productos .....	85
Figura 23. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para la proyección de modelo DEA-CCR orientado a productos .....	86
Figura 24. Pantalla de comandos mostrada en Sistema operativo Windows .....	88
Figura 26. Comando para compilar subrutina .....	89
Figura 27. Comando para compilar ejecutable.....	89

Figura 28. Ejecución en pantalla del Programa OpenDEA-1.0.....	90
Figura 29. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0. Al final de la ejecución. ....	91
Figura 30. Pantalla mostrando mensaje de error en la introducción de datos .....	92

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Transformación del modelo DEA-CCR orientado a insumos .....	24
Tabla 2. Transformación del modelo DEA-CCR orientado a productos .....	24
Tabla 3. Costo de licencias de Frontier Analyst.....	40
Tabla 4. Organismos operadores de agua potable analizados en México .....	42
Tabla 5. Variables usadas por el IMTA para construir Indicadores de Gestión, 2010.....	43
Tabla 6. Variables de insumo elegidas para los organismos operadores de agua potable en México....	44
Tabla 7. Variables de producto elegidas para los organismos operadores de agua potable en México. 44	
Tabla 8. Correlación entre insumos.....	46
Tabla 9. Correlación entre productos. ....	46
Tabla 10. Variables de insumos y productos utilizadas en el análisis de la eficiencia de los organismos de agua en Mexico .....	46
Tabla 11. Datos de entradas y salidas de los organismos operadores de agua año 2006. ....	47
Tabla 12. Comparación de Modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos.....	48
Tabla 13. Valores iniciales y proyectados para los insumos y productos del organismo operador de agua potable de Ensenada obtenidos mediante el modelo DEA –CCR orientado a insumos. ....	51
Tabla 14. Valores iniciales y proyectados para los insumos y productos del organismo operador de agua potable de Ensenada obtenidos mediante el modelo DEA –CCR orientado a productos.....	54
Tabla 15. Comparación de la eficiencia técnica OpenDEA-1.0 vs. Frontier Analyst. ....	57

## ***Introducción***

Para comparar el desempeño de varias organizaciones, estas deben utilizar el mismo tipo de recursos (insumos) y producir un mismo tipo de productos (salidas); es decir, deben ser similares. Tradicionalmente se utilizan cocientes de estas cantidades (salidas/insumos) para cuantificar la eficiencia de las organizaciones; sin embargo, se presentan problemas al mezclar diferentes tipos de unidades, lo que hace difícil e inexacta la comparación del desempeño organizacional.

La evaluación de la eficiencia técnica de un conjunto de unidades tomadoras de decisiones (DMU's) del sector público o privado, es fundamental para destacar en un medio competitivo. La técnica para medir la eficiencia conocida como Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis, DEA) tiene profundas bases matemáticas que permiten abordar el problema de la eficiencia de una manera novedosa, y en última instancia, cualquier empresa mejora su gestión al aplicar adecuadamente la técnica.

El modelo DEA es considerado una técnica no paramétrica, enmarcado dentro de los modelos de frontera, que evalúa la eficiencia productiva en términos de una relación Insumos-Productos, de este modo, permite diagnosticar y elaborar programas que procuran la eficiencia organizacional.

En esta tesis se realizó la programación del modelo DEA orientado a insumos y productos (DEA-CCR) mediante el lenguaje de programación Fortran90, con lo cual se evalúa la eficiencia técnica y se obtiene una proyección de mejora de los organismos ineficientes.

Con el objetivo de medir el desempeño en la distribución de agua potable por parte de los organismos operadores de agua en México, se determinó la eficiencia en la distribución de agua considerando los factores que la condicionan, para después desarrollar líneas de acción para controlar los factores críticos.

La administración del agua, recurso natural que el hombre ha aprendido a aprovechar en las condiciones más adversas, se facilita por el avance de la tecnología, aunque el crecimiento de la demanda es insaciable e impone condiciones cada vez más difíciles que en conjunto generan un problema complejo, de ahí la importancia de contar con herramientas que favorezcan la administración racional del agua.

En el capítulo I se presentan los antecedentes y conceptos básicos para medir el desempeño en organizaciones y en particular, la eficiencia técnica. En el capítulo II se desarrolla el modelo conocido como Análisis Envolvente de Datos que se usará para evaluar el desempeño de los organismos operadores de agua potable, se presentan las diferentes orientaciones del DEA: orientado a insumos y productos y finalmente se muestran las ventajas del método, en particular, se hace énfasis de que no se requieren conocer los precios de los insumos y productos para determinar la eficiencia técnica. El capítulo III se desglosa el modelo DEA-CCR, donde la suposición básica es que el nivel de productos es proporcional al nivel de insumos. El capítulo IV muestra el desarrollo del programa OpenDEA-1.0 que implementa los algoritmos desarrollados por Charnes-Cooper-Rhodes para medir la eficiencia técnica. En el capítulo V se presenta el caso de estudio: “Evaluación del desempeño de los organismos operadores de agua potable en la República Mexicana”, se analizan los organismos empleando el modelo de caja negra con el propósito de establecer las variables de insumos y productos. Los resultados son comparados con los obtenidos con el programa comercial Frontier Analyst para validar el programa OpenDEA.

El Anexo contiene un manual de usuario del OpenDEA-1.0 para instalar y usar el programa en los sistemas operativos Windows y Linux. También se hace una descripción detallada de los algoritmos implementados en el OpenDEA-1.0 y un ejemplo paso a paso para usar el programa.

## ***Abstract***

En México, hace 50 años la disponibilidad de agua por habitante era de 18,400 m<sup>3</sup>/año, y en el presente, ésta se ha reducido a 4,900 m<sup>3</sup>/año por persona. Cabe señalar, además, que cuando se habla del agua disponible, se considera toda la que está a nuestro alcance, sin reconocer que ninguna sociedad puede aprovechar la totalidad del recurso de un lago o río, ya que al hacerlo se perderían sus otros beneficios.

La disponibilidad, si bien propició el crecimiento económico de importantes regiones del país, no se vinculó al desarrollo de tecnologías ahorradoras que fomentaran el cuidado y uso eficiente del recurso, tampoco se fomentó una cultura de pago que solventara los altos costos de la infraestructura y operación de sistemas cada vez más complejos. En otras palabras, la aparente disponibilidad postergó la necesidad de administrar el agua con eficiencia y evitó que la sociedad se adaptara a volúmenes limitados.

Este trabajo utiliza el Análisis Envolvente de Datos (DEA) para el estudio de organismos operadores de agua de la República Mexicana. Esto nos permitirá evaluar la eficiencia técnica de los organismos operadores de agua, así como realizar una proyección para aquellos que no son eficientes.

## **Objetivo General**

Desarrollar un programa de cómputo para medir la eficiencia técnica de los organismos operadores de agua potable de México, mediante el Análisis Envolvente de Datos.

## **Objetivos Particulares**

- Cuantificar la eficiencia técnica mediante el modelo de Rendimientos Constantes a escala orientado a productos e insumos.
- Validar el programa desarrollado a través de la comparación de los resultados de la eficiencia de los organismos operadores de agua potable con el programa comercial Frontier Analyst.
- Proponer líneas de acción para mejorar el desempeño de los organismos operadores de agua potable de México.

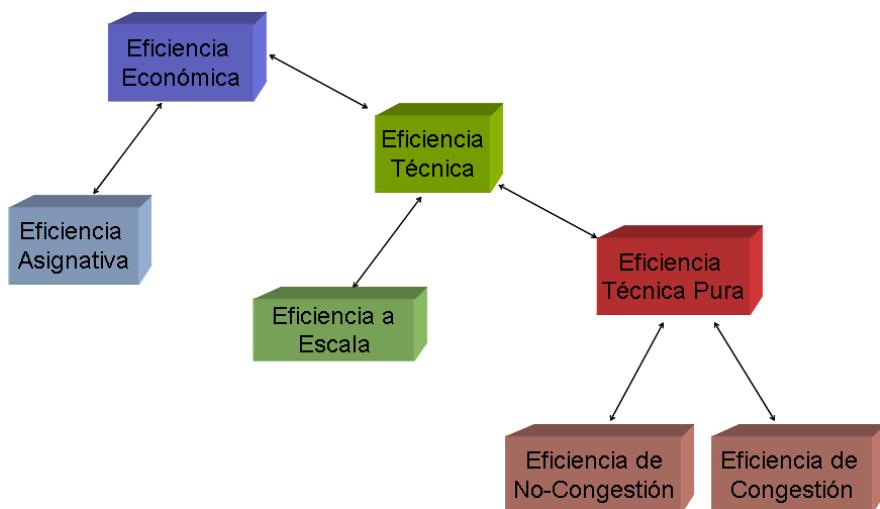
# Capítulo I ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BÁSICOS

## 1.1 Concepto y clasificación de las medidas de eficiencia

Antes de iniciar el estudio de la eficiencia técnica es conveniente especificar los conceptos que van a ser utilizados en el análisis posterior.

Los conceptos centrales de este trabajo son: *frontera de producción* y *eficiencia técnica*. La frontera de producción hace referencia a la máxima cantidad teórica de productos posibles, dada la combinación de insumos y la tecnología disponible, mientras que la eficiencia técnica se refiere a la capacidad que tiene una unidad para obtener el máximo de productos a partir de un conjunto de insumos. Una unidad eficiente económicamente, considera tanto el ámbito técnico como los precios de los insumos y productos. Por lo tanto, evaluar la eficiencia (o ineficiencia) técnica de un conjunto de unidades homogéneas, comienza por la estimación de la frontera de producción ya que ésta no es conocida en la práctica. La *Figura 1* muestra la descomposición de la eficiencia.[1]

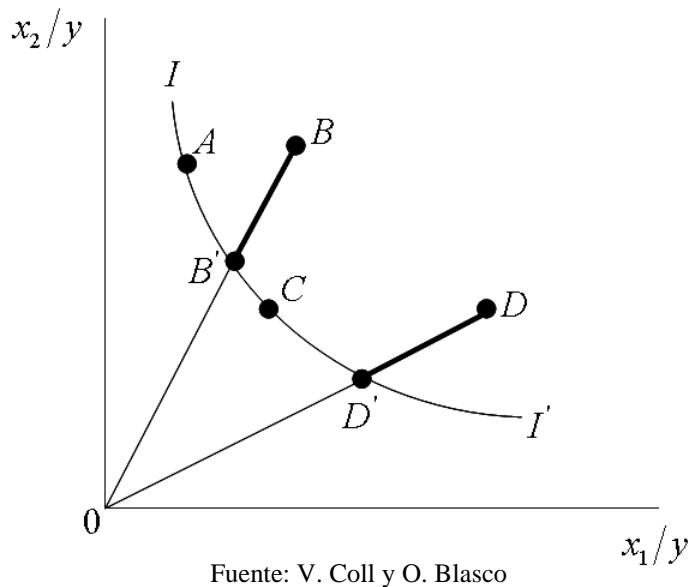
Figura 1. Descomposición de la eficiencia.



Fuente: A. Weersink, G.Turvey, y A. Godah

Charnes y colaboradores, definen a la eficiencia técnica como la capacidad que tiene una Unidad Tomadora de Decisiones (Decision Market Unit, DMU) para obtener el máximo nivel de productos dado un conjunto de factores de producción. Por ejemplo, se consideran cuatro unidades ( $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$ ) y cada una obtiene un único producto ( $y$ ) y emplean para ello dos insumos ( $x_1$  y  $x_2$ ). En la *Figura 2*, cada punto ( $\bullet$ ) representa las coordenadas del “plan de producción” ( $x_1/y$ ,  $x_2/y$ ) observado para cada una de las unidades referidas. La isocuanta de las unidades eficientes está representada por la curva  $II'$ , de modo que aquellas unidades que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes.

Figura 2. Eficiencia técnica radial.



Fuente: V. Coll y O. Blasco

La eficiencia técnica se obtiene al comparar el valor observado de cada unidad con el valor óptimo que está definido por la frontera de producción estimada (isocuanta eficiente).

La *Figura 2* muestra que tanto la unidad  $B$  como la  $D$  son ineficientes técnicamente, puesto que ambas podrían reducir la cantidad de insumos consumidos y seguir produciendo una unidad de producto. La ineficiencia de estas unidades se determina por la distancia  $B'B$  y  $D'D$ , respectivamente. Por el contrario, las unidades  $A$  y  $C$  son técnicamente eficientes porque operan sobre la frontera eficiente.

La eficiencia relativa puede determinarse numéricamente como la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen a la unidad considerada. Así, para la unidad *B* se tiene:

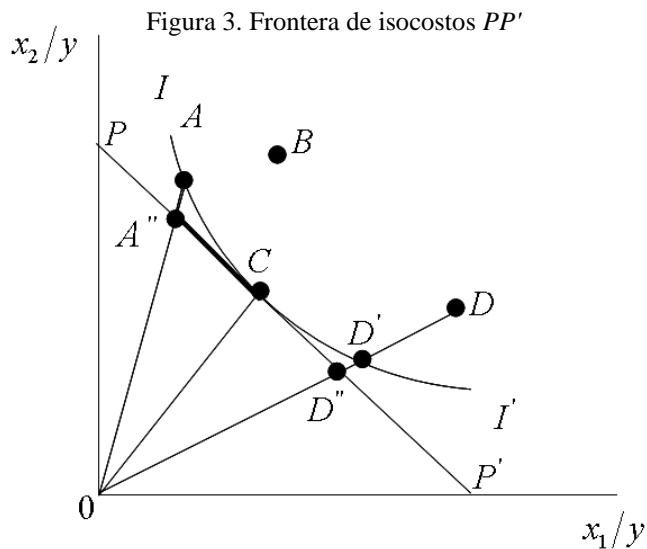
$$\text{Eficiencia Técnica de } B = ETB = \frac{OB'}{OB} \quad (\text{Ec. 1})$$

La eficiencia técnica sólo puede tomar valores comprendidos entre cero y uno. Si la unidad evaluada tiene una puntuación cercana a cero, entonces la unidad se encuentra muy lejos de la isocuanta eficiente y, en consecuencia, se trata de una unidad muy ineficiente técnicamente. Lo contrario sucede si la eficiencia técnica está próxima a uno. Finalmente, una eficiencia técnica de uno indica que la unidad se encuentra sobre la isocuanta eficiente, como es el caso de las unidades *A* y *C*.

## 1.2 *Eficiencia de precio (eficiencia asignativa)*

La eficiencia de precio, también denominada eficiencia asignativa, se refiere a la capacidad de la unidad productiva para usar los distintos insumos en proporciones óptimas, dados sus precios relativos. En la *Figura 3* se muestra la línea de isocostos  $PP'$ , donde la pendiente de la curva de isocostos representa la relación entre los precios de los insumos  $x_1$  y  $x_2$ .

Las unidades *A* y *C* presentan eficiencia técnica puesto que operan sobre la isocuanta eficiente; sin embargo, únicamente la unidad *C* es también eficiente en precios, en tanto que la unidad *A* debería reducir los costos totales en la distancia  $AA''$  o alternativamente en la proporción  $[1 - \frac{OA''}{OA}] * 100$  para ser eficiente en precio.



Fuente: V. Coll y O. Blasco

La eficiencia de precio se obtiene de la relación entre la longitud de la línea desde el origen hasta el punto proyectado sobre la curva de isocostos eficiente para la unidad considerada y la longitud de la línea que une el origen al punto proyectado sobre la isocuanta eficiente de la unidad evaluada. Para la unidad  $A$  se tiene que la eficiencia de precio es:

$$\text{Eficiencia de precio} = EPA = \frac{OA''}{OA} \quad (\text{Ec. 2})$$

La eficiencia de precio solo puede tomar valores comprendidos entre cero y uno, de manera que si la puntuación para la eficiencia de precio es distinta de uno se dice que la unidad considerada es ineficiente en precios [2].

### 1.3 Eficiencia global o económica

La eficiencia global, también llamada eficiencia económica, se obtiene mediante el cociente entre la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto proyectado sobre la

curva de isocostos eficiente y la longitud de la línea que va desde el origen hasta el punto que representa a la unidad considerada [3].

La eficiencia global de la unidad  $D$  es:

$$\text{Eficiencia global} = EGD = \frac{OD''}{OD} \quad (\text{Ec. 3})$$

Farrell, en 1957, descompuso la eficiencia global de la siguiente forma:

$$EGD = \frac{OD''}{OD} = \frac{OD'}{OD} \cdot \frac{OD''}{OD'} \quad (\text{Ec. 4})$$

La eficiencia global ( $EG$ ) es igual al producto de la eficiencia técnica ( $ET$ ),  $\frac{OD'}{OD}$  y la eficiencia de precios  $\frac{OD''}{OD'}$  y su valor está comprendido entre cero y uno. En la *Figura 3*, sólo la unidad  $C$  presenta eficiencia técnica y eficiencia de precio siendo, en consecuencia, la única unidad eficiente globalmente [4].

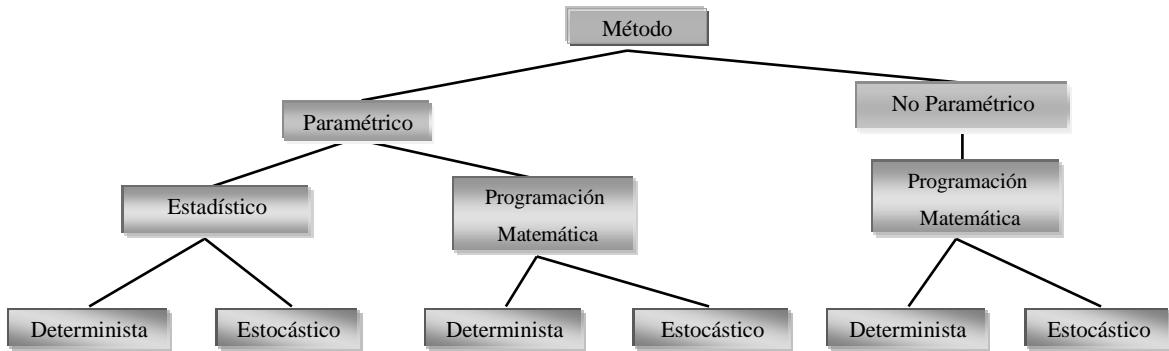
#### **1.4 Técnicas de estimación de la eficiencia**

Las técnicas de estimación de la eficiencia se agrupan básicamente en dos bloques: los modelos que utilizan aproximaciones paramétricas y aquellos que determinan la función de producción a partir de los datos de una muestra representativa, sin suponer ninguna relación funcional entre los insumos y productos, por lo que no se emplean parámetros.

Las aproximaciones de frontera paramétricas (determinística y estocástica) exigen especificar *a priori* una forma funcional del tipo Cobb-Douglas. Los métodos de frontera no paramétricos, por ejemplo el Análisis Envolvente de Datos (DEA) y el método conocido como Libre Disposición de la Envolvente, no exigen especificar una frontera de producción, sino un grupo de propiedades formales que debe satisfacer el conjunto de producción. La *Figura 4* muestra

la clasificación de los métodos para estimar la eficiencia mediante aproximaciones paramétricas o no paramétricas.

Figura 4. Métodos para estimar la eficiencia.



Fuente: V. Coll y O. Blasco

Los modelos paramétricos utilizan una forma funcional predeterminada con parámetros constantes para construir una función de producción (relaciona el nivel de productos obtenidos, dado un nivel de insumos) que posteriormente estiman mediante técnicas econométricas, excepto en algunos casos particulares en donde se emplea la programación matemática para generar la frontera de producción.

Dentro de los modelos que siguen esta aproximación paramétrica, se puede hacer otra distinción en función de su carácter determinista o estocástico. Los modelos deterministas atribuyen toda la desviación de la frontera a la ineficiencia técnica. Por su parte, las fronteras estocásticas consideran que las unidades evaluadas pueden verse afectadas por diversos factores al margen de la propia ineficiencia del productor.

Los métodos de aproximación no paramétricas, no requieren la imposición de una forma determinada a la función de producción, siendo suficiente con la definición de un conjunto de propiedades formales que debe satisfacer el conjunto de posibilidades de producción. Su carácter no paramétrico hace que las variables incluidas en el análisis no posean propiedades estadísticas. La técnica empleada para la estimación de la frontera de producción, a través de

estos métodos, es la programación matemática, siendo posible distinguir dos técnicas alternativas: el Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis, DEA) y la técnica conocida como Libre Disposición de la Envolvente (Free Disposal Hull, FDH). Ambas asumen que existe libre disponibilidad de insumos y productos, pero se diferencian en la convexidad de la frontera de producción.

En este trabajo de tesis se seguirá un modelo de aproximación no paramétrica, empleando la técnica de Análisis Envolvente de Datos para medir la eficiencia técnica en modelos orientados a insumos y a productos, ambos con rendimientos constantes a escala (DEA-CCR).

## **Capítulo II ESTIMACIÓN DE LA FRONTERA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS**

### ***2.1 Análisis Envolvente de Datos (DEA)***

El Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis, DEA) es una herramienta de investigación de operaciones (que recurre a la programación matemática) desarrollada específicamente para medir la eficiencia relativa de un conjunto de unidades organizacionales homogéneas, conocidas como unidades tomadoras de decisión (Decision Market Unit, DMU).

Esta técnica utiliza la información (insumos y productos) de cada unidad analizada para crear la frontera eficiente basada en el criterio de Pareto [5]. De este modo, primero se construye la frontera de producción empírica y después se evalúa la eficiencia de cada unidad que no pertenezca a la frontera de eficiencia.

En cuanto al proceso de evaluación, se considera que una unidad productiva es eficiente cuando pertenece a la frontera de producción. Para las unidades que no están dentro de la frontera de producción, lo ideal es comparar cada unidad no eficiente con aquélla que lo sea y, a la vez, tenga una técnica de producción similar; es decir, que utilice insumos similares para producir salidas parecidas.

Un punto que debe quedar claro para el caso de estudio es que a través de la técnica DEA se llevará a cabo una comparación respecto a un punto de referencia. Por ello, el nivel de eficiencia estimado corresponde a la situación de un organismo operador de agua en relación a los demás, es decir, se mide la eficiencia relativa de un organismo con respecto a las demás analizados.

Dada la información disponible, se evaluará la eficiencia técnica. Por definición, un organismo operador de agua potable, visto como un productor de bienes y servicios, es eficiente cuando para un determinado nivel de producción, no se puede reducir la cantidad de insumos utilizados sin reducir el nivel producido.

## ***2.2 Caracterización de los modelos DEA***

Los modelos DEA pueden ser clasificados, en función de:

- a) El tipo de medida de eficiencia que proporcionan, modelos radiales [6-7] y no radiales [8-9].
- b) La orientación del modelo: orientado a insumos; orientado a productos y orientado a insumos-productos.
- c) La tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la tecnología de producción, entendida como los procedimientos técnicos en que los factores productivos son combinados para obtener un conjunto de productos, de tal forma que esa combinación de factores puede caracterizarse por la existencia de rendimientos a escala: constantes o variables a escala.

### ***2.2.1 Orientación del modelo***

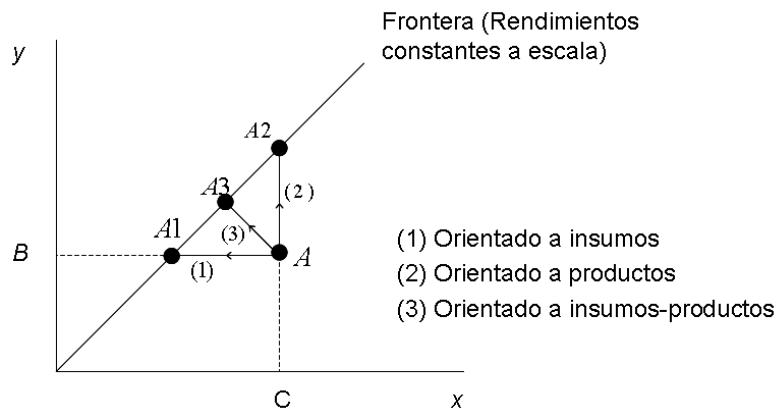
- a. *Modelo orientado a insumos:* Se busca, dado el nivel de productos, la máxima reducción proporcional en el vector de insumos, mientras se permanece en la frontera de posibilidades de producción.
- b. *Modelo orientado a productos:* Se busca, dado el nivel de insumos, el máximo incremento proporcional de los productos, permaneciendo dentro de la frontera de posibilidades de producción. En este sentido, una unidad no puede ser caracterizada como eficiente si es posible incrementar cualquier producto sin incrementar ningún insumo y sin disminuir ningún otro producto.

## 2.2.2 Tipología de los rendimientos constantes a escala

Teniendo en cuenta las orientaciones definidas, una unidad será considerada eficiente si, y solo si, no es posible incrementar las cantidades de productos manteniendo fijas las cantidades de insumos utilizadas, o si no es posible disminuir las cantidades de insumos empleadas sin alterar las cantidades de productos obtenidas.

La *Figura 5* representa el supuesto de rendimientos constantes a escala, para el caso de un único insumo y un único producto, en ella puede observarse cómo la unidad *A* es ineficiente técnicamente dado que se sitúa por debajo de la frontera de producción.

Figura 5. Frontera con rendimientos constantes a escala [3].



Fuente: V. Coll y O. Blasco

Se observa que bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala, las medidas de eficiencia orientadas a insumos o productos coinciden. Además, cabe la posibilidad de una tercera opción correspondiente a los denominados modelos no orientados (también llamados orientados a insumos-productos), en los que tanto los insumos como los productos son controlables y buscan simultáneamente la reducción de insumos y la expansión de productos equiproporcional.

## **2.3 Ventajas y desventajas del Análisis DEA**

El modelo DEA presenta una serie de ventajas que lo han convertido, en relativamente poco tiempo, en una técnica muy utilizada.

Las ventajas más importantes de la técnica DEA son las siguientes [10]:

1. Caracteriza cada una de las unidades mediante una única puntuación de eficiencia relativa.
2. Al proyectar cada unidad ineficiente sobre la envolvente eficiente, destaca áreas de mejora para cada unidad.
3. Capacidad para manejar situaciones de múltiples insumos y salidas expresados en distintas unidades de medida [11].
4. No supone ninguna forma funcional entre el nivel de insumos y el nivel de productos (se suponen que todos los insumos son utilizados conjuntamente para generar un conjunto de productos) [12].
5. No supone una distribución de la ineficiencia [13], sino que determina la frontera de mejor práctica e identifica las unidades ineficientes, de tal forma que cada una de ellas es comparada con una unidad eficiente o combinación de unidades eficientes. Consecuentemente, el DEA facilita la identificación de las fuentes y cantidades de ineficiencia permitiendo establecer un plan para la unidad ineficiente.
6. Optimiza la medida de la eficiencia técnica de cada unidad en relación con las otras unidades.

Desventajas que presenta la técnica DEA:

1. Una de las mayores críticas recibidas es que se trata de una aproximación determinista y no tiene en cuenta influencias sobre el proceso productivo de carácter aleatorio, por lo que se genera incertidumbre, errores de medida o introducción incorrecta de datos [11].
2. Si la incertidumbre está presente, los resultados pueden ser erróneos y conducir a que una unidad aparezca falsamente como eficiente
3. Si hay omisión de insumos y productos importantes puede redundar en resultados sesgados.

## Capítulo III MODELO DEA-CCR

### 3.1 Introducción

Los modelos DEA se distinguen, básicamente, por la naturaleza de la medida de eficiencia, la orientación del modelo para calcularla y la tipología de los rendimientos a escala que caracterizan la frontera eficiente.

El modelo DEA-CCR, es denominado así por haber sido desarrollado por Charnes, Cooper y Rhodes (1978) [14]. Este modelo proporciona medidas de eficiencia orientadas a insumos o productos y supone convexidad, eliminación de insumos y productos y rendimientos constantes a escala.

El modelo DEA-CCR puede escribirse de tres formas distintas: fraccional (cociente), multiplicativa y envolvente. En los siguientes apartados se describe cada una de éstas formas, desde el punto de vista de un modelo orientado a insumos, así como distintos métodos de solución que pueden ser utilizados para obtener el resultado óptimo del modelo en forma envolvente.

### 3.2 Modelo DEA-CCR orientado a insumos en forma fraccional

En DEA, la eficiencia técnica (relativa) de cada una de las unidades se define como el cociente entre la suma ponderada de los productos ( $\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}$ ) y la suma ponderada de los insumos ( $\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}$ ).

El modelo DEA-CCR orientado a insumos expresado en términos de cociente sería:

$$\text{Max } h_o = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{ro}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}}$$

*Sujeto a:*

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

*(Modelo 1)*

Donde:

- Se consideran  $n$  unidades ( $j=1, 2, \dots, n$ ), cada una de las cuales utiliza los mismos insumos (en diferentes cantidades) para obtener los mismos productos (en diferentes cantidades).
- $x_{ij}$  ( $x_{ij} \geq 0$ ) representa las cantidades del insumo  $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) consumidos por la  $j$ -ésima unidad.
- $x_{io}$  representa la cantidad de insumo  $i$  consumida por la unidad que es evaluada, unidad  $o$ .

- $y_{rj}$  ( $y_{rj} \geq 0$ ) representa las cantidades observadas de producto  $r$  ( $r=1,2,\dots, s$ ) producidos por la  $j$ -ésima unidad.
- $y_{r0}$  representa la cantidad de producto obtenido por la unidad que es evaluada, unidad  $0$ .
- $u_r$  ( $r=1,2,\dots,s$ ) y  $v_i$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) representan los pesos (o multiplicadores) de los productos e insumos respectivamente.

El *modelo 1* pretende obtener el conjunto óptimo de pesos [1] que maximice la eficiencia relativa,  $h_0$  de la unidad  $0$  definida como el cociente entre la suma de productos y la suma de insumos, sujeto a la restricción de que ninguna unidad puede tener una puntuación de eficiencia mayor que uno, usando estos mismos pesos. Los pesos serán diferentes entre las distintas unidades.

Si se obtiene la solución óptima,  $h_0^* = 1$ , esto indica que la unidad que está siendo evaluada es eficiente en relación con las otras unidades. Si  $h_0 < 1$ , la unidad será ineficiente.

Al poco tiempo de publicar su trabajo, Charnes, Cooper y Rhodes en 1979, sustituyen la condición de no-negatividad ( $u_r, v_i \geq 0$ ) del modelo anterior, por una condición de positividad estricta ( $u_r, v_i \geq \varepsilon$ ), donde  $\varepsilon$  es un número muy pequeño, para evitar que una unidad, pese a presentar  $h_0^* = 1$ , sea incorrectamente caracterizada como eficiente al obtener en la solución óptima algún peso  $u_r$  (o  $v_i$ ) con valor cero [14]. Por lo que el modelo fraccional queda de la siguiente forma:

$$\text{Max } h_o = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{io}}$$

*Sujeto a:*

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon$$

(Modelo 2)

Debe tenerse en cuenta que los valores de los pesos óptimos  $(u_r^*, v_i^*)$  diferirán de una unidad a otra, puesto que el *Modelo 2* debe ser resuelto para cada una de las  $n$  unidades, cada una de las cuales busca, a su vez, los mejores pesos que maximicen su eficiencia.

### 3.3 *Modelo DEA-CCR orientado a insumos en forma multiplicativa*

El *Modelo 2* del DEA-CCR orientado a insumos puede ser linealizado [15] siguiendo la transformación lineal de Charnes y Cooper, que selecciona la solución  $(\mu, \delta)$  para el término  $\sum_{i=1}^m \delta_i x_{io}$ , realizando dicho cambio de variable se tiene:

$$\mu_r = t \cdot u_r \quad (Ec. 5)$$

$$\delta_i = t \cdot v_i \quad (Ec. 6)$$

$$t = \frac{1}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (Ec. 7)$$

$$t > 0$$

Sustituyendo en el *Modelo 2* se obtiene el siguiente modelo equivalente conocido como modelo en forma multiplicativa.

$$Max_{\mu, \delta} W_o = \sum_{r=1}^s \mu_r y_{ro}$$

*Sujeto a:*

$$(\sum_{i=1}^m \delta_i x_{io}) = 1$$

$$\sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m \delta_i x_{ij} \leq 0$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

$$\mu_r, \delta_i \geq \varepsilon$$

(*Modelo 3*)

El insumo virtual se normalizó a la unidad  $\sum_{i=1}^m \delta_i x_{io} = 1$ , lo cual se conoce como restricción de normalización [16-17].

La solución del problema dado por el *Modelo 3* determinará los valores óptimos de los pesos  $\mu_r$  y  $\delta_i$  esto es  $\mu_r^*$  y  $\delta_i^*$ . Debe tenerse en cuenta que cualquier múltiplo de estos valores óptimos será óptimo en el *Modelo 1*.

El *Modelo 3* puede expresarse matricialmente como:

$$\text{Max}_{\mu, \delta} \quad W_o = \mu^t y_o$$

Sujeto a:

$$\delta^t x_o = 1$$

$$\mu^t y - \delta^t x \leq 0$$

$$\mu^t, \delta^t \geq I\varepsilon$$

(*Modelo 4*)

Donde:

- $y$  es una matriz de productos de tamaño  $(s \times n)$ :  $y = \begin{matrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{s1} & y_{s2} & \dots & y_{sn} \end{matrix}$
- $y_o$  representa el vector de productos de la unidad que está siendo evaluada.

- $x$  es una matriz de insumos de tamaño  $(m \times n)$ :  $x = \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{matrix}$
- $x_o$  representa el vector insumos de la unidad que está siendo evaluada.
- $\mu$  es el vector  $(s \times 1)$  de pesos de los productos y  $\delta$  es el vector  $(m \times 1)$  de pesos de los insumos.

### 3.3.1 Caracterización de la eficiencia

La unidad<sub>0</sub> será calificada como eficiente si  $W_o^* = 1$  y existe al menos un valor óptimo  $(\mu^*, \delta^*)$  con  $\mu^* > 0$  y  $\delta^* > 0$ .

Si la unidad<sub>0</sub> presenta para los valores  $(\mu, \delta)$  una puntuación de eficiencia  $W_o^* < 1$ , existirá al menos una unidad que satisfaga la restricción  $\sum_{r=1}^s \mu_r y_{rj} = \sum_{i=1}^m \delta_i x_{ij}$  para esos mismos  $(\mu^*, \delta^*)$ .

El conjunto de unidades que satisfacen dicha restricción, y que serán eficientes, constituyen el conjunto de referencia de la unidad evaluada, siendo la existencia de estas unidades eficientes las que fuerzan a la unidad  $o$  a ser ineficiente.

### 3.3.2 Significado de los pesos

El modelo DEA hace referencia a los insumos virtuales, lo cual se refiere a la suma ponderada de los insumos  $\sum_{i=1}^m \delta_i x_{io}$ . En tanto que los productos virtuales, hacen referencia a la sumatoria de productos ponderados  $\sum_{r=1}^s \mu_r y_{ro}$ . En la forma fraccional del *Modelo 1* y *Modelo 2*, la eficiencia suele definirse como el cociente entre el producto virtual y el insumo virtual.

En el *Modelo 4* el insumo virtual se encuentra normalizado a la unidad ( $\sum_{i=1}^m \delta_i x_{io} = 1$ ) mientras que los productos virtuales son igual a la puntuación de eficiencia ( $\sum_{r=1}^s \mu_r y_{ro} = W_o$ ) para la unidad evaluada. Los valores de los insumos y productos virtuales expresan la importancia que una unidad atribuye a determinados insumos y productos, con el objeto de obtener su máxima puntuación de eficiencia.

Es posible determinar la importancia (contribución) de cada insumo ( $\delta_i^* x_{io}$ ) respecto del total ( $\sum_{i=1}^m \delta_i^* x_{io} = 1$ ); así como la contribución de cada producto ( $\mu_r^* y_{ro}$ ) a la puntuación de eficiencia ( $\sum_{r=1}^s \mu_r^* y_{ro} = W_o^*$ ). Estos resultados proporcionan una indicación de la medida en que las variables de insumo y producto han sido usadas en la determinación de la eficiencia, jugando un papel como medida de la sensibilidad de las puntuaciones de eficiencia [18].

### 3.4 Modelo DEA - CCR orientado a insumos en forma envolvente

Para todo programa lineal original (programa primal) existe otro programa lineal asociado, denominado programa dual, que puede ser utilizado para determinar la solución del problema primal.

Existe una variable dual por cada restricción primal y una restricción dual por cada variable primal. El Modelo DEA-CCR orientado a insumos en su forma envolvente, está dado por el Modelo 5 [4].

Tabla 1. Transformación del modelo DEA-CCR orientado a insumos

Restricción primal	Variable dual
$\delta^t x_o = 1$	$\theta$
$\mu^t y - \delta^t x \leq 0$	$\lambda \geq 0$

Fuente: Cooper, Seiford y Tone (2000).

Tabla 2. Transformación del modelo DEA-CCR orientado a productos

Restricción dual	Variable primal
$Y\lambda \geq Y_o$	$\delta^t \geq 0$
$\theta x_o - x\lambda \geq 0$	$\mu^t \geq 0$

Fuente: Cooper, Seiford y Tone (2000).

La variable dual  $\theta$  se asocia con la restricción que normaliza el insumo virtual.

Cuando se habla del Modelo DEA-CCR es frecuente referirse al modelo en forma envolvente.

$$\text{Min}_{\theta, \lambda} \ Z_o = \theta$$

Sujeto a:

$$y\lambda \geq y_o$$

$$\theta x_o \geq y_o$$

$$\lambda \geq 0$$

(Modelo 5)

Donde:

- $\lambda$  es el vector de pesos de tamaño  $(n \times 1)$ :  $\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{pmatrix}$
- $\theta$  denota la puntuación de la eficiencia técnica de la unidad

El problema dado por el *Modelo 5* debe ser resuelto para cada una de las unidades objeto de análisis.

En el Modelo DEA-CCR se realiza un cambio a forma dual, ya que el programa lineal DEA-CCR primal orientado a insumos (*Modelo 3* y *4*) están definidos por un número de restricciones igual a  $n+1$ ; sin embargo, el programa lineal DEA-CCR dual orientado a insumos (*Modelo 5*) está sujeto a  $s+m$  restricciones. Por lo tanto, el número de unidades con las que se trabaja, suele ser mucho mayor que el número total de insumos y productos.

### 3.4.1 Caracterización de la eficiencia y valores de holgura

Si la solución óptima del problema dado por el *Modelo 5* resulta ser  $\theta^* = 1$ , entonces la unidad que está siendo evaluada es eficiente, en relación con las otras unidades; es decir, no es

possible encontrar alguna unidad que obtenga el producto de la unidad<sub>0</sub> utilizando menos factores.

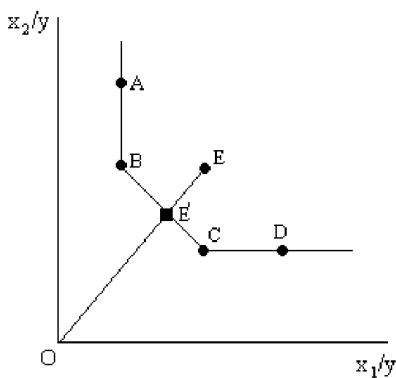
Si la eficiencia de la unidad<sub>0</sub> es  $\theta^* < 1$ , es posible obtener una combinación de unidades a partir de los valores  $x_j^*$  en el *Modelo 5* que funcione mejor que la unidad que ha sido evaluada.

El problema planteado en el *Modelo 5* es resuelto en una etapa única, de forma que las variables de holgura  $s_r^+$  (variable de holgura de productos) y  $s_i^-$  (variable de holgura de insumos) son obtenidas de forma residual. Por tanto, es posible que no se satisfaga la condición de eficiencia de Pareto-Koopmans, en la cual una unidad es eficiente, si y solo si  $\theta^* = 1$  y todas las holguras son cero, en caso contrario la unidad es calificada como ineficiente [3].

Si en el valor óptimo resultara que  $s_r^{+*} > 0$  esto significa que sería posible incrementar el producto  $r$  de la unidad<sub>0</sub> en la cantidad dada por esa holgura, con lo que la unidad<sub>0</sub> debería producir el producto  $r$  en la cantidad  $(y_r + s_r^{+*})$  en lugar de  $y_r$ .

Si se obtuviera una holgura del insumo  $i$ , con  $\theta^* > 0$  esto indicaría que el insumo  $i$  de la unidad evaluada puede ser reducido en la cantidad dada por  $s_i^{-*}$ , de forma que ahora la cantidad de  $i$  usada es  $(x_i - s_i^{-*})$ . La *Figura 6* refleja la situación descrita en el párrafo anterior.

Figura 6. Consideración de dos insumos y un producto.



Fuente: V. Coll y O. Blasco

Las unidades  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son eficientes técnicamente, según la condición de eficiencia de Farrell, puesto que su puntuación de eficiencia  $\theta^*$  es igual a uno, mientras que la unidad  $E$  es ineficiente ( $\theta^* < 1$ ). Aunque, sólo las unidades  $B$  y  $C$  son eficientes técnicamente según la condición de Pareto-Koopmans, ya que tanto la unidad  $A$  como la unidad  $D$  presentan holguras de insumo; la primera en el insumo  $x_2$  y la segunda en el insumo  $x_1$ , que indica cuánto deben reducir  $A$  y  $B$  el consumo de dichos insumos.

### 3.4.2 “Benchmarking” en DEA: fijación de referencias para la mejora

En el modelo DEA empleado puede obtenerse, para toda unidad ineficiente, un punto de proyección sobre la frontera eficiente que represente a una unidad (real o virtual) eficiente que, en un modelo orientado a insumos, consuma como mucho, la proporción  $\theta$  de los insumos de la unidad  $0$  y produzca, al menos, la misma cantidad de producto.

Las unidades implicadas en la construcción de la referida unidad (real o ficticia) eficiente constituirán el conjunto de referencia de la unidad evaluada y calificada como ineficiente.

Partiendo del *Modelo 5*, el punto de proyección, que es una combinación lineal de los puntos observados, está dado por  $(\hat{x}_0 = \lambda^* x, \hat{y}_0 = \lambda^* y)$  o  $\left( \hat{x}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j^* x_j, \hat{y}_0 = \sum_{j=1}^n \lambda_j^* y_j \right)$ .

Podemos observar que en la *Figura 5*, la unidad  $E$  es claramente ineficiente. En este caso, el punto de proyección sobre la frontera eficiente determinará la dirección de mejora más accesible a emprender por la unidad  $E$ . La proyección, la unidad ficticia o virtual  $E'$ , resultará de una combinación entre las unidades  $B$  y  $C$  en proporciones dadas por los valores óptimos de las intensidades  $\lambda_j^*$  ( $j = B, C$ ) obtenidos a partir de la resolución, para la unidad  $E$ , del problema del *Modelo 5*.

Las coordenadas de la proyección sobre la frontera eficiente representarán los valores de insumos y productos objetivos para la unidad ineficiente; es decir, los niveles de insumo y productos que la convertirían en eficiente en caso de alcanzarlos. La comparación entre los

valores observados para la unidad evaluada y los valores objetivos fijados, permite establecer el valor de la reducción de insumos y/o incremento de productos que la unidad debe tratar de promover para convertirse en eficiente.

Por otra parte, si  $x_o$  representa el vector de insumos de la unidad que está siendo evaluada y  $\theta$  su puntuación de eficiencia técnica, entonces  $(1-\theta)x_o$  indicará la cantidad en que deberían reducirse proporcionalmente todos los insumos de la unidad para que fuese eficiente. La diferencia entre los valores de insumo objetivo y la reducción radial, indicará la cuantía en que adicionalmente la unidad debe reducir sus insumos como consecuencia del movimiento debido a la holgura. Por tanto, la mejora potencial de una unidad puede ser descompuesta en mejora proporcional, derivada de la reducción radial, y mejora de holgura, derivada de la reducción debido a la holgura.

### **3.5 Método de dos etapas del Modelo DEA-CCR orientado a insumos**

El *Modelo 5* es resuelto en una etapa única y busca para la unidad evaluada, la máxima reducción de insumos, obteniendo los valores de la holgura de manera residual; sin embargo, mediante este método de solución no siempre se identifican todas las holguras [4].

Para determinar todas las posibles holguras en los insumos y productos se hace la solución de una segunda etapa, cuyo objetivo es maximizar la suma de las holguras de insumos y productos, manteniendo el valor óptimo de  $\theta$  logrado en la primera etapa. Por tanto, este método implica la solución de dos problemas para cada unidad.

*Primera etapa:* Determinar el valor óptimo de  $\theta$ ; es decir, la máxima reducción proporcional que tendría que producirse en los insumos de la unidad objeto de estudio.

$$\text{Min}_{\theta} \ \theta$$

*Sujeto a:*

$$y\lambda \geq y_0$$

$$x\lambda \leq \theta x_0$$

$$\lambda \geq 0$$

*(Modelo 6)*

*Segunda etapa:* A partir del óptimo  $\theta^*$  obtenido en la Etapa 1, se ajustan los insumos  $(\theta^* x_0)$  y se procede a maximizar las holguras de insumos y productos para mover el punto proyectado en la Etapa 1 [6], que satisface la condición de eficiencia, a un punto sobre la envolvente eficiente que satisface la condición de optimización de Pareto-Koopmans.

$$\text{Max}_{\lambda, s^+, s^-} Is^+ + Is^-$$

*Sujeto a:*

$$x\lambda = \theta^* x_0 - s^-$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

*(Modelo 7)*

Donde:

- $Is^+$  es el vector de holguras de productos,  $Is^+ = \sum_{r=1}^s s_r^+$ .
- $Is^-$  es el vector de holguras de insumos,  $Is^- = \sum_{i=1}^m s_i^-$ .

Los *Modelos 6* y *7* se pueden formular en uno solo:

$$\text{Min}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} z_0 = \theta - \varepsilon(I s^+ + I s^-)$$

*Sujeto a:*

$$\lambda y = y_0 + s^+$$

$$\lambda x = \theta x_0 - s^-$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

(*Modelo 8*)

### 3.6 *Modelo DEA–CCR orientado a productos*

#### 3.6.1 *Introducción*

Hasta el momento solo se ha tratado el modelo DEA–CCR orientado a insumos. Un cambio de modelo prácticamente equivale a invertir el cociente entre el producto y el insumo. Así, el *Modelo DEA–CCR orientado a productos* en forma de cociente está dado por [19]:

$$\text{Min}_{u, v} \text{ ho} = \frac{v^t x_o}{u^t y_o}$$

*Sujeto a:*

$$\frac{v^t x}{u^t y} \geq 1$$

$$u^t, v^t \geq I\varepsilon$$

(*Modelo 9*)

El modelo anterior puede ser convertido a un problema lineal de forma multiplicativa, usando la transformación de Charnes-Cooper<sup>1</sup>:

$$\text{Min}_{u,v} \quad Wo = \delta^t x_o$$

*Sujeto a:*

$$\mu^t y_o = 1$$

$$\delta^t x - \mu^t y \geq 0$$

$$\mu^t, \delta^t \geq I\varepsilon$$

*(Modelo 10)*

### **3.6.2 Método de dos etapas del Modelo DEA–CCR orientado a productos**

En el modelo DEA–CCR orientado a productos, igualmente puede resolverse el modelo mediante dos etapas:

*Primera etapa.* Se determina la puntuación de eficiencia

$$\text{Max} \theta$$

*Sujeto a:*

$$x_o - \lambda x \geq 0$$

$$\theta y_o - \lambda y \leq 0$$

$$\theta \geq 0$$

*(Modelo 11)*

---

<sup>1</sup>El modelo DEA-CCR orientado a producto sigue la misma transformación que el modelo DEA-CCR orientado a insumos

*Segunda Etapa.* Se encuentran las holguras en insumos y productos de acuerdo a la eficiencia calculada.

$$\text{Max}_{\lambda, s^+, s^-} Is^+, Is^-$$

*Sujeto a:*

$$y_o - \lambda y + s^+ = 0$$

$$\lambda x + s^- = x_o$$

$$\lambda, s^+, s^- = x_o$$

(*Modelo 12*)

De la misma forma que se hizo anteriormente, los *Modelos 11 y 12* pueden formularse en uno solo.

$$\text{Max}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} \theta + \varepsilon (Is^+ + Is^-)$$

*Sujeto a:*

$$\theta y_o - \lambda y + s^+ = 0$$

$$\lambda x + s^- = x_o$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

(*Modelo 13*)

Al comparar los *Modelos 10 y 13*, se observa que la diferencia básica es que el modelo orientado a insumos pretende determinar la máxima reducción radial que debería producirse en los insumos de la unidad evaluada, mientras que en el modelo orientado a productos el objetivo es maximizar la cantidad de productos que podrían ser logrados por la unidad evaluada, dado sus niveles de insumos.

La eficiencia del modelo orientado a productos será igual a  $1/\theta^*$ . Los modelos DEA–CCR orientados a insumos y a productos estiman la misma frontera de producción es por ello que se obtiene el mismo conjunto de referencia en ambos modelos [4].

## Capítulo IV DESARROLLO DEL PROGRAMA OpenDEA-1.0

### 4.1 Introducción

Se desarrolló un programa para calcular la eficiencia técnica según el modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos, ambos con rendimientos constantes a escala (*Modelos 14 y 15*). Este programa fue comparado con el programa comercial Frontier Analyst, el cual se describe más adelante. Para el desarrollo del programa OpenDEA-1.0 se utilizaron los siguientes modelos:

### 4.2 *Modelo implementado del DEA-CCR orientado a insumos*

Modelo DEA-CCR orientado a insumos:

$$\text{Max}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} z_0 = -\theta + \varepsilon(I s^+ + I s^-)$$

*Sujeto a:*

$$-\lambda y + s^+ = y_0$$

$$\theta x_0 - \lambda x - s^- = 0$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

(*Modelo 14*)

Se optó por cambiar la función objetivo de *Min* a *Max* para resolver ambos modelos con una sola subrutina. Aplicando este modelo se obtiene la eficiencia técnica, holgura de insumos y productos en un solo paso.

#### **4.3 Modelo implementado del DEA-CCR orientado a productos**

El Modelo DEA-CCR orientado a productos usado es el siguiente:

$$\text{Max}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} \theta + \varepsilon (Is^+ + Is^-)$$

*Sujeto a:*

$$\theta y_o - \lambda y + s^+ = 0$$

$$\lambda x + s^- = x_o$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

*(Modelo 15)*

Aplicando este modelo se obtiene la eficiencia técnica, holgura de insumos y de productos en un solo paso.

#### 4.4 Diagrama de flujo del programa OpenDEA-1.0

El Programa OpenDEA-1.0 sigue los siguientes diagramas de flujo:

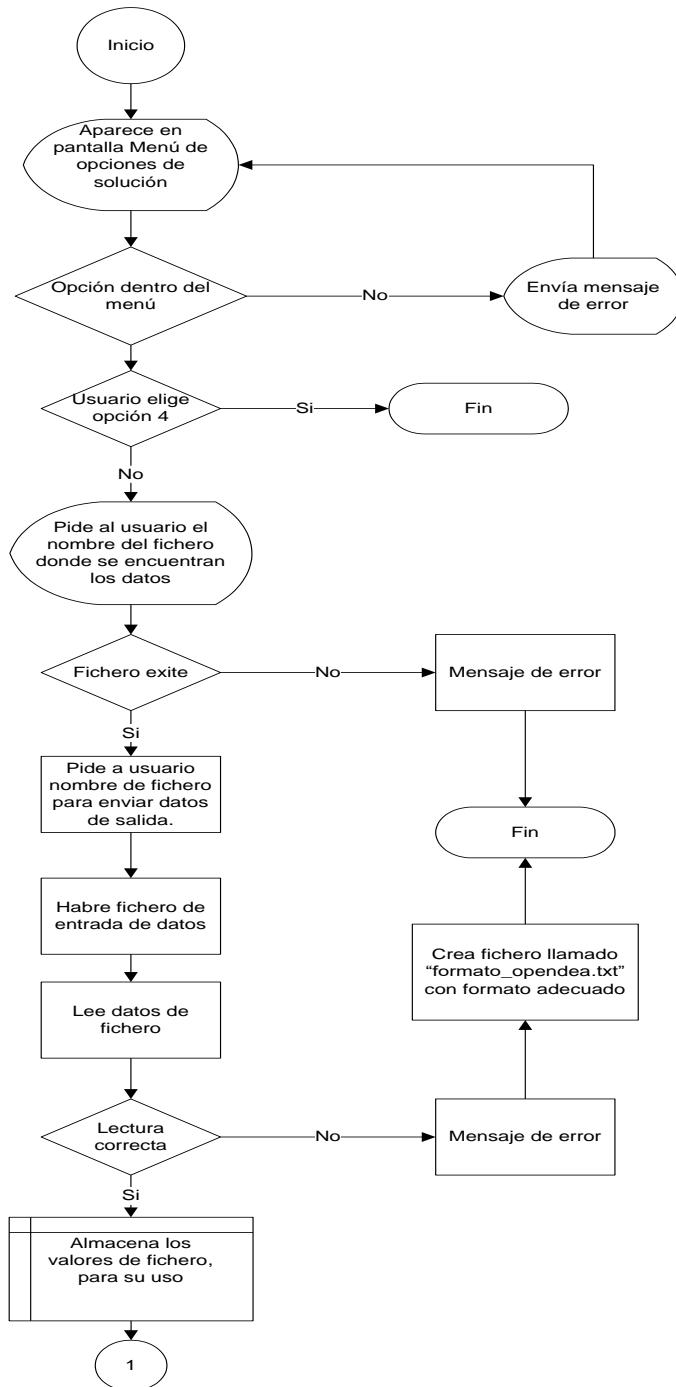


Diagrama de Flujo 1. Opciones del menú del programa OpenDEA-1.0.

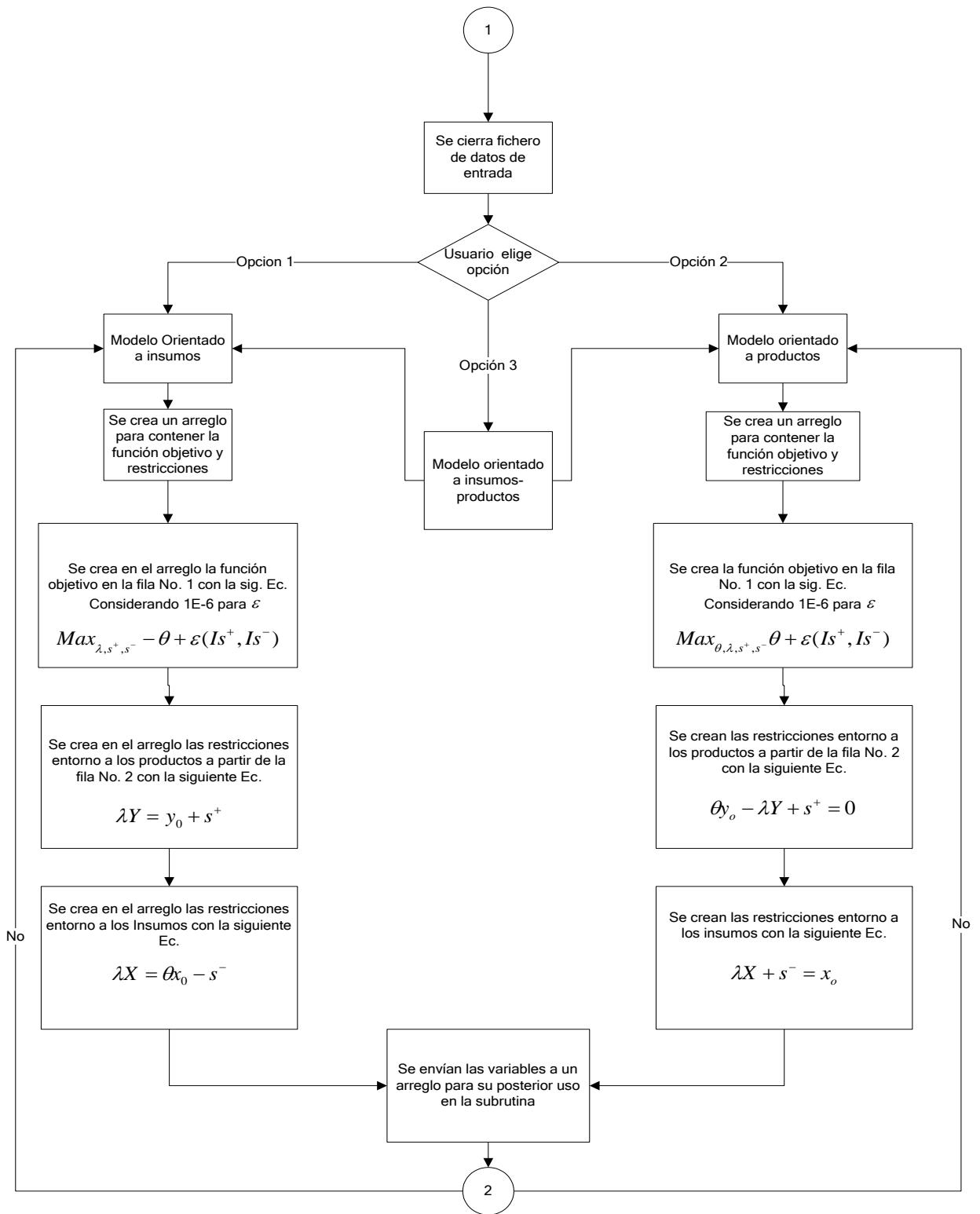


Diagrama de Flujo 2. Modelos DEA implementados en el programa OpenDEA-1.0.

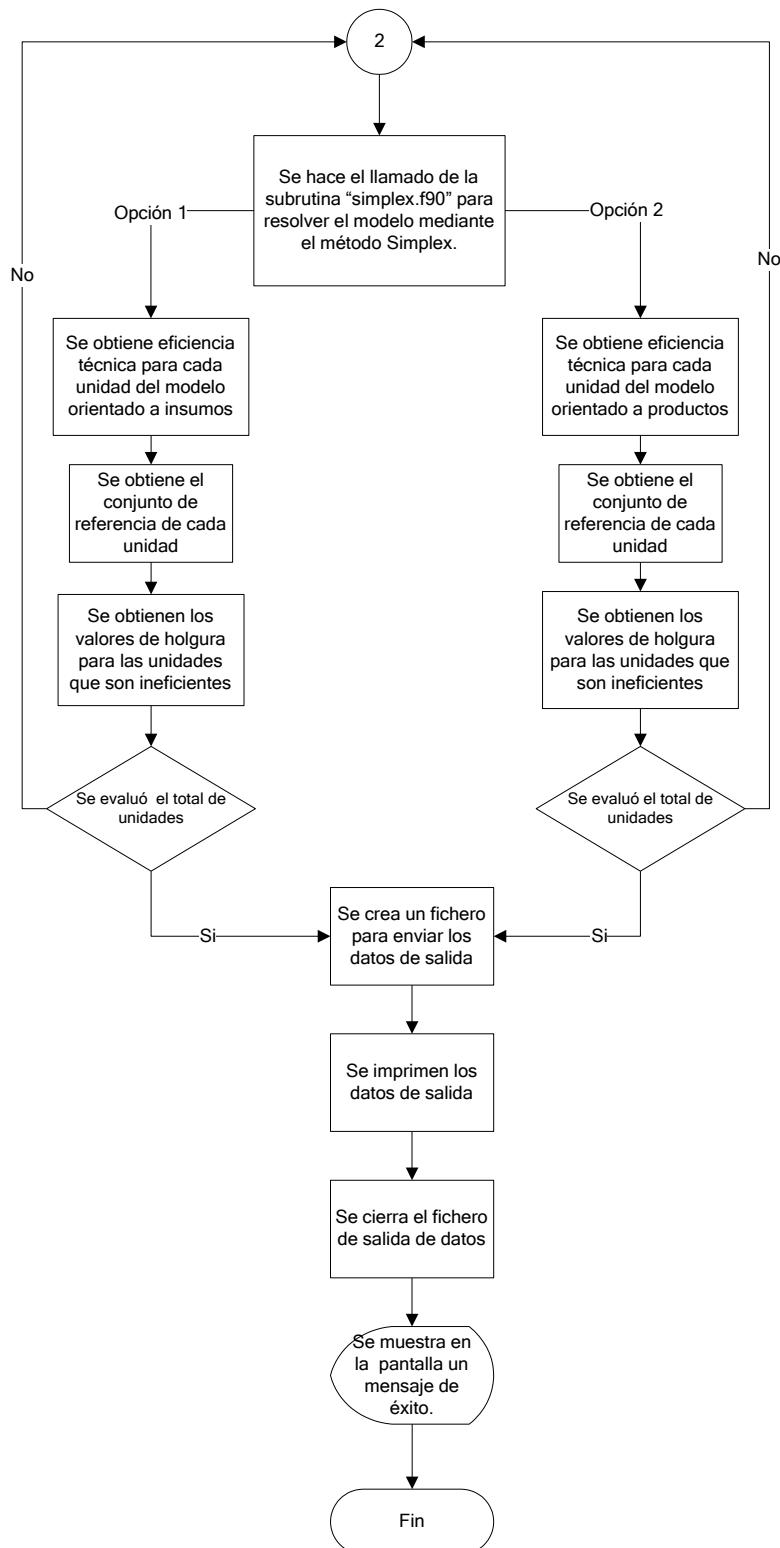


Diagrama de Flujo 3. Finalización del programa OpenDEA-1.0.

Para más detalles del programa OpenDEA-1.0 ver *Anexo*.

#### **4.5 Programa Frontier Analyst**

Para validar los resultados obtenidos con el programa OpenDEA-1.0, el estudio de caso también se realizó con la versión de demostración del programa Frontier Analyst® ([www.banxia.com/demos/fademo2.html](http://www.banxia.com/demos/fademo2.html)) que es desarrollado y comercializado por la empresa Banxia Software Ltd. con sede en Kendal, Inglaterra.

Se eligió Frontier Analyst® porque implementa el Análisis Envolvente de Datos (DEA) y permite desarrollar estudios objetivos y comparativos que van más allá de las mediciones puramente financieras de rendimiento. Las funciones implementadas en el programa son las siguientes, relacionadas principalmente a las ventajas del DEA:

- Identificación de los actores con mayor rendimiento para encontrar los mejores practicantes.
- Identificación de las organizaciones con menor rendimiento.
- Facilita el establecimiento de objetivos realistas y basados en mejoras internas de la empresa.
- Identificación de los puntos potencialmente más eficientes.
- Visualización de la información importante.
- Mejora la información acerca del desarrollo de estrategias.

Frontier Analyst® funciona bajo los entornos Windows 95, 98, 2000, XP o Vista; es decir, el programa tiene un entorno gráfico que hace fácil su uso a través de ventanas y menús con las opciones implementadas. En contraste, el programa OpenDEA-1.0 se ejecuta desde la línea de comandos, ya sea en los sistemas operativos Windows o Linux.

La versión de demostración de Frontier Analyst® es similar a la versión completa, a excepción de lo siguiente: solamente pueden analizarse 14 unidades; los proyectos de demostración son restaurados al cerrarse la sesión; el diseñador de reportes está deshabilitado y algunas de las ventanas no están disponibles. Para usar todas las herramientas se debe comprar una licencia, cuyo precio depende del número de unidades que se desean evaluar.

Se cotizaron las versiones disponibles de Frontier Analyst, la siguiente lista se verificó en el sitio oficial del proveedor del software (<http://www.banxia.com/acatalog/FrontierAnalyst.html>).

Tabla 3. Costo de licencias de Frontier Analyst.

Número de unidades que ofrece evaluar	Precio de licencia <sup>&amp;</sup> (Pesos)
75	6,355.00
250	11,179.00
500	22,439.00
1500	30,480.00
2500	38,523.00
5000	46,566.00
ilimitada	64,259.00

<sup>&</sup>Precios cotizados en Julio de 2010.

# Capítulo V EVALUACIÓN DE ORGANISMOS OPERADORES DE AGUA EN LA REPÚBLICA MEXICANA

## *5.1 Introducción*

El agua es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente. El agua tiene un valor económico, social y ambiental en todos los usos a los que se destina y por tanto su análisis, administración, planificación y en general la gestión integrada a este recurso debe contemplar las relaciones existentes entre economía, sociedad y medio ambiente hidrológico.

El 97.5% del agua en la tierra se encuentra en los océanos y mares de agua salada, únicamente el restante 2.5% es agua dulce. Del total de agua dulce en el mundo, 69% se concentra en los polos y en las cumbres de las montañas más altas y se encuentra en estado sólido.

El 30% del agua dulce mundial, se encuentra en la humedad del suelo y en los acuíferos profundos. Sólo el 1% del agua dulce en el mundo, escurre por las cuencas hidrográficas en forma de arroyos y ríos y se deposita en lagos, lagunas y en otros cuerpos superficiales de agua y en acuíferos. Esta es el agua que se repone regularmente a través del ciclo hidrológico.

El problema del agua en la actualidad es un tema que cada día ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos y en general, de muchos de los habitantes del planeta.

En México, por su clima y sus características geográficas, económicas, sociales y demográficas, se enfrentan problemas y retos de gran dimensión y complejidad para satisfacer sus necesidades de agua y desarrollo de sus potencialidades. Los organismos operadores de agua potable son los responsables de administrar y proporcionar el suministro de agua a la población de los municipios de México, por lo tanto, la evaluación de su desempeño contribuye a establecer políticas sustentables de gestión, de ahí la importancia de este trabajo de tesis.

## 5.2 Selección de los organismos operadores de agua potable en México

En el país existen 2,366 organismos operadores de agua potable, de los cuales 637 atienden a ciudades con más de 20,000 habitantes. Para determinar el desempeño de los organismos, se emplea un sistema de Indicadores de Gestión que permite evaluar aspectos de recursos humanos, técnico-operativos, administrativos, de servicio al cliente y financieros. Está basado en el “Benchmarking”; es decir, a partir de un estándar o punto de referencia determinado, se compara o evalúa un proceso (<http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/caem/culturadelagua/cultura>)

En el caso de estudio se analizaron sólo 14 organismos operadores de agua, ya que son las únicas entidades que disponen de información completa y que han participado activamente dentro de las evaluaciones que realiza el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Tabla 4. Organismos operadores de agua potable analizados en México

Organismos operadores de agua analizados
1. Ensenada
2. Mexicali
3. Hidalgo del Parral
4. Cuauhtémoc
5. Saltillo
6. León
7. Tepeji del Río
8. Puerto Vallarta
9. Monterrey
10. Ciudad Valles
11. Culiacán Rosales
12. Mazatlán
13. Córdoba
14. Fresnillo

Fuente IMTA 2010.

### **5.3 Selección de indicadores de gestión**

El sistema de Indicadores de Gestión que emplea el IMTA para la comparación de los organismos operadores de agua potable contiene las siguientes variables:

Tabla 5. Variables usadas por el IMTA para construir Indicadores de Gestión, 2010.

Tomas con servicio continuo	Eficiencia física
Redes e instalaciones	Eficiencia comercial
Padrón de usuarios	Eficiencia de cobro
Macro medición	Rehabilitación de tubería
Micro medición	Rehabilitación de tomas domiciliarias
Volumen tratado	Presión del suministro del agua en la red
Reclamaciones	Consumo
Usuarios con pago a tiempo	Horas con servicio en zonas de tandeo
Costos entre volumen producido	Usuarios abastecidos con pipas
Empleados por cada mil tomas	Cobertura de agua potable
Empleados dedicados al control de fugas	Relación de trabajo
Dotación	Relación Inversión - PIB
	Eficiencia Global

Fuente: Creación propia

Para analizar el desempeño de los organismos operadores de agua en México, es necesario identificar las principales variables que describan el proceso de distribución de agua. Una consideración de índole práctica es la disponibilidad de la información, dado que la mayoría de los organismos operadores no reportan la información, sólo se consideran aquellos que cuentan con la información completa.

#### **5.3.1 Selección de insumos en los organismos operadores de agua**

El insumo es un bien consumible utilizado en el proceso productivo de otro bien. Los insumos usualmente son denominados factores de la producción o recursos productivos. Existen múltiples formas de clasificarlos, básicamente se dividen en dos: trabajo (o mano de

obra) y capital “físico o productivo” (maquinaria, equipo, instalaciones, tecnología en general). La *Tabla 6* presenta las variables de insumo que se eligieron para la evaluación de los sistemas de distribución de agua potable.

Tabla 6. Variables de insumo elegidas para los organismos operadores de agua de México.

Variable	Insumos	Descripción	Unidad de medida
$x_1$	Costos entre volumen producido	Costos generales del volumen producido	$$/m^3$
$x_2$	Empleados por cada mil tomas	Empleados que laboran en el organismo operador, incluyen empleados por honorarios, sindicalizados y temporales	No. Empleados /1000 tomas
$x_3$	Empleados dedicados al control de fugas	Empleados dedicados al control de fugas en redes de distribución,	No. Empleados
$x_4$	Relación Inversión - PIB	Porcentaje de inversión que realiza el organismo operador con respecto al producto interno bruto de la ciudad.	%

Fuente: Creación propia

### 5.3.2 Selección de productos en los organismos operadores de agua

Para los productos de los sistemas de distribución de agua potable se consideraran las siguientes variables:

Tabla 7. Variables de producto elegidas para los organismos operadores de agua de México.

Variable	Producto	Descripción	Unidad de medida
$y_1$	Cobertura de agua potable	Porcentaje de la población que cuenta con servicio de agua potable en la ciudad	%
$y_2$	Consumo	Consumo real de agua sin tomar en cuenta las pérdidas por fugas en la red y tomas domiciliarias	l/d/h
$y_3$	Horas con servicio en zonas de tandeo	Horas que los usuarios con servicio tandeados reciben agua	Horas
$y_4$	Rehabilitación de tomas domiciliarias	capacidad del Organismo operador de mantener actualizada la infraestructura de tomas domiciliarias	%
$y_5$	Dotación	Cantidad asignada de agua según la extracción total	l/d/h
$y_6$	Tomas con servicio continuo	Continuidad en el servicio de agua.	%
$y_7$	Padrón de usuarios	Registro confiable de usuarios.	%

Fuente: Creación propia

## ***5.4 Consideraciones en la muestra de organismos operadores***

- El número de organismos evaluados debe ser mayor o igual que el doble del total de variables de insumos y productos, de lo contrario algunas unidades ineficientes, pueden ser calificadas como eficientes.
- No se deben introducir valores menores o iguales a cero, de lo contrario, las unidades ineficientes estarán siendo calificadas como eficientes.
- Eliminar variables que se asocian demasiado con otras.
- Las unidades evaluadas deben tener la misma clase de entradas y salidas.

La muestra seleccionada, según las variables y la disponibilidad de la información, está comprendida por 14 organismos operadores de agua. La suma de las variables de insumos y productos es 11; sin embargo, es recomendable hacer más grande la muestra o en caso contrario disminuir el número de variables. Se optó por esta última opción debido a que la información disponible limita un número mayor de variables, por lo que se eliminó la variable de insumos Relación Inversión–PIB ( $x_4$ ); así como dos variables de productos: Cobertura de agua potable y Horas con servicio en zonas de tandeo ( $y_1$ ,  $y_3$ ) ya que hay escasa información reportada por los organismos.

## ***5.5 Validación de variables de insumos y productos***

De las variables de insumos y productos que se tiene información, se deben eliminar aquellas que tienen una fuerte relación lineal, de manera que sólo queden en el análisis las variables linealmente independientes. Cuando existe un coeficiente de correlación lineal entre dos variables mayor o igual a 95%, sólo se debe incluir una de ellas en el estudio.

Tabla 8. Correlación entre insumos.

Variable	$x_1$	$x_2$	$x_3$
$x_1$	1.0	-	-
$x_2$	0.07	1.0	-
$x_3$	0.43	0.034	1.0

Fuente: Creación propia

Tabla 9. Correlación entre productos.

Variable	$y_2$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$
$y_2$	1.0	-	-	-	-
$y_4$	-0.13	1.0	-	-	-
$y_5$	0.77	-0.1	1.0	-	-
$y_6$	0.38	-0.1	0.08	1.0	-
$y_7$	0.17	-0.15	-0.26	0.55	1.0

Fuente: Creación propia

De las *Tablas 8 y 9* se observa que la correlación más fuerte que hay entre variables es 77%, por lo que ninguna de las variables analizadas depende de otra. Las variables de insumos y productos que describen el proceso de distribución de agua potable en los organismos operadores de agua se presentan en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Variables de insumos y productos utilizadas en el análisis de la eficiencia de los organismos operadores de agua potable en México.

Insumos	Productos
$x_1$ : Costos entre volumen producido	$y_2$ : Consumo
$x_2$ : Empleados por cada mil tomas	$y_4$ : Rehabilitación de tomas domiciliarias
$x_3$ : Empleados dedicados al control de fugas	$y_5$ : Dotación $y_6$ : Tomas con servicio continuo $y_7$ : Padrón de usuarios

Fuente: Creación propia

## 5.6 Eficiencia técnica usando el programa OpenDEA-1.0

Para calcular la eficiencia técnica mediante el programa OpenDEA-1.0, se emplearon los datos de la *Tabla 11* de los organismos operadores de agua potable de México, correspondientes al año 2006.

Tabla 11. Datos de entradas y salidas de los organismos operadores de agua año 2006.

Organismo	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_2$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$
Ensenada	11.35	6.37	12.93	169.1	0.05	217.06	100	100
Mexicali	7.17	4.33	5.03	284.58	1.3	337.57	100	100
Hidalgo del Parral	4.33	4.91	12.43	99.51	0.04	265.78	9.9	95.94
Cuauhtémoc	7.11	4.34	9.2	190.68	0.18	190.68	100	100
Saltillo	5.37	2.1	7.37	99.81	2.4	186.33	80.65	94.33
León	7.64	3.06	19.3	104.5	10.51	161.85	81.66	100
Tepeji del Río	3.72	5.95	7.5	130.38	2.19	130.38	21.89	100
Puerto Vallarta	7.25	7.45	17.36	274.67	0.73	362.24	99.25	99.25
Monterrey	6.28	4.19	6.81	179.78	8.77	243.54	100	100
Ciudad Valles	3.99	6.82	12.51	114.64	0.01	187.58	98.53	98.53
Culiacán Rosales	5.21	4.48	5.73	143.96	0.59	226.32	100	99.78
Mazatlán	5.3	5.72	8.29	203.81	0.01	250.69	100	100
Córdoba	2.72	5.82	9.62	192.49	6.44	320.81	31.23	91.39
Fresnillo	2.66	3.61	2.74	99.05	1.42	202.41	79.45	100

<sup>&</sup>Fuente IMTA. Datos correspondientes al año 2006.

### 5.6.1 Comparación del Modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos

La *Tabla 12* presenta los valores de la eficiencia para los organismos operadores de agua en el año 2006 determinada a través de los modelos DEA-CCR orientado a insumos y a productos. Los valores de eficiencia que producen ambos modelos son iguales debido a que estiman la misma frontera de eficiencia, y por lo tanto, el mismo conjunto de unidades

ineficientes [4]. El análisis de los resultados muestra que de los 14 organismos operadores, sólo seis son eficientes técnicamente; es decir, ocho organismos son ineficientes.

El organismo mas ineficiente de la muestra analizada es Ensenada, con una eficiencia técnica de 54.33%, situándose muy por debajo del resto de las unidades que no son eficientes; mientras que la siguiente unidad menos eficiente es Tepeji del Río con una eficiencia técnica de 73.89%. Las unidades ineficientes restantes, se encuentran por arriba del 80 % de eficiencia técnica.

Tabla 12. Comparación de Modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos.

Organismos Operadores	DEA - CCR orientado a insumos		DEA - CCR orientado a productos	
	Eficiencia	Conjunto de referencia	Eficiencia	Conjunto de referencia
Ensenada	54.33%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	54.33%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Mexicali	100.00%	Mexicali	100.00%	Mexicali
Hidalgo del Parral	88.02%	Fresnillo, Saltillo, Córdoba	88.02%	Fresnillo, Saltillo, Córdoba
Cuauhtémoc	86.36%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	86.36%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Saltillo	100.00%	Saltillo	100.00%	Saltillo
León	100.00%	León	100.00%	León
Tepeji del Río	73.89%	Córdoba, Fresnillo	73.89%	Córdoba, Fresnillo
Puerto Vallarta	83.96%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo	83.96%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo
Monterrey	100.00%	Monterrey	100.00%	Monterrey
Ciudad Valles	82.68%	Fresnillo	82.68%	Fresnillo
Culiacán Rosales	89.65%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	89.65%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Mazatlán	92.08%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo	92.08%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo
Córdoba	100.00%	Córdoba	100%	Córdoba
Fresnillo	100.00%	Fresnillo	100%	Fresnillo

Fuente: Creación propia

### 5.6.2 Proyección del Modelo DEA–CCR orientado a insumos

Para los organismos operadores que son ineficientes, se pueden tomar medidas para mejorar su eficiencia hasta lograr que estas unidades sean eficientes. Tomando en cuenta la muestra realizada, se realiza una proyección para mejorar las unidades ineficientes.

En la proyección del modelo DEA-CCR orientado a insumos se determina la máxima reducción que debería producirse en los insumos de la unidad analizada, obteniendo la misma o más cantidad de producto. La proyección DEA-CCR indica cuales son las cantidades óptimas de insumos para que una unidad ineficientes se convierta en eficiente, también indica cuál es la cantidad óptima de cada producto para situarnos en la frontera de eficiencia técnica. Las *Figuras 7 y 8* presentan los resultados del programa OpenDEA-1.0 para la proyección de los insumos y productos del Modelo DEA –CCR orientado a insumos.

Figura 7. Proyección en insumos del modelo DEA–CCR orientado a insumos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.

PROYECCION MODELO DEA CCR – ORIENTADO A INSUMOS			
DMU	insumo 1	insumo 2	insumo 3
Ensenada	6.167	3.461	6.892
Mexicali	7.170	4.330	5.030
Hidalgo_P	3.811	4.322	8.317
Cuauhtémoc	6.140	3.748	6.178
Saltillo	5.370	2.100	7.370
León	7.640	3.060	19.300
Tepeji	2.749	4.385	4.926
P_Vallarta	6.087	6.255	7.884
Monterrey	6.280	4.190	6.810
C_Valles	3.299	4.477	3.398
Culiacán_R	4.671	4.016	5.113
Mazatlán	4.880	5.267	5.496
Córdoba	2.720	5.820	9.620
Fresnillo	2.660	3.610	2.740

Fuente: Datos de salida mostrados por programa OpenDEA-1.0

Se observa que las unidades que son eficientes no modifican la cantidad de insumos y productos, ya que estas unidades son las que delimitan la frontera de eficiencia para la muestra seleccionada de organismos operadores de agua potable.

En la proyección del modelo DEA-CCR se calcula la cantidad óptima de insumos que una unidad ineficiente técnicamente debería consumir para ser eficiente, también se calcula la cantidad óptima de productos la cual se debería producir (ver *Figura 8*).

Figura 8. Proyección en productos del modelo DEA-CCR orientado a insumos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.

PROYECCION MODELO DEA CCR - ORIENTADO A INSUMOS					
	producto 2	producto 4	producto 5	producto 6	producto 7
Ensenada	169.100	2.277	265.510	100.00	113.907
Mexicali	284.580	1.300	337.570	100.00	100.00
Hidalgo_P	152.562	4.549	265.780	56.074	95.940
Cuahutemoc	190.680	2.018	280.470	100.00	111.889
Saltillo	99.810	2.400	186.330	80.650	94.330
León	104.500	10.510	161.850	81.660	100.000
Tepeji	130.380	3.000	244.143	66.736	100.000
P_Vallarta	274.670	3.998	399.370	99.250	133.019
Monterrey	179.780	8.770	243.540	100.000	100.00
C_Valles	122.837	1.761	251.019	98.530	124.015
Culiacán_R	143.960	2.035	258.741	100.000	120.405
Mazatlán	203.810	2.689	324.856	100.000	126.910
Córdoba	192.490	6.440	320.810	31.230	91.390
Fresnillo	99.050	1.420	202.410	79.450	100.000

Fuente: Datos de salida mostrados por programa OpenDEA-1.0

De los organismos operadores de agua, el de Ensenada que es el más ineficiente, tiene una proyección que le permite establecer líneas de acción para optimizar sus insumos y salidas utilizadas (ver *Tabla 13*).

Tabla 13. Valores iniciales y proyectados para los insumos y productos del organismo operador de agua potable de Ensenada obtenidos mediante el modelo DEA –CCR orientado a insumos.

Insumos			Productos		
Variable	Inicial	Proyección	Variable	Inicial	Proyección
Costos entre volumen producido	11.35	6.167	Consumo	169.10	169.10
Empleados por cada mil tomas	6.37	3.461	Rehabilitación de tomas domiciliarias	0.05	2.277
Empleados dedicados al control de fugas	12.93	6.892	Dotación	217.06	265.510
			Tomas con servicio continuo	100.00	100.000
			Padrón de usuarios	100.00	113.907

Fuente: creación propia

Esto significa que la unidad ineficiente de Ensenada debe disminuir sus Costos entre volumen producido de 11.35 a 6.167 pesos/m<sup>3</sup>; los empleados por cada mil tomas de 6.37 a 3.461, así como el número de empleados dedicados al control de fugas de 12.93 a 6.892 empleados.

Para el caso de los productos, el consumo no cambia; la rehabilitación de tomas domiciliarias debe aumentar de 0.05 a 2.277%; la dotación también debe aumentar de 217.07 a 265.5 l/h/d; las tomas con servicio continuo no cambia y finalmente, el padrón de usuarios puede incrementarse de 100 a 113.907 %

Los valores arrojados en la proyección se obtuvieron considerando la muestra, ya que son las unidades eficientes las que delimitan la frontera de eficiencia. El conjunto de referencia para la proyección del Modelo DEA–CCR orientado a insumos para Ensenada fue: Mexicali, Saltillo y Fresnillo.

### **5.6.2.1 Líneas de acción para el modelo DEA-CCR orientado a insumos**

Una vez que el programa OpenDEA-1.0 crea la proyección para los organismos ineficientes, deben generarse acciones para obtener los resultados deseados y ubicarse en la frontera de producción.

El organismo más ineficiente es el que corresponde a Ensenada Baja California, por lo que se tiene que realizar una serie de pasos para reducir el uso de los insumos hasta los valores obtenidos en la proyección. El modelo DEA-CCR proyecta que se debe reducir al máximo los niveles de insumos, conservando los niveles de salidas iniciales o experimentar un aumento marginal y así ubicarse en la frontera de producción. Los insumos deben reducirse prácticamente a la mitad con respecto a los usados actualmente (ver *Tabla 13*); es decir, los costos y el número de empleados son excesivos comparados con los resultados obtenidos por otros organismos.

Es necesario canalizar adecuadamente los recursos humanos y económicos que se disponen en el organismo operador de agua potable de Ensenada, así mismo se deben detectar las fugas que hay en el sistema para disminuir los costos por volumen producido. Para reducir la cantidad de empleados que hay por cada mil tomas, se debe capacitar al personal para cubrir completamente la localidad. Así mismo, también se deberá capacitar al personal adecuadamente para reducir la cantidad de los empleados dedicados al control de fugas, aunado al diseño de un programa de mantenimiento preventivo que incluya revisiones periódicas de las tuberías para detectar posibles fallas y se debe garantizar que se trabaja con la tecnología adecuada para realizar el trabajo.

### 5.6.3 Proyección del Modelo DEA – CCR orientado a productos

El objetivo de la proyección del modelo DEA-CCR orientado a productos es maximizar el aumento proporcional de los productos de la unidad evaluada, dados sus niveles de insumos. De acuerdo a los resultados anteriores, la unidad más ineficiente es Ensenada, por lo que se realizará un análisis similar a la sección anterior.

Figura 9. Proyección de insumos de modelo DEA-CCR orientado a productos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.

PROYECCION MODELO DEA CCR – ORIENTADO A PRODUCTOS			
DMU	insumo 1	insumo 2	insumo 3
Ensenada	11.350	6.370	12.686
Mexicali	7.170	4.330	5.030
Hidalgo_P	4.330	4.910	9.450
Cuauhtémoc	7.110	4.340	7.154
Saltillo	5.370	2.100	7.370
León	7.640	3.060	19.300
Tepeji	3.720	5.934	6.667
P_Vallarta	7.250	7.450	9.391
Monterrey	6.280	4.190	6.810
C_Valles	3.990	5.415	4.110
Culiacán_R	5.210	4.480	5.703
Mazatlán	5.300	5.720	5.968
Córdoba	2.720	5.820	9.620
Fresnillo	2.660	3.610	2.740

Fuente: Datos de salida mostrados por programa OpenDEA-1.0

La *Figura 9* muestra que el insumo Costos entre volumen producido (*insumo 1*) y Empleados por cada mil tomas (*insumo 2*), no experimentan ningún cambio en el modelo DEA-CCR orientado a productos, mientras que para el número de Empleados dedicados al control de fugas (*insumo 3*) se proyecta una ligera disminución de 12.93 a 12.686 empleados.

Figura 10. Proyección de productos de modelo DEA-CCR orientado a productos. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0.

PROYECCION MODELO DEA CCR - ORIENTADO A PRODUCTOS					
DMU	producto 2	producto 4	producto 5	producto 6	producto 7
Ensenada	311.233	4.191	488.678	184.052	209.649
Mexicali	284.580	1.300	337.570	100.000	100.000
Hidalgo_P	173.331	5.168	301.961	63.708	109.001
Cuahutemoc	220.796	2.337	324.768	115.794	129.562
Saltillo	99.810	2.400	186.330	80.650	94.330
León	104.500	10.510	161.850	81.660	100.000
Tepeji	176.445	4.060	330.403	90.315	135.332
P_Vallarta	327.156	4.762	475.684	118.215	158.437
Monterrey	179.780	8.770	243.540	100.000	100.000
C_Valles	148.575	2.130	303.615	119.175	150.000
Culiacán_R	160.588	2.270	288.626	111.550	134.312
Mazatlán	221.337	2.920	352.792	108.599	137.823
Córdoba	192.490	6.440	320.810	31.230	91.390
Fresnillo	99.050	1.420	202.410	79.450	100.000

Fuente: Datos de salida mostrados por programa OpenDEA-1.0

En la *Tabla 14* se observa que los aumento en los productos son considerables; es decir, el consumo (*producto 2*) pasa de 169.10 a 311.233 l/d/h, para la rehabilitación de tomas domiciliarias (*producto 4*) se proyectó un incremento de 0.05 a 4.191%; la dotación (*producto 5*) debe cambiar de 217.06 a 488.678 l/h/d; las tomas con servicio continuo (*producto 6*) se incrementa de 100.00 a 184.052 % y finalmente el padrón de usuarios (*producto 7*) debe aumentar de 100.00 a 209.649 %.

Tabla 14. Valores iniciales y proyectados para los insumos y productos del organismo operador de agua potable de Ensenada obtenidos mediante el modelo DEA –CCR orientado a productos.

Insumos			Productos		
Variable	Inicial	Proyección	Variable	Inicial	Proyección
Costos entre volumen producido	11.35	11.35	Consumo	169.10	311.233
Empleados por cada mil tomas	6.37	6.370	Rehabilitación de tomas domiciliarias	0.05	4.191
Empleados dedicados al control de fugas	12.93	12.686	Dotación	217.06	488.678
			Tomas con servicio continuo	100.00	184.052
			Padrón de usuarios	100.00	209.649

Fuente: Creación propia

Los valores calculados en la proyección del modelo DEA-CCR orientado a productos se obtuvieron a partir de las muestra, tomando como referencia las unidades que son eficientes. El conjunto de referencia para la proyección del Modelo DEA-CCR orientado a productos para Ensenada fue: Mexicali, Saltillo y Fresnillo; es decir, no importa la orientación del modelo, los organismos que sirven como referencia a Ensenada son los mismos. Un análisis similar al de Ensenada se puede realizar para las demás organismos ineficientes, ya que la proyección de los organismos eficientes deja inalterados los niveles de insumos y productos.

#### **5.6.3.1 Líneas de acción para el modelo DEA-CCR orientado a productos**

El organismo más ineficiente es el que corresponde a Ensenada Baja California, por lo que deben crearse acciones para mejorar el desempeño de dicho organismo. En el modelo DEA-CCR orientado a productos se pretende elevar al máximo el consumo, la rehabilitación de tomas domiciliarias, la dotación, las tomas con servicio continuo y el padrón de usuarios, conservando los niveles de insumos iniciales o experimentando una disminución marginal para ubicarse en la frontera de producción (ver *Tabla 13*).

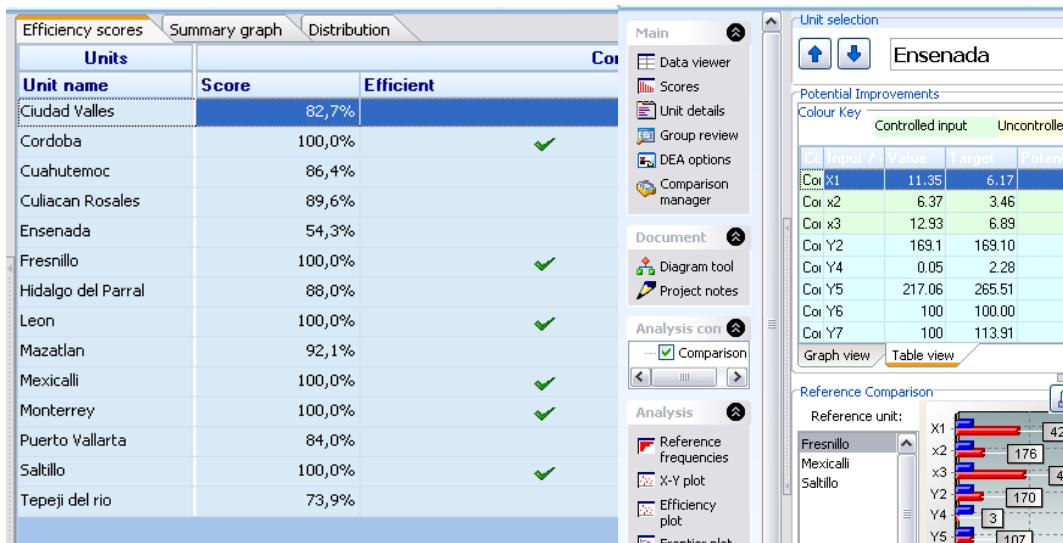
De acuerdo a la proyección, el área que debe ser atendida en mayor medida es la rehabilitación de tomas domiciliarias, por lo cual se debe elaborar un proyecto para aumentar significativamente este rubro, y una manera de lograrlo es asignando personal a esta tarea, de esta forma no se despiden empleados y al mismo tiempo se eleva la eficiencia, para lo cual deberá capacitarse adecuadamente al personal para cubrir la mayor parte de la población. En cuanto a los niveles deseados en la dotación, deberá disponerse de la tecnología adecuada para la extracción y distribución del vital líquido para alcanzar la dotación de 488.678 l/h/d, con lo cual además se incrementará el consumo. La dotación tiene un impacto importante en la calidad de vida de los habitantes, por lo que el cumplimiento de esta proyección tiene además un beneficio social. El padrón de usuarios en Ensenada debe incrementarse un 209% y para lograrlo deberán crearse campañas para la instalación de tomas, identificar viviendas que no cuenten con el servicio, aumentar la red de agua potable.

## 5.7 Comparación del programa OpenDEA-1.0 con Frontier Analyst

### 5.7.1 Eficiencia técnica

Se calculó la eficiencia técnica mediante el programa comercial Frontier Analyst, para lo cual se usaron los mismos valores empleados en OpenDEA-1.0 para cada variable de los organismos operadores de agua correspondiente al año 2006. La *Figura 11* presenta la eficiencia y proyección obtenidas con Frontier Analyst usando el modelo DEA-CCR orientado a insumos.<sup>2</sup>

Figura 11. Eficiencia técnica y proyección del modelo DEA-CCR orientado a insumos con el programa Frontier Analyst.



Fuente: Resultados mostrados por software Frontier Analyst

Los resultados de eficiencia técnica y proyecciones obtenidos empleando el programa OpenDEA-1.0 y Frontier Analyst son idénticos, por lo tanto, se valida el programa OpenDEA (*Tabla 15*).

<sup>2</sup> Se realizó solamente el cálculo de eficiencia del modelo orientado a insumos, ya que se obtiene la misma puntuación de eficiencia para ambos modelos.

Tabla 15. Comparación de la eficiencia técnica OpenDEA-1.0 vs. Frontier Analyst.

Organismos Operadores	<b>OpenDEA-1.0</b>		<b>Frontier Analyst</b>	
	Eficiencia	Conjunto de referencia	Eficiencia	Conjunto de referencia
Ensenada	54.33%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	54.30%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Mexicali	100%	Mexicali	100%	Mexicali
Hidalgo del Parral	88.02%	Fresnillo, Saltillo, Córdoba	88%	Fresnillo, Saltillo, Córdoba
Cuauhtémoc	86.36%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	86.40%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Saltillo	100%	Saltillo	100%	Saltillo
León	100%	León	100%	León
Tepeji del Río	73.89%	Córdoba, Fresnillo	73.90%	Córdoba, Fresnillo
Puerto Vallarta	83.96%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo	84%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo
Monterrey	100%	Monterrey	100%	Monterrey
Ciudad Valles	82.68%	Fresnillo	82.70%	Fresnillo
Culiacán Rosales	89.65%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo	89.60%	Mexicali, Saltillo, Fresnillo
Mazatlán	92.08%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo	92.10%	Mexicali, Córdoba, Fresnillo
Córdoba	100%	Córdoba	100%	Córdoba
Fresnillo	100%	Fresnillo	100%	Fresnillo

Fuente: Creación propia

## **Conclusiones**

El programa OpenDEA-1.0 desarrollado en lenguaje Fortran90 permite calcular la eficiencia técnica empleando el Análisis Envolvente de Datos (DEA) orientado a insumos y productos, ambos con rendimientos constantes a escala, siguiendo los modelos matemáticos propuestos por Charnes, Cooper y Rhodes.

Se evaluó la eficiencia técnica de los organismos operadores de agua potable en México mediante el Análisis Envolvente de Datos orientado a insumos y productos implementado en el programa OpenDEA-1.0. Los insumos de los organismos operadores de agua potable considerados en el estudio son Costos entre volumen producido, Empleados por cada mil tomas y Empleados dedicados al control de fugas, mientras que los productos generados son Consumo, Rehabilitación de tomas domiciliarias, Dotación, Tomas con servicio continuo y Padrón de usuarios.

Del análisis de eficiencia resultó que sólo las unidades de Mexicali, Saltillo, León, Monterrey, Córdoba y Fresnillo son eficientes; es decir, seis de los catorce organismos operadores de agua potable, mientras que el resto de las instituciones evaluadas son ineficientes. Ensenada fue la unidad con menor eficiencia, 54.3%, independientemente de la orientación del modelo: insumos y productos, seguido de Tepeji del Río con una eficiencia de 73.9%. Los demás organismos operadores de agua tienen eficiencias mayores al 80.0%.

En las proyecciones realizadas para el caso de Ensenada, el organismo más ineficiente de los evaluados en el modelo DEA-CCR orientado a insumos, resalta la disminución propuesta de los Empleados dedicados al control de fugas, de 12.93 a 6.892. Cuando se resuelve el modelo DEA-CCR orientado a productos, la proyección para la Rehabilitación de tomas domiciliarias, Padrón de usuarios, Dotación y Consumo prácticamente duplica los valores para estos productos, lo cual es preferible a despedir empleados. El DEA permite realizar el análisis de eficiencia con énfasis en el grupo de variables sobre las que se tiene control, para el caso de Ensenada, el análisis de eficiencia con énfasis en el control de los productos sugiere que el problema básico es el bajo nivel de productos generados en relación a la muestra estudiada. Se

propusieron líneas de acción para el modelo DEA-CCR orientado a insumos y a productos para la unidad más ineficiente (Ensenada). Las líneas de acción a seguir requieren de inversión, principalmente en cuanto a capacitación de personal y tecnología, la cual puede recuperarse en poco tiempo.

Estos resultados ayudan a orientar la toma de decisiones en los organismos operadores de agua identificando las ramas más débiles y la necesidad de impulsar la eficiencia y competitividad de la mayor parte de los organismos operadores.

Los resultados obtenidos con el programa OpenDEA-1.0 se compararon con las eficiencias técnicas y proyecciones generadas con la aplicación comercial Frontier Analyst, mostrando resultados idénticos por lo que el OpenDEA-1.0 queda validado.

El desarrollo del programa OpenDEA-1.0 está garantizado porque se conformó un proyecto en la comunidad OpenDEA.sourceforge.net que proporciona la plataforma para el mantenimiento continuo del programa. El código OpenDEA puede analizar un número ilimitado de organizaciones, a diferencia de las aplicaciones comerciales que tienen un esquema de licenciamiento que depende del tamaño de la muestra estudiada, haciendo que los costos sean prohibitivos para la versión sin restricción de número de unidades analizadas (~64,000 pesos). El código abierto representa una opción sustentable para el desarrollo de aplicaciones útiles para la toma de decisiones en los organismos gubernamentales en México.

## ***Glosario***

**Benchmarking**, es una herramienta de administración, proporciona un enfoque disciplinario y lógico para comprender y evaluar de manera objetiva las fortalezas y debilidades de una compañía, en comparación con otras.

**Conjunto de posibilidades de producción**, el conjunto de procesos productivos tecnológicamente factibles.

**Eficiencia**, se refiere a qué tan bien se desempeña una unidad productiva con la tecnología existente.

**Eficiencia a escala**, mide el grado en que una unidad productiva opera en la dimensión óptima, es decir, considera el tamaño de la planta y está asociada a la existencia de rendimientos variables a escala.

**Eficiencia Asignativa o de precio**, se refiere a la capacidad de una unidad para usar los distintos insumos en proporciones óptimas dados sus precios relativos.

**Eficiencia de congestión**, aparece cuando la cantidad usada de algún insumo es tan grande. Comparación DEA y Método de libre disposición de la envolvente.

**Eficiencia económica**, se dice que un proceso productivo o un programa (combinación de procesos) es económicamente eficiente con respecto a otro u otros cuando proporciona un mayor beneficio o rendimiento.

**Eficiencia técnica (relativa)**, capacidad que tiene una unidad para obtener el máximo de productos a partir de un conjunto de insumos.

**Eficiencia técnica pura**, hace referencia a la utilización óptima de factores productivos.

**Frontera de producción**, máxima cantidad teórica de productos posibles, dada la combinación de insumos y la tecnología disponible.

**Insumo virtual**, se refiere a la suma ponderada de los insumos.

**Isocuanta de producción**, es la curva que representa un espacio de insumos (todos variables) que muestran todas las combinaciones posibles de dos o más insumos o factores de producción que son físicamente capaces de generar un mismo nivel o volumen de producción.

**Libre disposición de la envolvente**, modelo el cual se basa en una representación de la tecnología de producción dada por los planes de producción observada, desechando gran cantidad de insumos y productos, pero sin el supuesto de convexidad. En su forma tradicional, el modelo FDH asume implícitamente el modelo con rendimientos constantes a escala y el modelo se resuelve mediante un programa lineal entero mixto.

**Linux**, sistema operativo libre, es uno de los principales ejemplos de software libre y código abierto. Linux está desarrollado por colaboradores de todo el mundo.

**Modelos radiales**, contempla la máxima expansión equiproporcional de los productos o la máxima reducción equiproporcional de insumos.

**Modelos no radiales**, con estos se identifican todas las posibles situaciones de ineficiencia técnica, estos suelen ser sensibles a cambios a las unidades de medida empleadas.

**Productividad**, está relacionada a la cantidad de productos elaborados dado un nivel de insumos

**Producto virtual**, se refiere a la suma ponderada de los productos.

**Rendimientos constantes a escala**, cuando el incremento porcentual de los productos es igual al incremento porcentual de los insumos.

**Subrutina**, también llamada rutina o función, como idea general, se presenta como un subalgoritmo que forma parte del algoritmo principal, el cual permite resolver una tarea específica.

**Tandeo**, distribución del agua potable.

**Tipología**, estudio de los tipos, se encarga de realizar una clasificación de diferentes elementos en diversos campos de estudio.

**Unidad tomadora de decisiones**, cualquier tipo de productor o unidad de producción: empresa, industria, persona, región, país, etc.

## Bibliografía

1. A. Weersink, G. Turvey, y A. Godah, *Decomposition measures of technical efficiency for Ontario dairy farms*. 1990. J. Agr. Econ., p 439.
2. A. Pinilla, *Concepto y medición de la eficiencia productiva*. 2002, Ed. Pirámide, Madrid España.
3. V. Coll y O. Blasco, *Evaluación de la eficiencia mediante el Análisis Envolvente de Datos*, U. de Valencia.
4. T. Coelli, R. Prasada, *et al.*, *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. 1998, Kluwer A. Publishers, Boston.
5. A. Charnes, L. Golany, L. Seiford, y J. Stuts, *Foundations of Data Envelopment Analysis for Pareto – Koopmans efficient empirical production functions*. 1985, J. Econometrics, p. 91-107
6. M. Farrell, *The measurement of productive efficiency*. 1957, J. of Royal Statistical Society, p. 253-290.
7. G. Debreu, *The coefficient of resource utilization*. 1951, Econometrics, p. 273.
8. R. Färe y C. Lovell, *Measuring the technical efficiency of production*. J. Econometrics, p. 317.
9. Y. Chen, *The relative productive efficiency of Township-Village-Enterprises in Mainland China*. 2001, Mainland China Studies, p. 23
10. A. Charnes, *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. 1994, Boston, A. Publishers.
11. R. Morey, *et al.*, *A goal-programming method of stochastic allocative Data Envelopment Analysis*. 1993, European J. of Operational Research.
12. J. Mahajan, *A Data Envelopment Analytic model for assessing the relative efficiency of the selling functions*. 1991, European J. of Operational Research, p. 185-205.
13. R. Banker, V. Gadh, *et al.*, *A Monte Carlo comparison of two production frontier estimation methods: Corrected ordinary least squares and Data Envelopment Analysis*. 1993, European J. of Operational Research, p. 332-343.
14. A. Charnes, W. Cooper y E. Rhodes, *Measurement the efficiency of decision making units*. 1978, Naval Research Logistics Quaterly, p. 429-444.
15. A. Charnes y W. Cooper, *Programming with linear fractional functional*. 1962, European J., p. 181-185.
16. W. Cook y D. McCutcheon, *Implementations of Robotics: Identifying Efficient Implementers*. 1992, Ed. Omega, p. 227-239.
17. M. Oral y R. Yolalan, *An empirical study on measuring operating efficiency and profitability of bank branch*. 1990, European J. of Operational Research, p. 282-294.
18. A. Boussofiane, *et al.*, *Applied Data Envelopment Analysis*. 1991, European J. of Operational Research, p. 1-15.
19. A. Charnes, W.W. Cooper, y E. Rhodes, *Evaluating program and managerial efficiency: An application of Data Envelopment Analysis to Program Follow Through*. Management Science, 1981. 27(6): p. 668.

## **ANEXO**

### **MANUALES PARA EL USO DE OpenDEA-1.0**

#### **ÍNDICE**

<b>A.1 MANUAL TÉCNICO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0 .....</b>	<b>66</b>
A.1.1 Propósito .....	66
A.1.2 Estructura del proyecto .....	66
A.1.3 Estructura de directorios .....	66
A.1.4 Descripción general del programa .....	66
A.1.5 Metodología. ....	67
A.1.6 Algoritmo del Programa OpenDEA-1.0 .....	67
A.1.7 Lenguaje de programación.....	73
A.1.8 Sistema sobre el que se ejecuta .....	73
<b>A.2 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0 EN SISTEMA OPERATIVO LINUX.....</b>	<b>74</b>
A.2.1 Descarga del programa.....	74
A.2.2 Introducción de datos .....	74
A.2.3 Ejemplo para entrada de datos. ....	76
A.2.4 Ejecución del Programa OpenDEA-1.0 en Sistema operativo Linux. ....	77
A.2.5 Salida de datos .....	81
A.2.5.1 Salida de datos modelo DEA - CCR orientado a insumos. ....	82
A.2.5.2 salida de datos modelo DEA - CCR orientado a productos.....	85

<b>A.3 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0 PARA SISTEMA OPERATIVO WINDOWS .....</b>	<b>87</b>
A.3.1 Requerimientos de hardware.....	87
A.3.2 Descarga de paquete OpenDEA-1.0 .....	87
A.3.3 Compilar programa .....	87
A.3.4 Ejecución del Programa OpenDEA-1.0 en Sistema operativo Windows .....	90

## **A.1 MANUAL TÉCNICO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0**

### ***A.1.1 Propósito***

El documento presenta una visión global del programa OpenDEA-1.0 de manera técnica y constituye una referencia de primer nivel.

### ***A.1.2 Estructura del proyecto***

El programa OpenDEA-1.0 se construyó para resolver dos modelos: DEA-CCR orientado a insumos y DEA-CCR orientado a productos, ambos con rendimientos constantes a escala.

### ***A.1.3 Estructura de directorios***

El programa OpenDEA-1.0 contiene:

- Programa principal – opendea.f90 (código fuente del programa principal)
- Subrutina – simplex.f90 (código fuente de la subrutina simplex)
- Ejecutable – OpenDEA-1.0 (programa ejecutable)

### ***A.1.4 Descripción general del programa***

El programa OpenDEA-1.0 permite calcular al usuario la eficiencia técnica de un número dado (50 unidades, con opción a incrementar el número durante la compilación) de unidades, mediante el modelo DEA-CCR orientado a insumos y productos, además construye una proyección de puntos de mejora para las unidades que son ineficientes técnicamente.

El programa incluye dos modelos:

- Orientado a insumos
- Orientado a productos

Ambos con rendimientos constantes a escala.

El programa OpenDEA-1.0 se construyó en dos módulos.

- Programa principal
- Subrutina para la solución del método simplex

#### ***A.1.5 Metodología.***

El OpenDEA-1.0 se desarrolló mediante los modelos propuesto por Charnes, Cooper and Rhodes en 1978 para calcular la eficiencia técnica de modelos orientados a insumos y a productos, ambos con rendimientos constantes a escala.

#### ***A.1.6 Algoritmo del Programa OpenDEA-1.0***

Al ejecutar el programa OpenDEA-1.0 inicialmente aparece una pantalla con un menú para elegir las siguientes opciones:

1. Modelo DEA – CCR orientado a insumos
2. Modelo DEA – CCR orientado a productos
3. Modelo DEA – CCR orientado a insumos y a productos
4. salir

Si el usuario introduce algún otro valor que no este dentro de las opciones (\*, -, 0, -1, a, \$, 19, etc.) se envía el siguiente mensaje “EL VALOR QUE INTRODUCISTE NO ES CORRECTO,

INTRODUCE ALGUNO QUE SE ENCUENTRA EN LAS OPCIONES” y vuelve a mostrar el menú inicial.

Si el usuario elige algún modelo, se procederá con el siguiente paso.

El programa OpenDEA-1.0 muestra el siguiente mensaje: “INTRODUCE EL NOMBRE DEL FICHERO (FORMATO .TXT) DONDE SE ENCUENTRAN ALMACENADOS LOS DATOS”.<sup>3</sup>

El usuario debe escribir correctamente el nombre del fichero (con formato .txt) donde se encuentran almacenados los datos de entrada. Si el fichero no existe se envía el siguiente mensaje a la pantalla: “ERROR, PORFAVOR VERIFICA QUE EL FICHERO EXISTE”, finalizando el programa, si el fichero existe en el directorio actual de trabajo, se avanza al siguiente paso.

El programa muestra en pantalla el siguiente mensaje “INTRODUCE EL NOMBRE DEL FICHERO DONDE SE ALMACENARÁN LOS DATOS DE SALIDA (FORMATO .TXT)”. Aquí el usuario deberá introducir correctamente el nombre del fichero donde desea almacenar los datos de salida, si el fichero existe, el programa borrará el contenido y lo reemplazará por los valores de salida arrojados por el programa.

El programa procederá a leer la primera parte de los datos de entrada, comenzando con No. Insumos, No. productos y No. unidades. Si algún valor no es correcto (a, s, 0, -2, /, etc. ) aparecerá en pantalla el siguiente mensaje “ ERROR DE FORMATO EN EL FICHERO DE ENTRADA PORFAVOR INTRODUCE LOS DATOS DE ACUERDO AL FORMATO QUE SE ENCUENTRA EN EL FICHERO “formato\_opendea.txt ” y se creará automáticamente un fichero con el nombre “formato\_opendea.txt” el cual contiene las características que debe tener el fichero para la introducción de los datos.

---

<sup>3</sup> Se recomienda el uso de un fichero con formato “.txt” por la gran compatibilidad tanto en Sistema Operativo Linux como Windows.

Valores correctos para los datos de entrada:

- insumos  $\geq 1$
- productos  $\geq 1$
- unidades  $\geq 2$

El programa crea algunos arreglos y variables para su posterior uso.

El programa procede a leer la segunda parte de datos (insumos y productos). Si algún valor en los datos no es correcto el programa enviará el siguiente mensaje “ERROR DE FORMATO EN EL FICHERO POR FAVOR INTRODUCE LOS DATOS DE ACUERDO AL FORMATO QUE SE ENCUENTRA EN EL FICHERO “formato\_opendea.txt”, automáticamente se creará el fichero “formato\_opendea.txt” donde se encuentra el formato adecuado para la introducción de datos.<sup>4</sup>

Se almacenan los valores de insumos y productos en un arreglo de doble precisión (8 decimales) para su posterior uso.

Cierra fichero de datos de entrada.

---

<sup>4</sup> El valor del número de insumos y número de productos, debe ser mayor a cero, de lo contrario aparecerá un mensaje de error. Para el uso de decimales se usará punto.

Crea modelo (s) definido por el usuario:

1. Modelo DEA – CCR orientado a insumos

- Crea función objetivo con valor  $\varepsilon = 1.E-6$  (recomendado por Charnes Cooper and Rhodes).
- Crea restricciones del modelo.
- Transfiere los valores a un arreglo de doble precisión (8 decimales) para introducirlo a la subrutina.
- Hace el llamado de la subrutina para resolver el modelo mediante el método simplex.
- Se devuelven valores de eficiencia técnica de cada unidad.
- Se devuelve el conjunto de referencia(s), mediante un arreglo de caracteres, para la unidad evaluada.
- Se devuelve valores de holgura para la unidad evaluada.
- Realiza la proyección del modelo y se almacena los datos en un arreglo de doble precisión.
- Crea fichero para la salida de datos, con el nombre que el usuario introdujo previamente.
- Imprime eficiencia técnica de cada unidad (4 decimales)<sup>5</sup> y conjunto de referencia.
- Imprime los valores de holgura (3 decimales).
- Imprime proyección del modelo DEA CCR – orientado a insumos (3 decimales).
- Cierra fichero de salida de datos.

---

<sup>5</sup> Para los datos de salida (puntuación de eficiencia, proyección en holguras y proyección DEA-CCR), OpenDEA-1.0 puede mostrar un máximo de 8 decimales después del punto, para modificar ver código fuente del programa principal “opendea.f90”

## 2. Modelo DEA – CCR orientado a productos

- Crea la función objetivo con valor  $\epsilon = 1.E-6$  (recomendado por Charnes Cooper and Rhodes).
- Se crean las restricciones del modelo.
- Transfiere los valores a un arreglo de doble precisión (8 decimales) para introducirlo a la subrutina.
- Se hace el llamado de la subrutina para resolver el modelo mediante el método simplex.
- Devuelve los valores de holgura para la unidad evaluada.
- Se realiza la proyección del modelo y almacena los datos en un arreglo de doble precisión.
- Crea fichero para la salida de datos, con el nombre que el usuario introdujo previamente.
- Imprime los valores de holgura (3 decimales).
- Imprime la proyección del modelo DEA CCR – orientado a productos (3 decimales).
- Cierre de fichero de salida de datos.

## 3. Modelo DEA – CCR orientado a insumos y productos

- Crea función objetivo de modelo orientado a insumos con valor  $\epsilon = 1.E-6$  (recomendado por Charnes Cooper and Rhodes).
- Se crea restricciones del modelo orientado a insumos.
- Transfiere los valores a un arreglo de doble precisión (8 decimales) para introducirlo a la subrutina.
- Se hace el llamado de la subrutina para resolver el modelo orientado a insumos mediante el método simplex.
- La subrutina devuelve eficiencia técnica de cada unidad.

- Subrutina devuelve el conjunto de referencia(s), mediante un arreglo de caracteres, para la unidad evaluada.
- Subrutina devuelve valores de holgura para la unidad evaluada.
- Realiza la proyección del modelo orientado a insumos y almacena los datos en un arreglo de doble precisión.
- Crea función objetivo de modelos orientado a productos con valor  $\epsilon = 1.E-6$  (recomendado por Charnes Cooper and Rhodes).
- Crea restricciones del modelo orientado a productos.
- Transfiere los valores a un arreglo de doble precisión (8 decimales) para introducirlo a la subrutina.
- Se hace el llamado de la subrutina para resolver el modelo orientado a productos mediante el método simplex.
- Se devuelven valores de holgura de modelo orientado a productos para la unidad evaluada.
- realiza la proyección del modelo orientado a productos y almacena los datos en un arreglo de doble precisión.
- Crea fichero para la salida de datos, con el nombre que el usuario introdujo previamente.
- Se imprime eficiencia técnica de cada unidad (4 decimales) y conjunto de referencia.
- Se imprime los valores de holgura (3 decimales) de modelo orientado a insumos.
- Se imprime proyección del modelo DEA CCR – orientado a insumos (3 decimales).
- Se imprime los valores de holgura (3 decimales) del modelo orientado a productos.
- Se imprime proyección del modelo DEA CCR – orientado a productos (3 decimales).
- Se cierra fichero de salida de datos.

### ***A.1.7 Lenguaje de programación***

El programa OpenDEA-1.0 está construido en Fortran 90, el cual es un lenguaje de programación de alto nivel que está especialmente adaptado al cálculo numérico y al cómputo científico. Fortran 90 es usado en aplicaciones científicas y de ingeniería debido al conjunto de librerías matemáticas con las que cuenta, además de realizar cálculos en paralelo. Fortran 90 es uno de los lenguajes más populares en el área de la computación de alto rendimiento y es el lenguaje usado para programas que evalúan el desempeño (benchmark) y el ranking de los supercomputadores.

### ***A.1.8 Sistema sobre el que se ejecuta***

El programa OpenDEA-1.0 se ejecuta en las siguientes versiones de Linux a 32 y 64 bits: Asianux\* 3.0, Debian\* 4.0, Fedora\* 10, Mandrake, Red Hat Enterprise Linux\* 3, 4, 5, SUSE LINUX Enterprise Server\* 9, 10, 11, TurboLinux\* 11, Ubuntu\* 9.04. Además puede ejecutarse en Windows 2000, Windows XP, Windows Vista o superior, Windows Server 2003 ó superior.

## **A.2 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0 EN SISTEMA OPERATIVO LINUX**

### ***A.2.1 Descarga del programa***

El programa OpenDEA-1.0 (versión Linux) puede descargarse gratuitamente de la siguiente página: <http://opendea.sourceforge.net>, se debe copiar el programa ejecutable “OpenDEA-1.0” dentro de una carpeta en la PC.

Una vez realizado el paso anterior, debe crearse el fichero de entrada de datos, de acuerdo al formato que reconoce OpenDEA-1.0.

### ***A.2.2 Introducción de datos***

El fichero que almacenará los datos de entrada debe estar en el mismo directorio que el ejecutable OpenDEA-1.0.

Para el uso del programa OpenDEA-1.0 se desarrolló el siguiente formato para los datos de entrada, los cuales deben estar preferentemente contenidos en un fichero con formato “.txt”:

1<sup>er</sup> Renglón

Renglón para especificar el número de insumos que se introducirán al programa. El primer carácter debe ser un número distinto de cero y positivo. Las etiquetas son permitidas después del número, si se separan con un espacio.

## 2<sup>do</sup> Renglón

Renglón dedicado para el número de productos a introducir en el programa. El primer carácter debe ser un número distinto de cero y positivo. Las etiquetas son permitidas después del número, si se separan con un espacio.

## 3<sup>er</sup> Renglón

Renglón dedicado para el número unidades a evaluar. El primer carácter debe ser un número mayor a 2, de lo contrario el programa enviará un mensaje de error. Las etiquetas son permitidas después del número, si se separan con un espacio.

## 4<sup>to</sup> Renglón

Renglón dedicado para el nombre de cada unidad a evaluar, en este renglón se podrá introducir letras del abecedario, números y símbolos para distinguir las unidades. Puede dejarse uno o más espacios entre una y otra unidad para ubicar mejor a cada una con sus respectivos valores. Nota: El límite para el nombre de cada unidad son 10 caracteres<sup>6</sup>, si se rebasa esta tamaño, el programa enviará un mensaje de error. No debe dejarse espacios vacíos en el nombre de una unidad, el uso de guión bajo “\_” es permitido. El espacio indica pasar al nombre de la siguiente unidad.

## 5<sup>to</sup> Renglón (Opcional)

Renglón dedicado para la separación de los datos anteriores, con el fin de tener una mejor visión de los renglones, este espacio es opcional.<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> El límite de caracteres en este caso son 10, si se requiere introducir un número mayor de caracteres, ver código fuente del programa principal “opendea.f90”

<sup>7</sup> En dado caso de no dejar un renglón en blanco OpenDEA-1.0 registrara los datos de igual forma.

## Renglones de datos de insumos

Se destinó los renglones restantes para los datos de entrada de cada unidad, primero introduciendo los valores para los insumos, de acuerdo al número de insumos será el número de renglones. Los datos introducidos estarán separados por uno o varios espacios para ubicar mejor los datos entorno a las unidades. El uso de decimales se especifica por un punto. Al finalizar la introducción de los insumos, se introducen los datos de productos, de manera similar. El número de productos determina el número de renglones usados, para separar los productos se utilizan espacios. Por simplicidad, pueden separarse los renglones de insumos y productos mediante un espacio<sup>8</sup>.

No debe de introducirse algún otro carácter que no sea un número, además no se debe introducir números menores o iguales a cero, de lo contrario, se obtendrán datos erróneos en los datos de salidas.

### ***A.2.3 Ejemplo para entrada de datos.***

Figura 15. Formato para los datos de entrada de OpenDEA-1.0.

2	insumos
2	producto
6	unidades
A	B
C	D
E	F
8	11
14	12
12	13
18	20
8	25
25	40
40	24
24	30
30	22
22	30
30	

Fuente: Pantalla de introducción de datos en OpenDEA-1.0 <sup>9</sup>

<sup>8</sup> El uso de uno o más espacios para separar insumos y productos es valido.

<sup>9</sup> Este ejemplo se maneja a lo largo del manual

#### ***A.2.4 Ejecución del Programa OpenDEA-1.0 en Sistema operativo Linux.***

Una vez almacenado el fichero de datos de entrada, en la misma carpeta donde se encuentra el programa ejecutable OpenDEA-1.0, se procede a la ejecución del programa.

Para ejecutar el programa OpenDEA-1.0 que se encuentra en el directorio actual de trabajo<sup>10</sup> se usa el comando: `./OpenDEA-1.0`

Figura 16. Ejecución en pantalla de OpenDEA-1.0

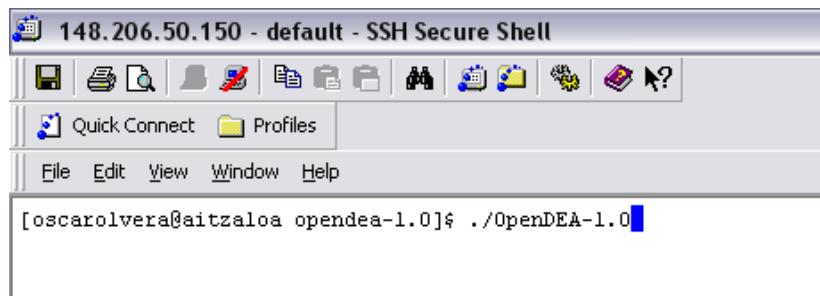
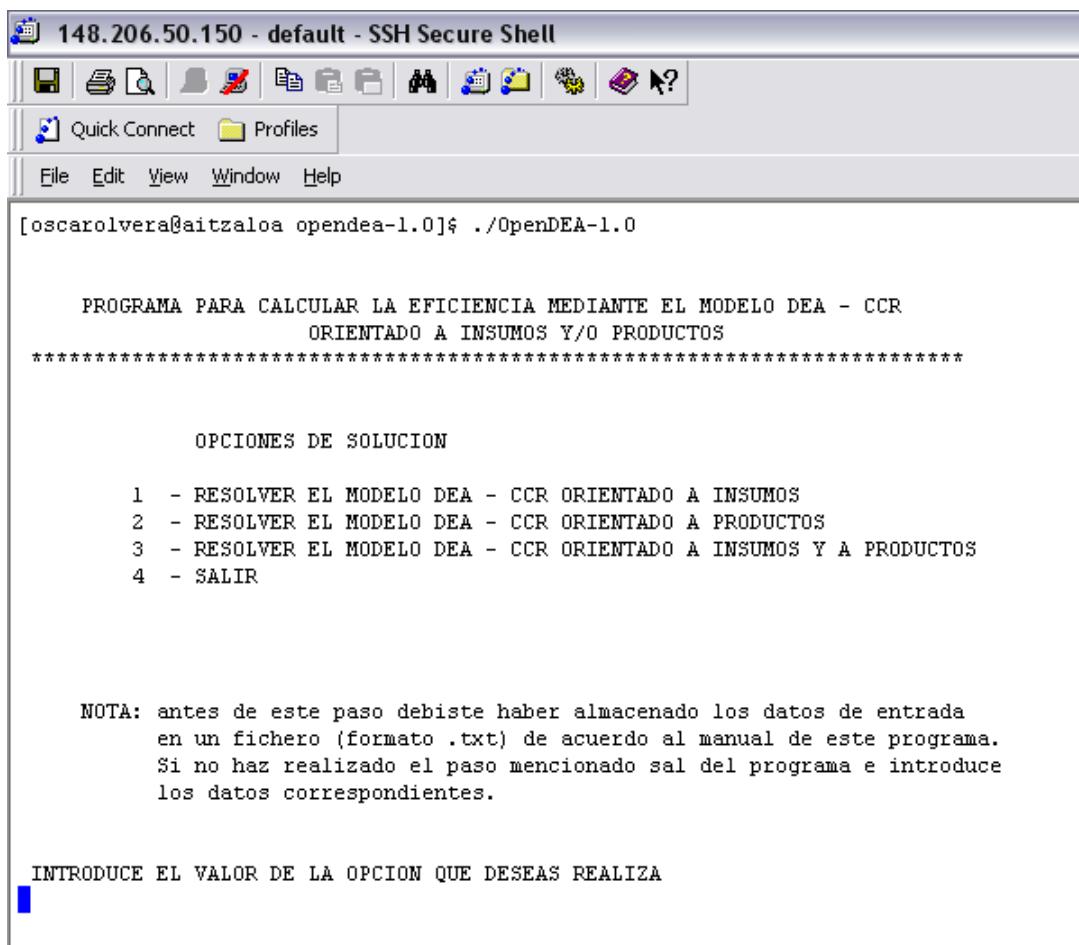


Figura 17. Menú mostrado en pantalla por OpenDEA-1.0



148.206.50.150 - default - SSH Secure Shell

File Edit View Window Help

[oscarolvera@aitzaloa opendea-1.0]\$ ./OpenDEA-1.0

PROGRAMA PARA CALCULAR LA EFICIENCIA MEDIANTE EL MODELO DEA - CCR  
ORIENTADO A INSUMOS Y/O PRODUCTOS

\*\*\*\*\*

OPCIONES DE SOLUCION

1 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A INSUMOS  
2 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A PRODUCTOS  
3 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A INSUMOS Y A PRODUCTOS  
4 - SALIR

NOTA: antes de este paso debiste haber almacenado los datos de entrada en un fichero (formato .txt) de acuerdo al manual de este programa.  
Si no has realizado el paso mencionado sal del programa e introduce los datos correspondientes.

INTRODUCE EL VALOR DE LA OPCION QUE DESEAS REALIZA

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux

El menú en pantalla indica que modelo debe resolverse:

1. Resolver modelo DEA-CCR orientado a insumos
2. Resolver modelo DEA-CCR orientado a productos
3. Resolver modelo DEA-CCR orientado a insumos y a productos
4. Salir

Si se introduce algún valor que esté fuera del menú, aparecerá un mensaje de error y posteriormente aparecerá el mismo menú. Si se elige alguna opción de solución del modelo

DEA-CCR aparecerá el siguiente texto “Introduce el nombre del fichero donde se encuentran almacenados los datos”.

Posteriormente debe introducirse el nombre del fichero como lo marca el ejemplo.

El siguiente paso es escribir un nombre de fichero donde se desea almacenar los datos de salida que arrojara OpenDEA-1.0 (de preferencia el fichero no debe existir, de lo contrario se borra la información previa y se almacenan los datos del análisis). Si los datos de entrada son correctos, aparece la siguiente leyenda: “Por favor abre el fichero datos\_de\_salida.txt”.

Figura 18. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0. Al final de la ejecución.

A screenshot of a terminal window titled "148.206.50.150 - default - SSH Secure Shell". The window contains the following text:

```
[oscarolvera@aitzaloa opendea-1.0]$ ./OpenDEA-1.0

PROGRAMA PARA CALCULAR LA EFICIENCIA MEDIANTE EL MODELO DEA - CCR
ORIENTADO A INSUMOS Y/O PRODUCTOS
*****
OPCIONES DE SOLUCION
1 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A INSUMOS
2 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A PRODUCTOS
3 - RESOLVER EL MODELO DEA - CCR ORIENTADO A INSUMOS Y A PRODUCTOS
4 - SALIR

NOTA: antes de este paso debiste haber almacenado los datos de entrada
en un fichero (formato .txt) de acuerdo al manual de este programa.
Si no has realizado el paso mencionado sal del programa e introduce
los datos correspondientes.

INTRODUCE EL VALOR DE LA OPCION QUE DESEAS REALIZA
1
INTRODUCE EL NOMBRE DEL FICHERO (FORMATO .TXT) DONDE SE ENCUENTRAN ALMACENADOS
LOS DATOS
entrada.txt

INTRODUCE EL NOMBRE DEL FICHERO DONDE SE ALMACENEN LOS DATOS DE SALIDA (FORMATO
.TXT)
salida.txt

PORFAVOR HABRE EL FICHERO salida.txt

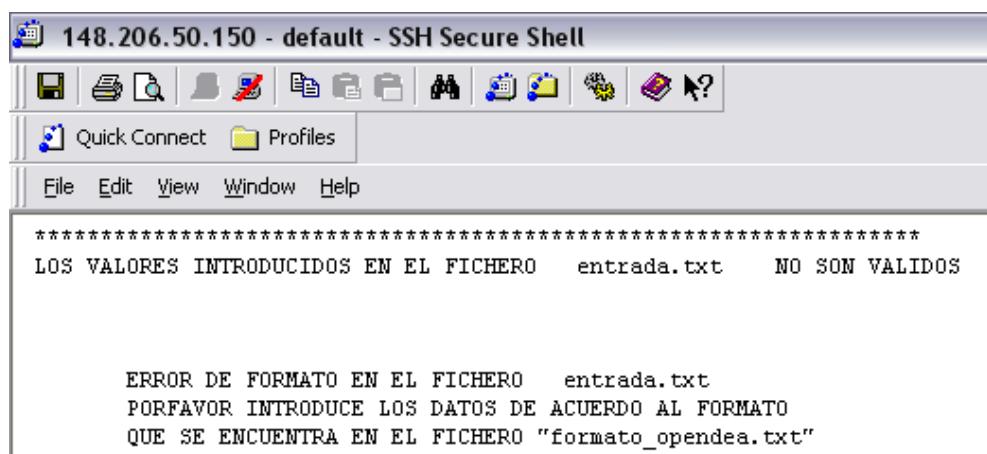
[oscarolvera@aitzaloa opendea-1.0]$
```

The taskbar at the bottom of the window shows standard Windows icons: Inicio, Windows Live, Reproductor d..., Downloads, and MANUAL TECN... .

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux

Si los datos de entrada que se encuentran en el fichero son erróneos, aparecerá la siguiente pantalla.

Figura 19. Pantalla mostrando mensaje de error en la introducción de datos



Si aparece la leyenda en pantalla, automáticamente se crea un fichero llamado “formato\_opendea.txt” en el directorio actual de trabajo. En este fichero se encuentra el formato para los datos de entrada.

### **A.2.5 Salida de datos**

Si se ejecutó el programa anteriormente y se requiere ejecutar nuevamente con el mismo nombre que se propuso anteriormente, el programa sobrescribe los datos del fichero anterior.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> El fichero de datos de salida debe tener el formato “.txt”

### **A.2.5.1 Salida de datos modelo DEA - CCR orientado a insumos.**

#### Bloque 1

DMU – Unidad tomadora de decisiones.

CCR – EFF – Puntuación de eficiencia de cada unidad

REF SET – Conjunto de referencia de las unidades que tienen mayor peso entorno a la unidad evaluada.

#### EJEMPLO:

Figura 20. Pantalla con los datos de salida para eficiencia técnica por OpenDEA-1.0 del modelo DEA-CCR orientado a insumos

EFICIENCIA DE UNIDADES		
DMU	CCR-EFF	REF SET
A	0.9916	B E
B	1.0000	B
C	0.8929	B
D	0.8654	E
E	1.0000	E
F	0.6515	B E

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux

## Bloque 2

- Se obtiene la proyección de holguras en los insumos y en los productos para cada DMU.

La proyección en las holguras indica la cantidad de insumos que se deben disminuir, y la cantidad de productos que se deben aumentar. Las unidades eficientes tienen proyección de holguras iguales a cero.

- Proyección del modelo DEA – CCR orientado a insumos.

Esta proyección proporciona los valores adecuados para que las unidades que son ineficientes, se ubiquen en la frontera de producción.

## EJEMPLO:

Figura 21. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para proyección de modelo DEA-CCR orientado a insumos

PROYECCION DE HOLGURA EN INSUMOS Y PRODUCTOS				
DMU	insumo 1	insumo 2	producto 1	producto 2
A	2.287	0.000	0.000	0.000
B	0.000	0.000	0.000	0.000
C	4.643	0.000	9.857	0.000
D	3.510	0.000	0.000	5.750
E	0.000	0.000	0.000	0.000
F	2.674	0.000	0.000	0.000

PROYECCION MODELO DEA CCR - ORIENTADO A INSUMOS				
DMU	insumo 1	insumo 2	producto 1	producto 2
A	5.646	7.933	14.000	20.000
B	11.000	15.000	25.000	42.000
C	7.857	10.714	17.857	30.000
D	6.875	11.250	25.000	13.750
E	11.000	18.000	40.000	22.000
F	9.053	13.030	24.000	30.000

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux

### ***A.2.5.2 salida de datos modelo DEA - CCR orientado a productos***

#### **Bloque 1**

DMU – Unidad tomadora de decisiones.

CCR – EFF – Puntuación de eficiencia de cada unidad

REF SET – Conjunto de referencia de las unidades que tienen mayor peso entorno a la unidad evaluada.

#### **EJEMPLO:**

Figura 22. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para la eficiencia técnica de modelo DEA-CCR orientado a productos

EFICIENCIA DE UNIDADES			
DMU	CCR-EFF	REF SET	
A	0.9916	B E	
B	1.0000	B	
C	0.8929	B	
D	0.8654	E	
E	1.0000	E	
F	0.6515	B E	

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux

## BLOQUE 2

- Se obtiene la holgura de insumos y productos, para cada DMU ineficiente.

La proyección en las holguras indica que cantidad de insumos es lo que debemos disminuir, y que cantidad de producto debemos aumentar. Las unidades eficientes tienen proyección de holguras iguales a cero.

- Proyección modelo DEA – CCR orientado a productos.

Esta proyección proporciona los valores adecuados para que las unidades que son ineficientes, se ubiquen en la frontera de producción.

Figura 23. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0 para la proyección de modelo DEA-CCR orientado a productos

PROYECCION DE EXESOS EN (INSUMOS) Y DEFICIT EN (PRODUCTOS)				
DMU	insumo 1	insumo 2	producto 1	producto 2
A	2.287	0.000	0.000	0.000
B	0.000	0.000	0.000	0.000
C	4.643	0.000	9.857	0.000
D	3.510	0.000	0.000	5.750
E	0.000	0.000	0.000	0.000
F	2.674	0.000	0.000	0.000

PROYECCION MODELO DEA CCR – ORIENTADO A INSUMOS				
DMU	insumo 1	insumo 2	producto 1	producto 2
A	5.646	7.933	14.000	20.000
B	11.000	15.000	25.000	42.000
C	7.857	10.714	17.857	30.000
D	6.875	11.250	25.000	13.750
E	11.000	18.000	40.000	22.000
F	9.053	13.030	24.000	30.000

Fuente: Ejecución en pantalla de programa OpenDEA-1.0 en sistema operativo Linux.

## **A.3 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA OPENDEA-1.0**

### **PARA SISTEMA OPERATIVO WINDOWS**

#### ***A.3.1 Requerimientos de hardware***

- Mínimo: 1.6 GHz CPU, 384 MB RAM, resolución de 1024×768, disco duro a 5400 RPM (revoluciones por minuto).
- Recomendado: 2.2 GHz o superior, 1024 MB o más de RAM, resolución de 1280×1024, disco duro de 7200 RPM o más.
- En Windows Vista: 2.4 GHz CPU, 768 MB RAM.

#### ***A.3.2 Descarga de paquete OpenDEA-1.0***

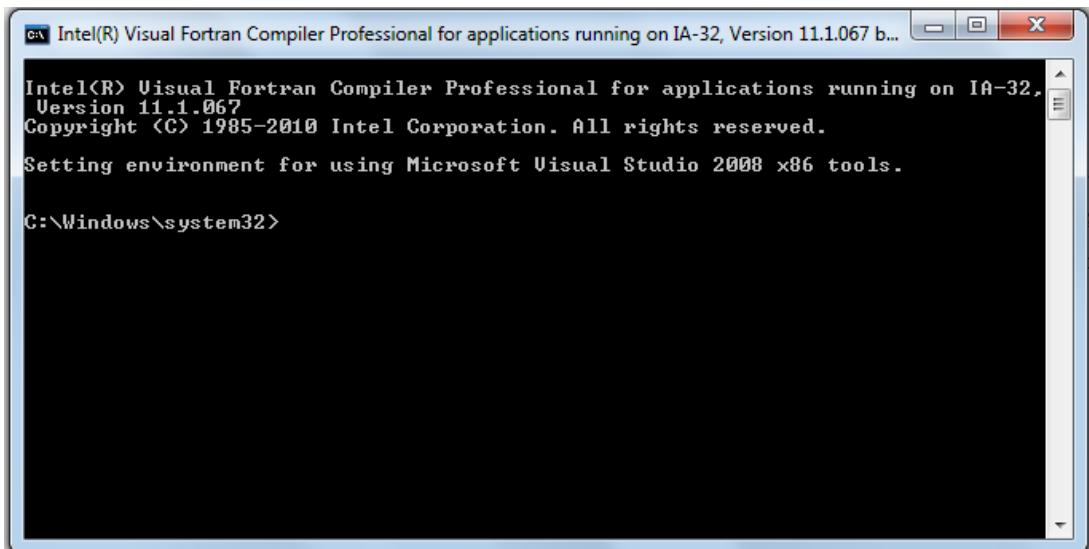
En la versión para Sistema operativo Windows debe descargarse el programa principal (opendea.f90) y la subrutina (simplex.f90) de la página: <http://opendea.sourceforge.net>. Posteriormente debe compilarse ambos programas.

#### ***A.3.3 Compilar programa***

Para compilar ambos programas (programa principal y subrutina), debe instalarse el software Visual Fortran Compiler Professional Edition, el cual puede descargarse en la siguiente página <http://intel.com>.

Una vez instalado Visual Fortran Compiler Profesional Edition, se abre el menú de inicio para seguir la siguiente ruta: Intel(R) Software Development Tools>Intel(R) Visual Fortran Compiler Professional>Fortran Build Environment. Realizado lo anterior aparece la siguiente pantalla de línea de comandos:

Figura 24. Pantalla de comandos mostrada en Sistema operativo Windows



```
Intel(R) Visual Fortran Compiler Professional for applications running on IA-32, Version 11.1.067
Copyright (C) 1985-2010 Intel Corporation. All rights reserved.

Setting environment for using Microsoft Visual Studio 2008 x86 tools.

C:\Windows\system32>
```

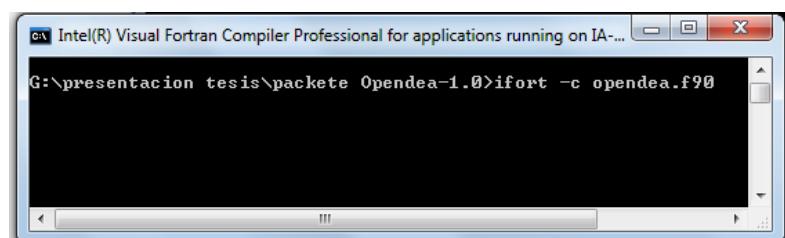
Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

Para compilar ambos programas se debe proporcionar la ruta del directorio donde se almacenan ambos programas. Realizado lo anterior se procede a compilar.

Para compilar programa principal (opendea.f90) se introduce el siguiente comando<sup>12</sup>:

```
ifort -c opendea.f90
```

Figura 25. Comando para compilar programa principal



```
G:\presentacion tesis\packete Opendea-1.0>ifort -c opendea.f90
```

Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

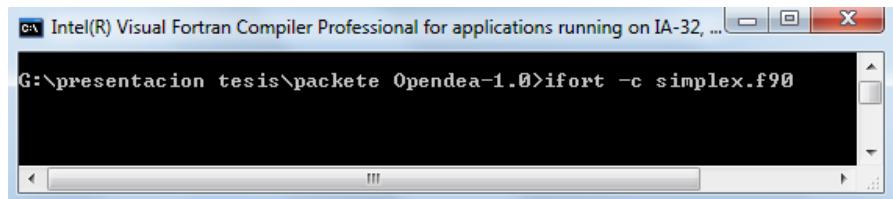
---

<sup>12</sup> Al compilar el programa principal se genera en la misma carpeta el siguiente archivo: opendea.obj

Para compilar la subrutina (simplex.f90) debe de introducirse el siguiente comando<sup>13</sup>:

```
ifort -c simplex.f90
```

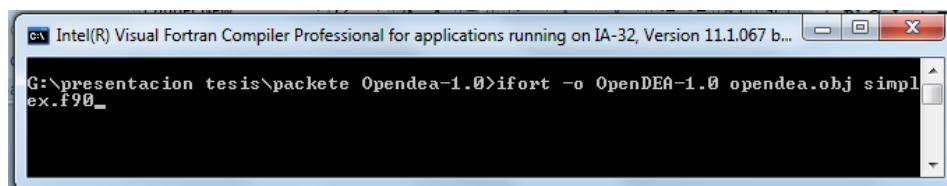
Figura 26. Comando para compilar subrutina



Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

Una vez compilado el programa principal y subrutina, se compila el ejecutable con el siguiente comando: `ifort -o OpenDEA-1.0.exe opendeda.obj simplex.obj`

Figura 27. Comando para compilar ejecutable



Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

---

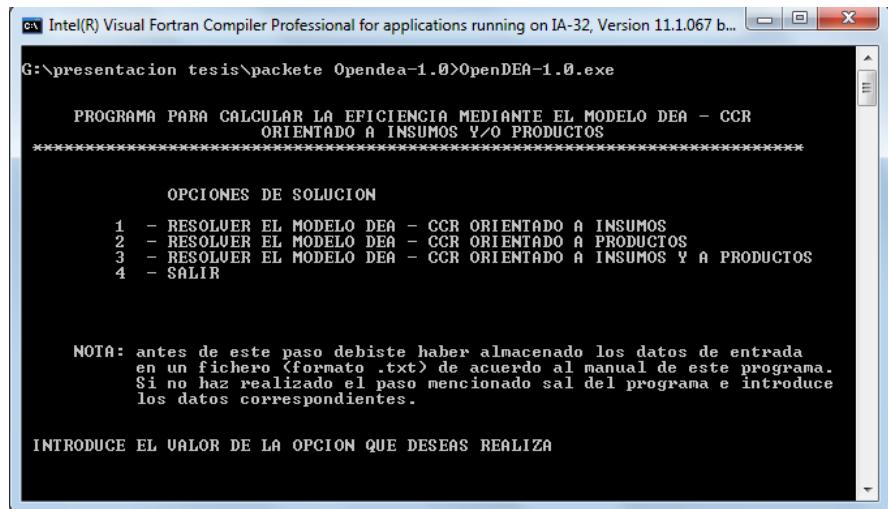
<sup>13</sup> Al compilar la subrutina se crea en la misma carpeta el siguiente archivo: simplex.obj

### **A.3.4 Ejecución del Programa OpenDEA-1.0 en Sistema operativo Windows**

Una vez creado el ejecutable, se procede a crear el fichero de datos de entrada, el cual debe almacenarse junto el programa ejecutable<sup>14</sup>.

El programa OpenDEA-1.0 se ejecuta con el siguiente comando: OpenDEA-1.0.exe

Figura 28. Ejecución en pantalla del Programa OpenDEA-1.0



Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

El menú en pantalla indica que modelo debe resolverse:

1. Resolver modelo DEA-CCR orientado a insumos
2. Resolver modelo DEA-CCR orientado a productos
3. Resolver modelo DEA-CCR orientado a insumos y a productos
4. Salir

---

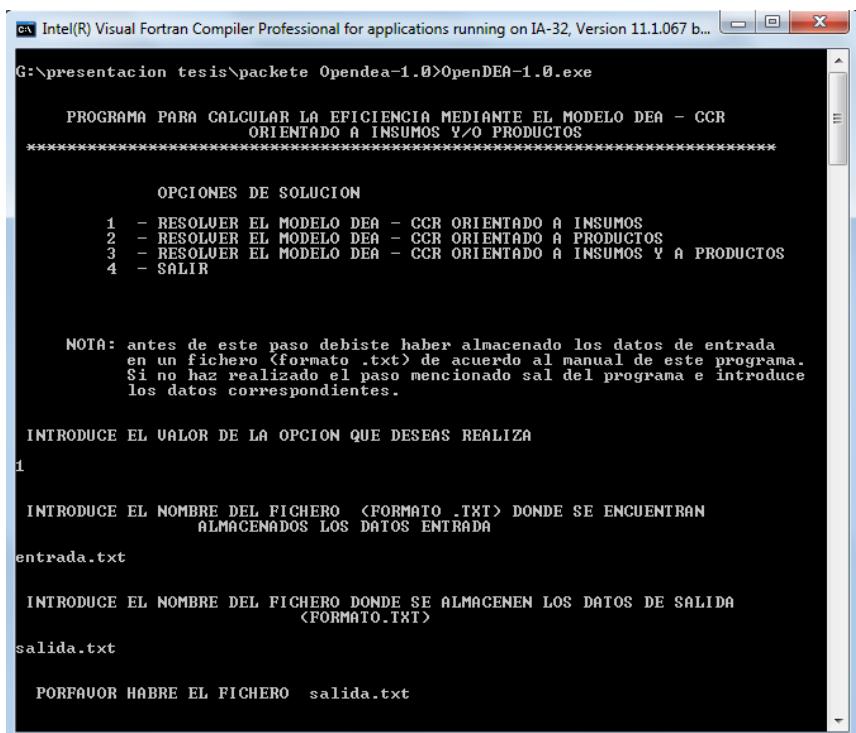
<sup>14</sup> Ambas versiones del Programa OpenDEA-1.0 (Linux y Windows), reconocen el mismo formato para los datos de entrada.

Si se introduce algún valor que esta fuera del menú, aparecerá un mensaje de error y posteriormente aparecerá el mismo menú. Si se elige alguna opción de solución del modelo DEA-CCR aparecerá el siguiente texto “Introduce el nombre del fichero donde se encuentran almacenados los datos”.

Posteriormente debe introducirse el nombre del fichero como lo marca el ejemplo.

El siguiente paso es escribir un nombre de fichero donde se desea almacenar los datos de salida que arrojara OpenDEA-1.0 (de preferencia el fichero no debe existir, de lo contrario se borra la información previa y se almacenan los datos del análisis). Si los datos de entrada son correctos, aparece la siguiente leyenda: “Por favor abre el fichero datos\_de\_salida.txt”<sup>15</sup>.

Figura 29. Pantalla mostrada por OpenDEA-1.0. Al final de la ejecución.



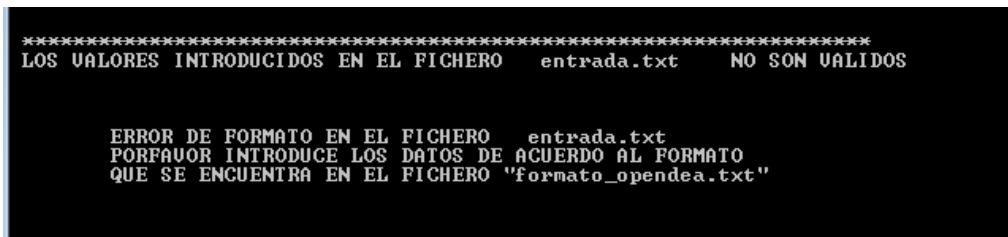
Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

---

<sup>15</sup> Ambas versiones del programa OpenDEA-1.0 (Linux y Windows) arrojan el mismo formato para la salida de datos.

Si los datos de entrada que se encuentran en el fichero son erróneos, aparecerá la siguiente pantalla.

Figura 30. Pantalla mostrando mensaje de error en la introducción de datos



Fuente: Pantalla mostrada por Sistema operativo Windows

Si aparece la leyenda en pantalla, automáticamente se crea un fichero llamado “formato\_opendea.txt” en el directorio actual de trabajo. En este fichero se encuentra el formato para los datos de entrada.