Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados Miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19

Autor: Carlos Labandeira Ocaña

Tutor: Gabriel Villa Caro

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados Miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19

Autor:
Carlos Labandeira Ocaña

Tutor:
Gabriel Villa Caro
Catedrático de Universidad

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados Miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19

Autor: Carlos Labandeira Ocaña

Tutor: Gabriel Villa Caro

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mis padres, Carlos y Alicia, que siempre me han dado todos los recursos necesarios para alcanzar todas las metas propuestas, así como el apoyo moral que siempre he necesitado frente a todas las adversidades. También han actuado de guías para ayudarme a tomar decisiones y siempre se han prestado a ayudarme. Sin ellos nunca habría sido capaz de conseguir muchísimos logros y de seguir superándome día a día de la forma en la que lo hago.

A mis hermanos, Iñigo y Marcela, por enseñarme, apoyarme y conseguir que mi vida tenga más sentido.

A mis compañeros del grado, que se han convertido en mis amigos, por ayudarme siempre que lo he necesitado y ser una fuente de motivación.

Sobre todo, a mi tutor D. Gabriel Villa Caro, que siempre me ha dedicado el tiempo que he necesitado para poder resolver mis dudas, me ha enseñado las pautas a seguir y a cómo tratar el análisis acometido en el fin de grado como nadie lo hubiera hecho.

Resumen

El objetivo de este trabajo de fin de grado es el de realizar un análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados Miembros de la Unión Europea durante la pandemia.

Se hará una introducción a la pandemia de COVID-19. Enfermedad muy infecciosa que ha llegado a acabar con la vida de más de 700,000 personas, y más de 33,000,000 casos positivos en la Unión Europea hasta el día 18 de Julio de 2021 (fecha en la comienza este estudio).

Se presenta un resumen de la enfermedad por COVID-19, la respuesta de la Unión Europea y del funcionamiento y gestión de las vacunas. Se expondrán los datos recolectados por países para acometer el análisis que serán: Población, PIB, Número de casos positivos, Número de test realizados, Media de ocupación hospitalaria, Media de ocupación UCI, Número de fallecidos, Número de vacunas recibidas y Número total de vacunados (2 pautas completas).

Para el análisis se utilizarán dos modelos; un modelo básico de Análisis Envolvente de Datos y un modelo que relaciona el Análisis Envolvente de Datos junto con la programación por objetivos.

Gracias a el primer modelo, se conocerá cuáles son los países eficientes (los que han gestionado de manera eficiente) y cuáles no. De los países no eficientes, además se obtendrá cómo podrían llegar a ser eficientes. Del segundo modelo, se verá si es posible una reducción del número total de vacunas recibidas, qué países serán los que verán sus vacunas recibidas reducidas, en qué cantidad y cómo tendrían que modificar los datos para seguir siendo eficientes según el modelo.

Una vez realizado el análisis, se tomarán conclusiones acerca de los países ineficientes: de qué manera podrían mejorar para ser eficientes, por qué son ineficientes y se buscarán relaciones en las medidas tomadas de los países ineficientes respecto a los eficientes. Se verá para qué sirve saber cuáles países son eficientes e ineficientes. Se conocerá en qué situaciones podremos utilizar la reducción de vacunas total junto con su respectiva redistribución de vacunas y las suposiciones tomadas para ello.

Abstract

The objective of this end-of-degree project is to carry out an efficiency analysis in the administration of vaccines in the Member States of the European Union during the pandemic.

An introduction to the COVID-19 pandemic will be made. Highly infectious disease that has ended the lives of more than 700,000 people, and more than 33,000,000 positive cases in the European Union until July 18, 2021 (date on which this study begins).

A summary of the response of the European Union and the operation and management of the vaccines is presented. We will expose the data collected by countries to undertake the analysis, which will be: Population, GDP, Number of positive cases, Number of tests carried out, Average hospital occupancy, Average ICU occupancy, Number of deaths, Number of vaccines received and Total number of vaccinated (2 complete guidelines).

For the analysis we will use two models; a basic model of Data Envelopment Analysis and a model that relates Data Envelopment Analysis together with goal programming.

Thanks to the first model, it will be known which are the efficient countries (those that have managed efficiently) and which ones have not. Of the inefficient ones, it will also be obtained how they could be efficient. From the second model, it will be seen if a reduction in the total number of vaccines received is possible, which countries will see their vaccines received reduced, by what amount and how they would have to modify the data to continue being efficient according to the model.

Once the analysis is done, conclusions will be drawn about the inefficient countries: how they could improve to be efficient, why they are inefficient and we will look for relationships in the measures taken by the inefficient countries with respect to the efficient ones. We will see what is the use of knowing which countries are efficient and inefficient. It will be known in which situations we will be able to use the total vaccine reduction together with its respective redistribution of vaccines and the assumptions made for it.

Índice

Agradecimientos **vii**

Resumen **ix**

Abstract **xi**

Índice **xii**

Índice de Tablas **xiv**

Índice de Figuras **xv**

1 OBJETO DEL PROYECTO **1**

2 ENFERMEDAD POR CORONAVIRUS **11**
2.1. QUÉ ES EL COVID-19 *11*
2.2. ORIGEN SARS-COV-2 *11*
2.3. VARIANTES Y FILOGENIA *12*
2.4. TRANSMISIÓN DEL COVID-19 *13*
2.5. DIAGNÓSTICO *14*
2.6. SÍNTOMAS COVID-19 *14*
2.7. PERIODOS DE LA ENFERMEDAD *15*
2.7.1. Periodo de incubación 15
2.7.2. Tiempo medio de la duración de la enfermedad 15
2.7.3. Periodo infectivo 16
2.8. LETALIDAD *16*

3 VACUNAS CONTRA LA COVID-19 **17**
3.1. FUNCIONAMIENTO GENERAL *17*
3.2. DESARROLLO DE VACUNAS *17*
3.3. EVALUACIÓN Y AUTORIZACIÓN *19*
3.4. FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICO DE LAS VACUNAS ADQUIRIDAS POR LA COMISIÓN EUROPEA *20*

4 RESPUESTA DE LA UNIÓN EUROPEA AL COVID-19 HASTA LA AUTORIZACIÓN DE LA PRIMERA VACUNA **22**

5 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DEA UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS **24**
5.1. DEA *24*
5.1.1 Introducción 24
5.1.2 Conceptos básicos 25
5.1.3 Tecnologías 26
5.1.4 Orientación 28
5.1.5 Modelos básicos DEA 29
5.1.6 Modelos con entradas y salidas no discrecionales 35
5.1.7 Modelos con entradas y salidas no deseadas 36
5.2 GOAL PROGRAMMING & DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (GoDEA) *36*
5.2.1. PLANIFICACIÓN MULTINIVEL BASADA EN OBJETIVOS 37
5.2.2. Modelo GoDEA 38

6 EFICIENCIA DE LOS PAÍSES DE LA UE FRENTE AL SUMINSTRO DE VACUNAS COVID-19 **40**
6.1. INTRODUCCIÓN *40*
6.2. DATOS *42*
6.2.1. Unidades de producción 42
6.2.2. Entradas 42
6.2.3. Salidas 47
6.2.4. Variable adicional global 48
6.3. MODELO BÁSICO DEA *49*
6.4. MODELO GoDEA *50*

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS **52**
7.1. RESULTADOS MODELO DEA *52*
7.1.1 Clasificación países eficientes e ineficientes 52
7.1.2 Proyección unidades ineficientes sobre frontera eficiente 54
7.2. RESULTADOS MODELO GoDEA *58*

8 RESUMEN Y CONCLUSIONES **66**

REFERENCIAS Y SITIOS WEB **71**

ANEXO: CÓDIGOS LINGO **74**
MODELO DEA. BCC-INPUT *74*
MODELO GODEA *76*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Entradas no discrecionales. Fuente: Elaboración propia (Eurostat, Our World in Data). 44
Tabla 2. Entradas tradicionales. Fuente: Elaboración propia (EDCD, IHME) 46
Tabla 3. Entrada global. Fuente: Elaboración propia (EDCD). 47
Tabla 4. Salida global. Fuente: Elaboración propia (EDCD). 48
Tabla 5. Valores obtenidos de θJ. Fuente: Elaboración propia. 53
Tabla 6. Entradas tradicionales datos iniciales países ineficientes. Fuente: Elaboración propia. 55
Tabla 7. Entradas tradicionales solución según modelo BCC-INPUT . Fuente: Elaboración propia. 55
Tabla 8. Porcentaje decremento entradas tradicionales. Fuente: Elaboración propia. 56
Tabla 9. Diferencia datos de Letonia respecto Croacia (1). Fuente: Elaboración propia. 57
Tabla 10. Diferencia datos de Letonia respecto Croacia (2). Fuente: Elaboración propia. 57
Tabla 11. Proyección de Luxemburgo sobre Malta. Fuente: Elaboración propia. 58
Tabla 12. Proyección de Luxemburgo sobre Malta. Fuente: Elaboración propia. 58
Tabla 13. Solución modelo GoDEA (15%). Fuente: Elaboración propia. 59
Tabla 14. Tabla 13. Solución modelo GoDEA (25%). Fuente: Elaboración propia. 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica para la tecnología CRS para el caso de una entrada y una salida. Fuente: Elaboración propia. 27

Figura 2. Representación gráfica para la tecnología VRS para el caso de una entrada y una salida. Fuente: Elaboración propia. 28

Figura 3. Representación gráfica de los tipos de Orientación. Fuente: Elaboración propia. 29

Figura 4. Esquema representación multinivel. Fuente: Athanassopoulos (1995). 37

Figura 5. Mapa Estados miembros de la Unión Europea. Fuente: Saber es práctico. 42

Figura 6. Países ordenados según θJ. Fuente: Elaboración propia. 54

Figura 7. Variación solución GoDEA (15%)(1). Fuente: Elaboración propia. 61

Figura 8. Variación solución GoDEA (15%)(2). Fuente: Elaboración propia. 61

Figura 9. Variación solución GoDEA (15%)(3). Fuente: Elaboración propia. 62

Figura 10. Variación solución GoDEA (15%)(4). Fuente: Elaboración propia. 62

Figura 11. Variación solución GoDEA (25%)(1). Fuente: Elaboración propia. 62

Figura 12. Variación solución GoDEA (25%)(2). Fuente: Elaboración propia. 63

Figura 13. Variación solución GoDEA (25%)(2). Fuente: Elaboración propia. 63

Figura 14. Variación solución GoDEA (25%)(4). Fuente: Elaboración propia. 63

Figura 15. Variación solución GoDEA (25%)(5). Fuente: Elaboración propia. 64

1 OBJETO DEL PROYECTO

La enfermedad por COVID-19 ha provocado la muerte de más de 4,000,000 de personas y más de 190,000,000 casos confirmados a nivel mundial. En el caso de Europa han sido más de 700,000 muertes y 33,000,000 de casos confirmados. Las vacunas han jugado un papel crucial para hacer frente al virus y poder reducir el número de casos, así como el número de muertes, pero estas no han sido ilimitadas, por ello este trabajo de fin de grado se centra en realizar un análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados Miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19.

Para acometer el análisis, se han seleccionado algunos de los factores más relevantes entre los que se encuentran: Población, PIB, Número de casos positivos, Número de test realizados, Media de ocupación hospitalaria, Media de ocupación UCI, Número de fallecidos, Número de vacunas recibidas y Número total de vacunados (2 pautas completas). El periodo en el que se recolectan los datos comprende desde que se conocen los primeros contagios hasta el día 18 de Julio de 2021, fecha en la que comienza este estudio.

Con el análisis de eficiencia se buscará dar respuesta a las siguientes preguntas: ¿Qué países según los datos obtenidos son eficientes (resultados obtenidos son eficientes en cuanto a los recursos dados), y cuáles no? ¿Cómo podrían los países ineficientes llegan a ser eficientes? ¿Sería posible una reducción total de vacunas?. En el caso que fuera posible la reducción total de vacunas, ¿qué países serían los que verían las vacunas recibidas disminuidas?

También se verá de qué manera puede ayudar una reducción total de vacunas recibidas y conocer cuáles países serían los que verían reducidas sus vacunas. Se verán relaciones entre los países ineficientes con las políticas tomadas. También sabiendo qué países son eficientes y qué países ineficientes, se verá cómo puede aportar esta información a una mejor administración de vacunas, así como a mejorar la gestión de cada país.

Se plantea el problema bajo dos enfoques diferentes, un modelo tradicional del Análisis Envolvente de Datos (DEA), y un modelo híbrido que relaciona el Análisis Envolvente de Datos con la programación por objetivos (GoDEA). Estos modelos se resolverán a través del paquete de optimización LINGO 19.0 .

Gracias a el primer modelo básico (DEA), se medirá la eficiencia en la gestión frente a la COVID-19 de todos los países, con lo que obtendremos países que son eficientes y otros que son ineficientes. Para estos últimos, se conocerán cuáles serían los datos que deberían tener para llegar a ser

eficientes. Cabe destacar que en los modelos, no se comparará la gestión de un país con la de todos, porque los países tienen tamaños diferentes, por ello vamos a comparar los de tamaño similar (en cuanto a población o PIB). El segundo modelo (GoDEA), el objetivo que se impone será el de reducir el número total de vacunas suministradas a todos los países. Con este modelo, se conocerá si es posible la reducción total de las vacunas recibidas, qué países propone el modelo que se les haga la reducción de vacunas y en qué cantidad. Además de conocer los países que verían reducidas sus vacunas, se verá cómo tendrían que modificar los datos para seguir siendo eficientes según el modelo.

El trabajo de fin de grado queda estructurado como sigue: en una primera parte, se hace una breve introducción a la enfermedad por COVID-19 (origen, variantes, transmisión, diagnóstico, síntomas, períodos y letalidad). Después, se verá el desarrollo, funcionamiento y evaluación de las vacunas y se conocerá la respuesta de la Unión Europea a la pandemia. Posteriormente, se explicarán los dos modelos que vamos a utilizar, se presentarán los datos recolectados y se expondrán los modelos por escrito que se introducirán en lingo (a parte se presenta el código introducido en Lingo en el anexo). A continuación, se hará un análisis de los resultados obtenidos y tomaremos conclusiones con estos. Por último, en el capítulo de referencias podemos encontrar los estudios realizados hasta la fecha referentes a la COVID-19, que fundamentan los análisis y resultados obtenidos en el presente trabajo.

2 ENFERMEDAD POR CORONAVIRUS

2.1. QUÉ ES EL COVID-19

El COVID-19 es una enfermedad infecciosa causada por el SARS-CoV-2 (coronavirus de tipo 2 que causa el síndrome respiratorio agudo severo). El SARS-CoV-2 es el séptimo coronavirus en seres humanos, es una subfamilia de virus ARN monocatenario positivos (virus que tiene ácido ribonucleico ARN, de cadena sencilla de sentido positivo y no se replica usando ADN intermedio), pertenece a la familia Coronaviridae. Se denominan coronavirus por una especie de picos en la superficie del virus que parecen una corona y pueden afectar tanto a aves y mamíferos como al ser humano.

Ya han existido otros coronavirus en el pasado destacando el SARS-CoV (por eso se llama el virus del COVID-19 SARS-CoV-2, ya que la secuencia genética es similar), que apareció por primera y única vez en el 2002, ocasionando un brote con más de 8,000 personas infectadas y 800 muertes. Hay que destacar también el MERS-CoV (el síndrome respiratorio de Oriente Medio), que fue detectado por primera vez en Arabia Saudita en 2012 y está asociada a los camellos.

2.2. ORIGEN SARS-COV-2

No se conoce con certeza ni cómo, ni cuándo, ni dónde apareció el SARS-CoV-2, pero es un virus muy parecido a otros coronavirus que se han aislado en murciélagos. Por lo tanto, siguiendo los estudios es muy probable que el virus SARS-CoV-2 haya pasado al humano proviniendo de un murciélago y pasando por un mamífero como intermediario.

Él primer brote se asocia a un mercado de animales silvestres en Wuhan, capital de Hubei, en China. Concretamente el primer caso notificado es el de un trabajador del citado mercado, que ingresó en el hospital el 26 de diciembre de 2019. Así se encuentra el séptimo coronavirus capaz de infectar a humanos. Aunque, una misión dirigida por la OMS llegó a la conclusión de que el mercado fue el origen del brote, sino que lo intensificó, y que los primeros casos ocurrieron antes y fuera del mercado.

Se habló también de la posibilidad de que surgiera en un laboratorio debido a la acción humana, aunque por diversas investigaciones esta posibilidad se descarta casi por completo.

Por tanto, hay dos teorías sobre el origen del SARS-CoV-2. La primera es que por selección natural en el animal, el virus reunió sus actuales características genéticas para posteriormente pasar a los humanos. La segunda sugiere que las características genéticas del virus se dieron ya en humanos, y que haya mutado y se haya convertido en el virus que conocemos después de pasar de animales a humanos.

Por ello, en el caso de que la primera teoría fuera la correcta, aumentaría la posibilidad de que se produzcan más brotes en el futuro porque la cepa que causa la enfermedad podría seguir circulando entre animales. (Instituto de Salud Carlos III, 2020)

2.3. VARIANTES Y FILOGENIA

El SARS-CoV-2 evoluciona más lento que otros virus ARN conocidos como el de la gripe o el VIH, ya que el SARS-CoV-2 posee un mecanismo para corregir errores de replicación que otros virus ARN no tienen. La tasa de evolución del SARS-CoV-2 es aproximadamente de dos cambios de nucleótidos (moléculas del interior de las células que transmiten información genética) al mes, por lo que no se espera una evolución similar al virus de la gripe y motivo por el que exista una gran homología entre los genomas (conjunto completo de instrucciones del ADN que se hallan en una célula) completos de SARS-CoV-2.

Pese a esto, hay varias mutaciones respecto a la secuencia de referencia. Se han detectado mutaciones repetidas surgidas de manera independiente, por lo que hay indicios de que el virus se encuentra en fase de adaptación a un nuevo huésped.

GISAID, proyecto internacional para compartir datos genómicos del virus de la gripe y del SARS-CoV-2, alberga en la base de datos más de 830,000 secuencias de SARS-CoV-2 a día 21 de junio de 2021. Estas secuencias se agrupan en clados (grupos de variantes que comparten antepasado), y GISAID propone 8 clados en los que sería posible clasificar el 95% de las secuencias detectadas.

Según el proyecto (GISAID, Nextstrain, Rambaut) se propone un sistema de nomenclatura u otro. GISAID reconoce cada clado con una letra, Nextstrain nombra a cada clado con el año de aparecimiento seguido de una letra. Por el contrario, Rambaut reconoce dos linajes diferentes: A y B. Para nuevos linajes que desciendan de los dos anteriores se les sigue con un número (Ministerio de Sanidad, 2021).

La OMS define a las variantes que tienen un mayor impacto (transmisibilidad aumentada, peor tratamiento, mayor letalidad, menor capacidad de respuesta inmune o menor sensibilidad de los métodos de diagnóstico) como VOC (por sus siglas en inglés, variant of concern) y las variantes de interés (presentan cambios fenotípicos en situaciones de transmisión en distintas agrupaciones o presencia en diferentes países) como VOI (variant of interest).

2.4. TRANSMISIÓN DEL COVID-19

El virus SARS-CoV-2 se puede propagar de diferentes maneras de una persona a otra. Puede propagarse a través de pequeñas partículas líquidas que tienen diferentes tamaños, las «gotículas respiratorias» son las de mayor tamaño, y los «aerosoles» las de menor.

Por lo tanto, las formas principales de propagación son:

- Deposición de partículas sobre ojos, nariz o boca, sobre todo por aspersiones generadas al toser o estornudar.
- Inhalación de partículas por cercanía de una persona infectada.
- Tocarse ojos, nariz o boca con las manos contaminadas con el virus.

Tener o no síntomas no influye en la transmisión del virus, todas los infectados pueden transmitirlo. Incluso, las personas infectadas son más contagiosas justo antes de que aparezcan los síntomas. Esto lo diferencia del SARS (síndrome respiratorio agudo grave causado por el coronavirus SARS-CoV-2), ya que el SARS solo se transmite cuando la persona presenta síntomas.
Los entornos donde el virus se transmite mayor facilidad:

- Situaciones de contacto cercano, sobre todo cuando las personas conversan muy próximas entre si (distancia menor de un metro).
- Espacios cerrados y con poca ventilación (los aerosoles permanecen suspendidos en el aire varias horas y viajan a distancias superiores a un metro, distancia larga).
- Lugares concurridos.

Si se cumplen todos los entornos, el riesgo es muy elevado.

La estimación de la tasa de contacto (R0) es de 1.4 a 2.5 aunque otras estimaciones hablan de un rango entre 2 y 3. La tasa de contagio sirve para cuantificar la intensidad de una enfermedad infecciosa, y es el número de casos, en promedio, que van a ser causados por una persona infectada durante el período de contagios. Para tener una epidemia controlada se necesita la R0 por debajo de 1. Esta estimación ha sido realizada por la OMS. Como aproximación el 20% de los casos es el

responsable del 80%. (Organización Mundial de la Salud, 2021).

2.5. DIAGNÓSTICO

Podremos encontrarnos con que la infección esté activa para lo que se buscará el virus o que la infección ya haya pasado, en cuyo caso se buscarán anticuerpos:

- Infección activa: El virus se encuentra principalmente en las vías respiratorias. Para ello disponemos de varias opciones, la más conocida es la prueba PCR (prueba de diagnóstico que permite detectar un fragmento del material genético de un patógeno). Mediante esta prueba se localiza y amplifica un fragmento de material genético que en el caso del coronavirus es una molécula de ARN, y para realizarla se requiere de una frotis de nariz, garganta o faringe.

  Como alternativas a la prueba PCR están los test rápidos de antígenos. Estos detectan proteínas del virus, son capaces de detectar a personas con alta carga viral y por lo tanto altamente infecciosas, tienen la ventaja de ser más rápidos pero son menos sensibles. Estos test de diagnóstico rápido se basan en una inmunocromatografía en papel (una plataforma que tiene 'pegados' las proteínas del virus para detectar anticuerpos específicos para detectar las proteínas del virus).

- Infección pasada: Las pruebas serológicas (comprueban la presencia o nivel de anticuerpos específicos en la sangre) son las que se están usando. Solo necesitan una muestra de sangre, pero varían mucho en sensibilidad (capacidad de detectar casos positivos) y especificidad (capacidad de diferenciarlo de otros virus). Así que se interpretan los resultados con cautela. Aunque se tenga anticuerpos, no se garantiza que se tenga inmunidad contra el COVID-19.

2.6. SÍNTOMAS COVID-19

Los síntomas pueden variar de un paciente a otro, aunque la mayoría de las personas infectadas la enfermedad será de leve a moderada y no tendrán necesidad de hospitalización.

Síntomas más comunes:

- Fiebre.
- Tos.
- Cansancio.
- Pérdida del gusto o el olfato.

Síntomas menos comunes:

- Dolor de garganta.
- Dolor de cabeza.
- Dolores y molestias.
- Diarrea.
- Erupción en la piel o decoloración de los dedos de las manos o pies.
- Ojos rojos o irritados.

Síntomas graves:

- Dificultad para respirar o falta de aire.
- Pérdida del habla o la movilidad, o confusión.
- Dolor en el pecho.

(Organización Mundial de la Salud, 2021).

2.7. PERIODOS DE LA ENFERMEDAD

2.7.1. Periodo de incubación

Es el tiempo comprendido entre la exposición a un agente biológico, y la aparición de los síntomas. El tiempo mediano es de 5.1 días (IC 95% 4.5 a 5.8) y a los 11.7 días el 95% de los casos sintomáticos han desarrollado síntomas.

2.7.2. Tiempo medio de la duración de la enfermedad

Es el tiempo desde que aparecen los síntomas hasta la recuperación. Este tiempo depende de la gravedad de la enfermedad. Si la enfermedad ha sido leve es de 2 semanas desde que aparecen los síntomas para la recuperación y de 3 a 6 semanas cuando ha sido grave. La aparición de síntomas graves tales como la hipoxemia (disminución anormal de la presión parcial de oxígeno en la sangre arterial por debajo de 60 mmHg) tarda 1 semana desde la aparición de síntomas, y pueden pasar de 2 a 8 semanas hasta que se produzca el fallecimiento.

2.7.3. Periodo infectivo

Es el periodo en el que un caso puede transmitir la infección a otra persona. Para pacientes que tienen síntomas leves, la carga viral prácticamente desaparece a los 10 días del inicio de los síntomas, teniendo el pico de carga viral durante los primeros 5-6 días. La probabilidad de transmitirlo a partir de la primera semana de tener síntomas es muy baja, incluso pudiéndose detectar el virus mediante PCR. Para personas con síntomas más graves la carga viral puede ser de hasta 60 veces mayor que las personas con síntomas más leves, así la carga viral sería más duradera e intensa, durando más allá incluso de la tercera semana.

2.8. LETALIDAD

Según un análisis de 72,342 casos diagnosticados en China, la enfermedad es leve para el 81% de los pacientes, un 14% presenta síntomas más graves, y un 4-5% entra en estado crítico. Datos más recientes de catorce países europeos indican que alrededor del 40% de casos confirmados han sido hospitalizado, y que 2% de dichos casos acaba en cuidados intensivos.

Los datos iniciales apuntaban a una tasa de letalidad alrededor del 2%, pero estas primeras estimaciones no incluían los casos asintomáticos o los casos sintomáticos, pero no diagnosticados. Un estudio más reciente estima que la tasa ajustada de mortalidad en China fue del 1.4% para los casos confirmados y del 0.66% si se incluyen casos infectados, pero no diagnosticados.

La mayor parte de las muertes son las producidas en personas mayores de 65 años y/o aquellas que ya tenían alguna otra enfermedad o condición crónica. Como principales factores de riesgo caben destacar la hipertensión, la diabetes, la enfermedad cardiovascular y la obesidad.

3 VACUNAS CONTRA LA COVID-19

3.1. FUNCIONAMIENTO GENERAL

Ante una infección viral, el sistema inmune detecta su presencia y produce dos tipos de respuesta: por un lado, produce anticuerpos (proteínas) que se unen a las proteínas del virus para neutralizarlo evitando así la infección de nuevas células; por otro lado, estimula unas células llamadas citotóxicas, que reconocen las células que han sido infectadas por el coronavirus y las matan antes de que liberen más virus en el organismo.

Por tanto, las vacunas preparan al sistema inmune para reconocer y defenderse de virus y bacterias cuyo funcionamiento ha sido imitado por las vacunas.

En el caso del virus SARS-CoV-2, la proteína crítica que permite que el virus infecte y se multiplique en personas es la proteína S (spike o espícula), por lo que la mayoría de las vacunas están ligadas a generar respuesta a esta proteína.

La proteína S es una glucoproteína plasmática que depende de la vitamina K sintetizada en el hígado. Se puede encontrar esta proteína de dos formas: una forma libre y una forma unida al complemento C4b.

Entonces, las vacunas contienen la proteína S, la cual se puede producir en un laboratorio, puede aislarse del virus, o introducir su secuencia genética en un vector (mRNA). Las vacunas nunca van a causar la enfermedad COVID-19, ya que no tienen el virus completo.

Cuando se vacuna una persona, el sistema inmune reconoce la proteína viral como un agente extraño y produce una respuesta de anticuerpos y de células citotóxicas específica (tipo de célula inmunitaria capaz de destruir ciertas células como células cancerosas y células infectadas por un virus) frente a la proteína S. Así, si una persona después de recibir la vacunación se infecta, los anticuerpos y las células citotóxicas producidas por la vacuna se unen a la proteína S del virus bloqueando la infección y evitando la enfermedad clínica.

3.2. DESARROLLO DE VACUNAS

El tiempo medio de desarrollo de una vacuna es de entre cuatro y siete años. Se ha logrado la vacuna frente a la COVID-19 en menos de un año y sin comprometer los estándares de calidad, seguridad y eficacia.

La rapidez consiguiendo la vacuna puede explicarse con varias razones:

- Los laboratorios farmacéuticos producen vacunas a riesgo. Lo que significa que están fabricando los modelos antes de conocer los resultados de los ensayos clínicos y sin saber si sus propuestas de vacuna van a ser autorizadas por la Agencia Europea de Medicamentos (EMA). Con esto se consigue que una vez que la vacuna se autorice, se pueda utilizar masivamente casi de inmediato.
- Se han hecho intentos para optimizar todas las etapas de desarrollo tanto como sea posible para que se puedan utilizar las vacunas en la mayor brevedad. Por ejemplo, las agencias de medicamentos han permitido que la primera dosis de vacunas esté etiquetada únicamente en inglés en lugar de cada idioma oficial de los países de la UE. Aparentemente es un pequeño cambio que puede parecer de poca relevancia, pero desde el punto de vista logístico se evitan retrasos en la disponibilidad de vacunas.
- Sobre la base de la experiencia anterior para avanzar en el desarrollo de la vacuna se han solapado fases de investigación en la experimentación en animales y en humanos.
- La CE ha adaptado las normas de la Unión Europea a la urgencia actual con el fin de acelerar el desarrollo.
- No se ha partido de cero, ya que se disponía de una amplia y probada experiencia sobre el desarrollo de vacunas con garantías de calidad, seguridad y eficacia. Los Estados de todo el mundo, junto a ONG y coaliciones internacionales como CEPI y GAVI, están apoyando esta investigación movilizando recursos como nunca se había hecho, financiando la producción para poder disponer de millones de dosis en el menor tiempo posible.
- Algunas vacunas se han desarrollado con métodos idénticos a los utilizados para otras, por lo que se podrán utilizar las estructuras existentes para fabricar vacunas. Otras se han fabricado utilizando métodos nuevos que son capaces de aumentar el volumen y acelerar la velocidad de producción.

El desarrollo de la vacuna se divide en 5 etapas:

1. Fase Preclínica, se comienzan con los estudios in vitro (realizados en un laboratorio) y los estudios un vivo (realizados en animales), donde se demostrar que las vacunas no producen reacciones adversas inesperadas.
2. Ensayo clínico de Fase I, se comprueba inicialmente que el fármaco es seguro

3. Ensayo clínico de Fase II, se empieza a asegurar si el fármaco funciona como según lo previsto. Se realiza la búsqueda de la dosis adecuada y el intervalo de tiempo más apropiado entre una y otra dosis.
4. Ensayo clínico de Fase III, se verifican los aspectos de seguridad y eficacia.
5. Ensayo clínico de Fase IV, se realiza el seguimiento para investigar los efectos a largo plazo una vez el medicamento se ha comercializado.

En este desarrollo se están solapando fases que usualmente se hacen de manera secuencial, estas fases son la preclínica y la fase I, II, y III. Así las fases se están cumpliendo de manera más rápida que para otras vacunas.

3.3. EVALUACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Se lleva a cabo un llamado procedimiento centralizado en el que cuando el medicamento esté aprobado, las vacunas pueden comercializarse en todo el territorio europeo.

Normalmente, se debe presentar una solicitud de autorización de comercialización y luego la EMA hará una evaluación de la vacuna utilizando todos los datos. La documentación necesaria debe estar preparada antes de la solicitud de autorización de comercialización. Pero para la vacuna contra la COVID-19 se realiza mediante un proceso llamado *rolling review* en el que se evaluaran los datos conforme se van desarrollando. La EMA activa este proceso, y consiste en que no hay que esperar a que la empresa disponga de todos los datos y documentación para enviar la solicitud y que posteriormente se evalúen, si no que el Comité de Medicamentos de Uso Humano (CHMP), comité perteneciente a la EMA, evalúa los datos conforme se van desarrollando, y decidirá cuando hay datos disponibles suficientes. Una vez que el CHMP decida que existen datos suficientes, avisará a la empresa para que presente una solicitud formal de autorización de comercialización. Así se consigue reducir notablemente los plazos normales de evaluación, a la vez que se respetan los principios de calidad, seguridad y eficacia.

Una vez que la EMA emite una recomendación positiva y la empresa haya presentado la solicitud, la vacuna puede ser autorizada en el mercado de la UE por la Comisión Europea. La Comisión es jurídicamente responsable de la autorización de comercialización y verifica la solidez de todos los elementos en los que se basa la autorización. Además la Comisión, consulta a los Estados miembros, y cuando una mayoría de Estados miembros está a favor, la Comisión adopta su decisión.

La EMA evalúa los datos con vistas a expedir una autorización condicional de comercialización, que difiere a una autorización condicional estándar. Este tipo de autorización garantiza que se ha

demostrado la seguridad, la eficacia y la calidad de la vacuna y que sus beneficios prevalecen sobre sus riesgos, al tiempo que permite a sus desarrolladores presentar datos adicionales también después de haberse autorizado la comercialización (contrariamente a una autorización normal de comercialización, para la que todos los datos se presentan antes de concederla).

La autorización condicional de comercialización es válida durante un año y renovable, el titular de la autorización condicional de comercialización tiene además obligaciones, como la de completar los estudios o realizar otros nuevos en un plazo determinado, para que la relación beneficio-riesgo siga siendo favorable.

Existe la autorización de emergencia de la que hacen usos muchos países, mediante el cual se autoriza el uso temporal de un medicamento en una situación de emergencia sanitaria. Así se permite el uso temporal de una vacuna no autorizada. Sin embargo, dicta mucha distancia respecto a la autorización condicional de comercialización de la UE, (Comisión Europea, 2021).

3.4. FUNCIONAMIENTO ESPECÍFICO DE LAS VACUNAS ADQUIRIDAS POR LA COMISIÓN EUROPEA

El funcionamiento de las vacunas es general, es decir, todas están diseñadas para que el cuerpo detecte la presencia de la proteína S, que es exclusiva del virus, y responda produciendo defensas naturales como ya hemos explicado. La diferencia entre unas y otras vacunas se encuentra en la manera que tienen de introducir en tu cuerpo la proteína S (Instituto de SaludGlobal Barcelona, 2021).

- Vacunas de ácidos nucleicos (ARNm): Biontech/Pfizer, Moderna y CureVac. Para fabricar la proteína S se utiliza una molécula de ARN mensajero (mRNA) que porta la información necesaria codificada para fabricar la proteína S.
- Vacunas a base de proteínas: Sanofi y GSK. Este tipo de vacunas contienen fragmentos de la proteína S exclusiva del virus, suficiente para que el sistema inmunitario de la persona reconozca que esta proteína no debería estar presente en el organismo y responda creando defensas naturales.
- Vacunas de vectores víricos o vacunas de virus activado: Astrazeneca y Johnson&Johnson. Utilizan un virus distinto e inofensivo pero que da las “instrucciones” del virus causante de la COVID-19, de forma que las células del organismo produzcan la proteína S, después al igual que con las demás vacunas, el sistema inmunitario reconoce que la proteína no debería estar en el organismo y responde produciendo defensas naturales.

- Vacunas de virus inactivado: Valneva. Es una vacuna de virus inactivado, hecha través de la inactivación química del virus vivo. Se trata de una tecnología de vacunas tradicional que se utiliza desde hace sesenta o setenta años, con métodos establecidos y un nivel elevado de seguridad. Las vacunas contra la gripe y muchas vacunas infantiles utilizan esta tecnología.

4 RESPUESTA DE LA UNIÓN EUROPEA AL COVID-19 HASTA LA AUTORIZACIÓN DE LA PRIMERA VACUNA

Todo comenzó en diciembre de 2019, cuando se informó de que Wuhan, China, era la fuente de un brote de una enfermedad causada por un nuevo coronavirus, que desde entonces se ha extendido a otras regiones de China y del mundo. Así la Organización Mundial de la Salud (OMS), reconoce el nuevo coronavirus como SARS-CoV-2, y a la enfermedad vírica correspondiente como COVID-19.

El 28 de enero, la presidencia del Consejo de la UE activa la Respuesta Política Integrada a las Crisis (RPIC). Un mecanismo mediante el cual se pretende coordinar la respuesta a la crisis a modo de puesta en común de información, y la Comisión y el Servicio Europeo de Acción Exterior van realizando informes y análisis de la situación. Con esto, el 7 de febrero se organiza una videoconferencia para revisar la situación del brote, y el 13 de febrero los ministros de sanidad piden a la comisión europea que tome una serie de medidas.

El 21 de febrero de 2020, hubo un aumento de casos de COVID-19 dentro de la UE, especialmente en el norte de Italia. País que solicitó a la Unión Europea envío de ayudas, pero hasta el 11 de marzo no recibió ninguna respuesta por parte de los países europeos, lo que criticó como falta de solidaridad.

El día 13 de marzo, cuando la situación en China ya había mejorado, la OMS declaró a Europa el nuevo epicentro del virus y no es hasta el 17 de marzo, a pesar de que muchos políticos europeos como Marine Le Pen, llevaban tiempo solicitando y de que países como Eslovaquia y Dinamarca hubieran anunciado ya el cierre completo de fronteras nacionales, cuando se aplica la restricción temporal coordinada de los viajes no esenciales a la UE durante treinta días. Solamente se mantiene el tráfico prioritario. El 17 de marzo coincide con el día en el que todos los países de Europa han informado al menos un caso.

Fue en el mes de marzo, cuando la mayoría de los países comenzaron con el cierre de escuelas, universidades, lugares públicos no esenciales, cierres de localidades… Para posteriormente anunciar el cierre nacional.

En abril, el Banco Central Europeo (BCE) adoptó un programa de compra de títulos para evitar el

colapso de los mercados de deuda, con lo que se contribuyó a estabilizar la situación financiera y así poder hacer frente a la crisis. También, por primera vez, se aprobó la "cláusula general de salvaguarda", para que los gobiernos pudieran inyectar tanto dinero como fuera necesario en la economía.

La medida más importante ocurrió el 21 de julio de 2020, cuando los 27 socios de la Unión Europea, por unanimidad, acordaron un fondo de reactivación para paliar los daños económicos dotado con 750,000 millones de euros y un marco financiero de más 1,000 millones de euros para 2021-2027.

El 21 de diciembre de 2020, se autoriza el uso en la UE de la primera vacuna contra la COVID-19, la vacuna Tozinameran, cuyo nombre comercial es Comirnaty, vacuna basada en ARNm. Fue desarrollada por la empresa alemana de biotecnología BioNTech, laboratorio que había recibido más de 9 millones de euros de financiación por parte de la UE, además de un préstamo de 100 millones de euros del Banco Europeo de Inversiones (BEI), respaldado por la UE.

5 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DEA UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS

Se va a explicar brevemente el Análisis Envolvente de Datos (DEA), del cual vamos a utilizar el modelo básico BCC-INPUT. Además de este modelo vamos a hacer uso del modelo híbrido GoDEA, modelo que relaciona el Análisis Envolvente de Datos junto con la programación por objetivos.

5.1. DEA

5.1.1 Introducción

El Análisis por Envoltura de Datos (DEA: Data Envelopment Analysis), es una técnica que se utiliza para evaluar la eficiencia relativa de una serie de elementos, estos elementos son conocidos como "Unidades de Toma de Decisión" (DMU: Decision Making Unit). La metodología está basada en modelos de programación lineal y fue expuesta por primera vez en 1978 (Charnes et al, 1978).

Se evaluará la eficiencia relativa de cada Unidad de Toma de Decisión teniendo en cuenta una serie de entradas y salidas. Las entradas son los recursos consumidos de la DMU, y las salidas son las producciones. Estas entradas y salidas deben de ser medibles en unidades homogéneas para que las DMU's puedan ser comparables.

Primero se identificará el conjunto de posibilidades de producción del problema para lo que las dos alternativas más frecuentes que son las tecnologías Retornos de Escala Constantes (Constant Return to Scale, CRS) y Retornos de Escala Variables (Variable Return to Scale, VRS). La tecnología CRS considera unidad admisible a cualquier combinación lineal de las DMU's y la tecnología VRS sólo considera admisible las combinaciones lineales convexas. A continuación se escogerá el modelo más apropiado para la resolución del problema.

Así tendremos diferentes posibilidades para cada DMU:

- Unidad eficiente: Ningún punto domina a dicha DMU, es eficiente a la hora de los recursos que está utilizando y la producción que está generando. Tiene la mayor productividad en el caso de CRS, y tiene la mayor productividad dentro de las de su mismo tamaño para el caso VRS.
- Unidad no eficiente: Habrá unidades que la dominen (unidades que tengan más entradas y/o menos salidas según la tecnología). El modelo la proyectará sobre la frontera eficiente y medirá la eficiencia de la DMU con la reducción del consume de las entradas e incremento de producción en salida.

La proyección de las unidades de producción para que lleguen a ser eficientes dependerá de la orientación del modelo que podrá ser de entrada o de salida.

5.1.2 Conceptos básicos

Se van a definir los conceptos fundamentales sobre los que se basan los modelos del DEA.

Unidad productiva.

Cualquier organización que tenga la capacidad para crear producción (salidas) consumiendo ciertos recursos (entradas) y sea capaz de modificar tanto entradas como salidas. Las unidades de producción también son llamadas DMUs. Ejemplo de DMUs: diferentes fábricas de un mismo tipo de producto.

Productividad.

La productividad de una unidad productiva es la relación que existe entre la producción creada (salidas) y los recursos consumidos para ello (entradas), de esta manera se puede ver cómo se aprovechan dichos recursos (Farrel, 1957).

Así queda la productividad definida para el caso de una sola entrada y salida:

$$Productividad = \frac{Producción\ creada}{Recurso\ consumido} = \frac{Salida}{Entrada}$$

En la realidad se tendrán casos de varias entradas y varias salidas. Definiremos pesos para cada entrada y salida dependiendo de la relevancia en la producción de cada una, así la expresión de la productividad será el cociente entre la suma ponderada de las salidas y la suma ponderada de las entradas. La cantidad de entrada o recurso ‘i’ correspondiente a la unidad ‘j’ tendrá el correspondiente peso uij y xij será cantidad de entrada o recurso. La cantidad de salida o resultado ‘k’ correspondiente a la unidad ‘j’ tendrá como peso vkj y cantidad de salida o resultado ykj. Obteniendo la expresión:

$$Productividad = \frac{Suma\ ponderada\ de\ salidas}{Suma\ ponderada\ de\ entradas} = \frac{\sum_{k=1}^{s} v_{kj} y_{kj}}{\sum_{i=1}^{m} u_{ij} x_{ij}}$$

Hasta ahora se ha visto la productividad para una unidad productiva con varias entradas y varias salidas, pero lo interesante es poder comparar unas unidades de producción con otras, para lo que introducimos el concepto de eficiencia relativa.

Eficiencia relativa

Para el cálculo de la eficiencia de una unidad productiva j, se hace el cociente entre la productividad de dicha unidad y una productividad de una unidad de referencia. Dependiendo de la unidad de referencia que escojamos se puede obtener:

- Eficiencia técnica: Se escoge como unidad de referencia la de mayor productividad de entre las unidades del tamaño de la unidad j.

- Eficiencia global: La unidad de referencia será la de mayor productividad de entre las que estén en estudio.

Con esto podemos definir también la eficiencia de escala que será el cociente entre la eficiencia global y la eficiencia técnica.

5.1.3 Tecnologías

5.1.3.1 Retornos de Escala Constante (CRS: Constant Return to Scale)

Para cualquier unidad se toma como DMU de referencia la de mayor productividad de entre las observadas sin importar el tamaño, por lo tanto, se calcula la eficiencia global (Villa, 2022).

El conjunto de puntos admisibles, al que se llama tecnología, queda definido como:

$$T_{CRS} = \left\{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}\mathrm{X} \leq \vec{x}; \vec{\lambda}\mathrm{Y} \geq \vec{y}\right\}$$

Donde:

- $\vec{\lambda}$: Es un vector que tendrá las mismas componentes que DMU's existen en el problema. Representa los coeficientes de la combinación lineal entre las entradas y las salidas.
- X: representa la matriz de entrada que tendrá tantas columnas como entradas y tantas filas como DMU's.
- Y: será la matriz de salida y que por tanto tendrá tantas columnas como salidas y tantas filas como DMU's.

Para una mejor comprensión de la tecnología CRS, se representa gráficamente un caso en el que se tiene una sola entrada y salida para cada DMU y se verá el conjunto de puntos admisibles (tecnología).

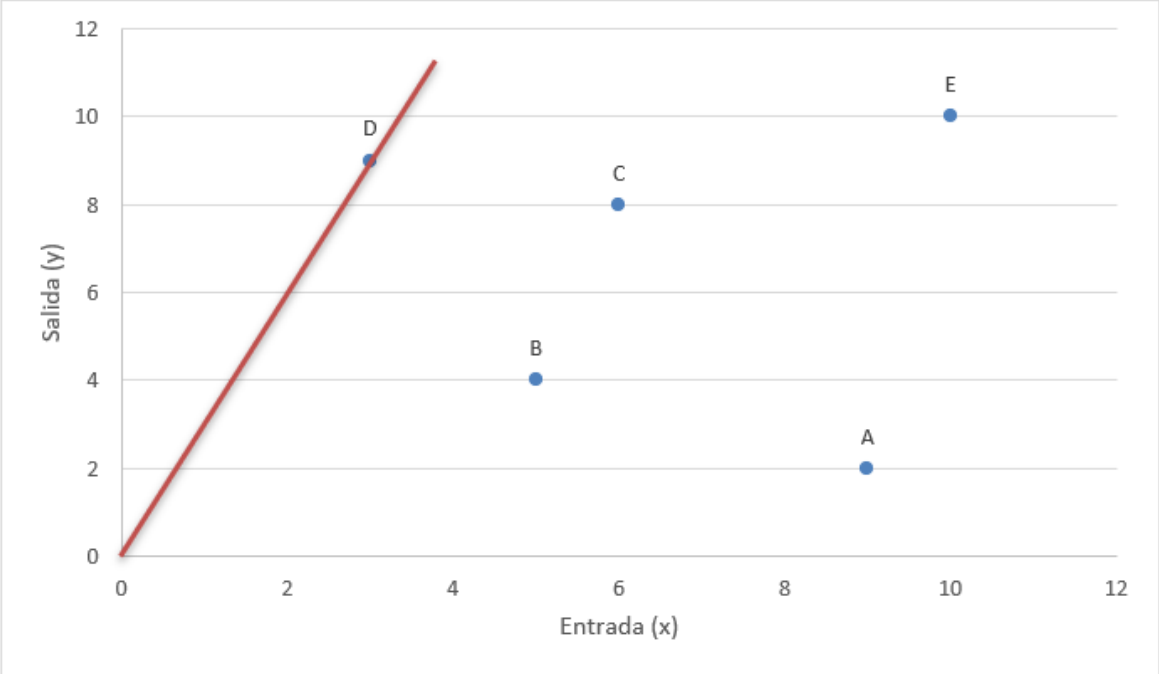

Figura 1. Representación gráfica para la tecnología CRS para el caso de una entrada y una salida. Fuente: Elaboración propia.

La línea que pasa por la DMU D y el origen de coordenadas será la de mayor pendiente, esta línea será la frontera eficiente, es decir toda aquella DMU que esté situada en dicho conjunto de puntos tendrá la eficiencia global igual a 1 (máxima eficiencia).

La zona delimitada por eje x y la frontera eficiente es el conjunto de puntos admisibles T_{CRS}, en esta zona se encontrarán el resto de DMU's que son ineficientes y que para llegar a ser eficientes deben de proyectarse sobre la frontera eficiente.

5.1.3.2 Retornos de Escala Variables (VRS: Variable Return to Scale)

Se toma como unidad de referencia la de mayor productividad dentro de las del mismo tamaño que la unidad para la que queremos calcular la eficiencia relativa, estaríamos hablando de eficiencia técnica. Se permite que haya más unidades eficientes que para los retornos del escala constantes.

La tecnología quedará definida de la siguiente manera:

$$\mathrm{T}_{VRS} = \left\{(\vec{x}, \vec{y}) : \exists \vec{\lambda} \geq 0, \vec{\lambda}\mathrm{X} \leq \vec{x}; \vec{\lambda}\mathrm{Y} \geq \vec{y}; \vec{\lambda}\vec{e}^{T} = 1\right\}$$

La suma de los componentes de $\vec{\lambda}$ debe ser igual a 1.

Se representa un ejemplo gráfico de la tecnología VRS para el caso de una entrada y una salida.

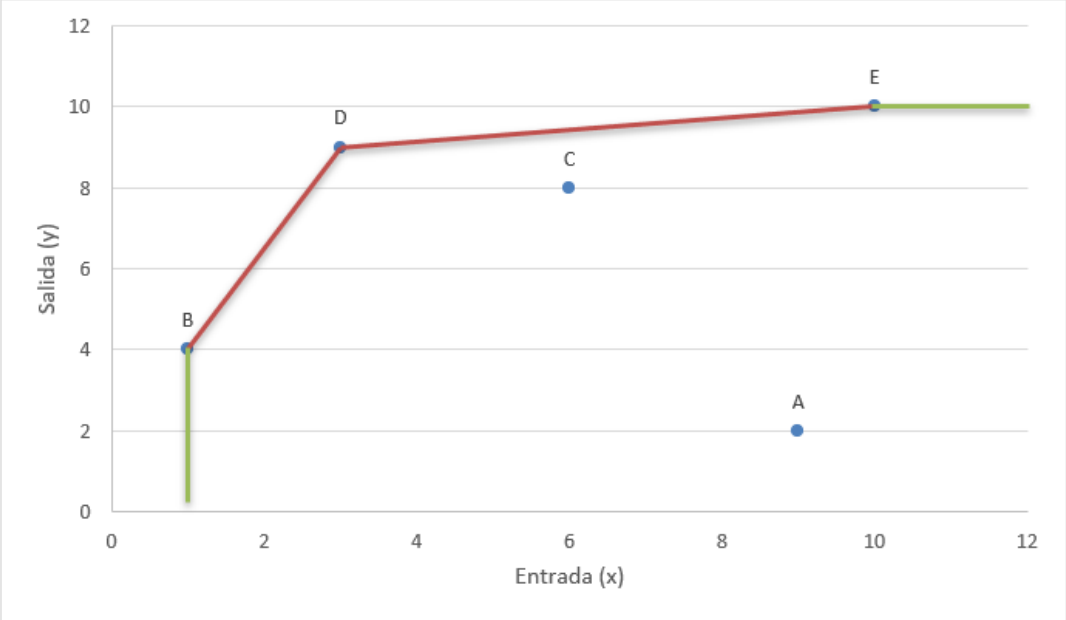

Figura 2. Representación gráfica para la tecnología VRS para el caso de una entrada y una salida. Fuente: Elaboración propia.

La frontera eficiente está representada por las líneas rojas. Se tienen tres DMU's (B, D, E), que tienen diferente productividad, pero, que la eficiencia técnica de las tres es igual a 1.

Se introduce el concepto de frontera tecnológica, representada por las líneas verdes, hará que se pueda diferenciar la zona de producción tecnológicamente posible, que será donde están situadas las unidades ineficientes (A y C), de la zona tecnológicamente inadmisible.

5.1.4 Orientación

Existen las orientaciones de entrada o de salida que será la manera en la que proyectemos la DMU no eficiente sobre la frontera eficiente, por lo tanto, serán las diferentes variantes en las modificaciones de entradas o salidas para alcanzar la eficiencia.

- Orientación de entrada: las unidades de producción se proyectarán sobre la frontera eficiente reduciendo las entradas o recursos tanto como sea posible, manteniendo las salidas o producciones. Así, una unidad será no eficiente cuando se pueda disminuir sus entradas, sin alterar sus salidas.
- Orientación de salida: se hará un incremento de las salidas o producciones al máximo, manteniendo los recursos o entradas constantes. Para este caso, si se puede aumentar alguna de las salidas sin alterar las entradas se trataría de una unidad no eficiente.
- No orientación: Pueden existir modelos en los que no haya necesariamente una orientación de entrada o de salida, si no que una DMU puede proyectarse sobre la frontera eficiente tanto reduciendo sus entradas como aumentando sus salidas. (Ruiz, 2022)

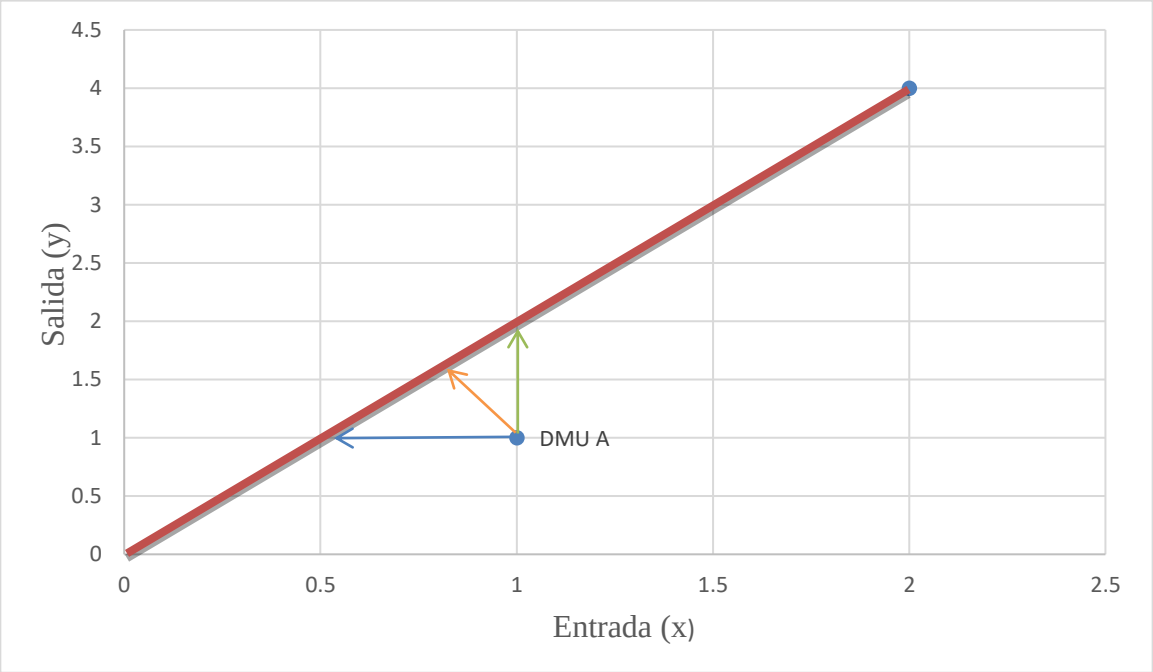

Figura 3. Representación gráfica de los tipos de Orientación. Fuente: Elaboración propia.

En la figura x podemos ver la Frontera eficiente representada por la línea roja. La Línea de dirección verde es la proyección de la DMU A sobre la frontera eficiente con orientación de salida. La Línea de dirección azul es la proyección de la DMU A sobre la frontera eficiente con orientación de entrada. La Línea de dirección naranja es la proyección de la DMU A sobre la frontera eficiente sin orientación.

5.1.5 Modelos básicos DEA

Se van a exponer los diferentes modelos radiales básicos que existen de DEA. Estos dependerán del tipo de retorno, es decir del retorno de escala constante o el retorno de escala variable.

5.1.5.1 Modelos DEA con Retornos de Escala Constantes. Modelos CCR.

Estos modelos toman como unidad de referencia la de mayor productividad de entre las observadas para el cálculo de la eficiencia relativa. Todas las DMU's consideran las mismas unidades como eficientes.

5.1.5.1.1 Modelo CCR-INPUT

Propuesto por los autores: Abraham Charnes, William W. Cooper y Edward Rhodes. Se trata de un Modelo Radial con Retornos de Escala Constantes y Orientación de Entrada. Este modelo facilita la resolución transformando el modelo Ratio (modelo más básico de retornos de escala constantes) en un problema lineal sustituyendo los cocientes por expresiones lineales. De este modo conseguiremos un modelo lineal conocido como la forma multiplicadora. No obstante, se trabajará con el dual de este ya que las variables del dual son las mayormente utilizadas, denominado forma envolvente:

$$Min\ \theta_J\ -\ \varepsilon\left[\sum_{k=1}^{p} t_k\ +\ \sum_{i=1}^{m} s_i\right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} = \theta_j x_{ij}\ -\ s_i\ ;\ i = 1,2,\ldots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{kj} = y_{kJ}\ +\ t_k\ ;\ k = 1,2,\ldots,p$$

$$\lambda_j \geq 0\ \forall j$$

$$s_i, t_k \geq 0\ \forall i,k$$

$$\theta_J\ libre$$

Se tienen las n variables λ_j que corresponderán a las n primeras restricciones del primal y que provienen de la condición de que todas las unidades deben tener una eficiencia menor o igual que uno. La variable θ_J corresponde a la restricción restante, que hace referencia a la amplificación radial que se produce en las entradas para proyectarse sobre las frontera eficiente. Además, se tienen dos variables que serán denominadas de holgura ($t_k\ y\ s_i$) que hacen referencia a las cotas existentes (m+p).

Para resolver el modelo se hará en dos fases, una primera denominada Fase I, que consistirá en minimizar la variable θ_J, y una segunda fase, Fase II que será una vez encontrado el valor de θ_J, que buscará maximizar la suma de las holguras.

Resolución del modelo para la Fase I:

$$Min\ \theta_J$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} \leq\ \theta_J x_{iJ}\ ;\ i = 1,2,\ldots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{kj} \geq\ y_{kJ}\ ;\ k = 1,2,\ldots,p$$

$$\lambda_j \geq 0\ \forall j$$

$$\theta_J\ libre$$

Tras obtener θ_J^*, se resuelve el siguiente modelo para la Fase II:

$$Max\ \left[\sum_{k=1}^{p} t_k\ +\ \sum_{i=1}^{m} s_i\right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij} =\ \theta_J^* x_{iJ}\ -\ s_i\ ;\ i = 1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j y_{kj} =\ y_{kJ}\ +\ t_k\ ;\ k = 1,2,\dots,p$$

$$\lambda_j \geq 0\ \forall j$$

$$s_i, t_k \geq 0\ \forall i, k$$

En los dos problemas, primal y dual, las funciones objetivos coinciden en el óptimo y así se tiene que:

$$h_J^* = \theta_J^* - \left[\sum_{k=1}^{p} t_k\ +\ \sum_{i=1}^{m} s_i\right] = \sum_{k=1}^{p} v_{kj} y_{kj}$$

En este modelo la solución es una combinación lineal de los puntos $(x_{iJ},\ y_{kJ})$, con el resto de los puntos que están en estudio (x_{ij}, y_{kj}). Esto da lugar a la unidad virtual $(\theta_J^*\ x_{iJ} - s_i, y_{kJ} + t_k)$. Una solución que cualquier unidad puede tener como valor admisible es:

$$\theta_J = 1$$

$$\lambda_J = 1$$

$$\lambda_j = 0,\quad \forall j \neq J$$

$$s_i\ = t_k\ = 0,\ \ \forall i\ y\ \forall k$$

Dicha solución considera que la unidad DMU_J, es combinación lineal de ella misma. La función objetivo intenta que θ_J tenga un valor menor que la unidad, al minimizarse θ_J son reducidas proporcionalmente las entradas hasta obtener la menor entrada admisible con la combinación lineal de las unidades en estudio, manteniendo las salidas. Se pueden dar los casos:

- Unidad eficiente, no se produce proyección alguna, unidad se proyecta sobre sí misma. θ_J^*=1, $s_i\ = t_k\ = 0$.
- Unidad no eficiente, se da una proyección paralela al eje, que hace referencia a al variable de holgura no nula. θ_J^*=1, $s_i\ , t_k \neq 0$.

El valor de la eficiencia del modelo es el inverso del valor de θ_J.

5.1.5.1.2 Modelo CCR-OUTPUT:

En este caso se tiene un Modelo Radial con Retornos de Escala Constantes y Orientación de Salida. Obtenemos un modelo similar al anterior, pero optando por hacer lineal la función objetivo del modelo RATIO, minimizando el denominador y manteniendo el numerador constante. Obtendríamos un modelo lineal, el cual su forma dual (forma más usada) es:

$$Max\ \gamma_J\ +\ \varepsilon\left[\sum_{k=1}^{p} t_k\ +\ \sum_{i=1}^{m} s_i\right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j x_{ij}\ =\ x_{ij}\ -\ s_i\ ;\ i = 1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j \gamma_{kj}\ =\ \gamma_J y_{kJ}\ +\ t_k\ ;\ k = 1,2,\dots,p$$

$$\lambda_j \geq\ 0\ \forall j,\quad s_i, t_k\ \geq\ 0\ \forall i,k$$

$$\gamma_J\ libre$$

Al igual que el modelo anterior, este también se resolverá en dos fases. En la primera se maximiza el factor amplificador de las salidas γ_J. En la segunda fase se maximiza la suma de holguras.

En este modelo hay una nueva variable (γ_J) que es la amplificación radial que debe producirse en las salidas para proyectarse en la frontera eficiente. Cualquier DMU puede tomar los valores admisibles:

$$\gamma_J = 1$$

$$\lambda_J = 1$$

$$\lambda_j = 0,\quad \forall j \neq J$$

$$s_i\ = t_k\ = 0,\ \ \forall i\ y\ \forall k$$

En este caso, el modelo busca la maximización de γ_J, que hace que las salidas aumenten manteniendo las entradas y así se obtenga la mayor salida factible. La solución es una combinación lineal de los puntos (x_{iJ}, y_{kJ}), con el resto de los puntos que están en estudio (x_{ij}, y_{kj}). Dando lugar a la unidad virtual ($x_{iJ} - s_i, \gamma_J^* * y_{kJ} + t_k$).

De igual manera que en el problema anterior, podemos tener que:

- γ_J^*=1, $s_i\ = t_k\ = 0$. Unidad eficiente, se proyecta sobre sí misma.
- γ_J^*=1, $s_i\ , t_k \neq 0$, para alguna entrada o salida. Unidad no eficiente, se produce una proyección paralela al eje correspondiente al término que no es nulo.

5.1.5.2 Modelos DEA con Retornos de Escala Variable. Modelos BCC.

Se presentan los modelos BCC, que deben su nombre a sus autores Banker, Charnes y Cooper, fue propuesto por primera vez en 1984 y resuelven los casos donde se plantee un problema con retornos de escala variables .

A partir del modelo RATIO linealizado, se introducirá alguna restricción o variable para que el modelo compare una DMU_J con aquellas del mismo tamaño y no con todas las presentas. Por ello, vamos a modificar la forma envolvente del modelo CCR-INPUT Y CCR-OUTPUT de la siguiente manera:

5.1.5.2.1 Modelo BCC-INPUT

Modelo Radial con Retornos de Escala Variables y Orientación de Entrada.

$$MIN: \theta_J - \varepsilon \left[\sum_{k=1}^{s} h_k^+ + \sum_{i=1}^{m} h_i^- \right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = \theta_j x_{iJ} - h_i^- \; ; \; i = 1,2,\dots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{kj}\lambda_j = y_{kJ} + h_k^+ \; ; \; k = 1,2,\dots,s$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

$$\lambda_{j,}, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_J \; libre$$

Aparece una restricción adicional que hace que la suma de los componentes del vector λ_j sea igual a uno. Se obliga de esta manera que la proyección de la unidad se efectúe sobre el hiperplano que forman las unidades más productivas de su tamaño, no de todas las que están en estudio. Así aparecerán unidades que no eran eficientes para los modelos de retornos de escala constantes pero que para este modelo sí lo son. Habrá más unidades que formen la frontera eficiente.

Las unidades eficientes toman los siguientes valores:

$$\theta_J = 1$$

$$\lambda_J = 1$$

$$\lambda_j = 0, \quad \forall j \neq J$$

$$h_i^- = h_i^+ = 0, \quad \forall i \; y \; \forall k$$

θ_J, es la eficiencia relativa de cada unidad.

5.1.5.2.2 Modelo BCC-OUTPUT

Modelo Radial con Retornos de Escala Variables y Orientación de Salida.

$$MAX: \; \gamma_J + \varepsilon \left[\sum_{k=1}^{s} h_k^+ + \sum_{i=1}^{m} h_i^- \right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = x_{iJ} - h_i^- \; ; \; i = 1,2,\ldots,m$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{kj}\lambda_j = \gamma_J y_{kJ} + h_k^+ \; ; \; k = 1,2,\ldots,s$$

$$\sum_{j=1}^{n} \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\gamma_J \; libre$$

Las unidades eficientes toman los valores:

$$\gamma_J = 1$$

$$\lambda_J = 1$$

$$\lambda_j = 0, \quad \forall j \neq J$$

$$h_i^- = h_i^+ = 0, \quad \forall i \; y \; \forall k$$

5.1.6 Modelos con entradas y salidas no discrecionales

Se puede tener el caso en el que tengamos entradas y/o salidas para las que las DMU's no tengan capacidad para disminuir o incrementar. Estas entradas y salidas son No Discrecionales. En muchas ocasiones puede haber entradas que sean extrínsecas a la unidad productiva o salidas que estén fijadas y no se puedan variar. Que existan entradas o salidas no discrecionales no solo va a depender de que las DMU's tenga la capacidad de variar su cantidad, también dependerá del tipo de análisis que esté en estudio.

Para tener en cuenta estas entradas y salidas, se modifican las restricciones de los modelos matemáticos. El primer paso es diferenciar las entradas y salidas no discrecionales de las que sí que lo son:

$$I = I_D \, U \, I_{ND}$$
$$O = O_D \, U \, O_{ND}$$

Así, para las entradas 'I', tendremos las discrecionales que estarán diferenciadas por el subíndice 'D', de las no discrecionales que tendrán el subíndice 'ND'. Igualmente haremos para las salidas 'O'.

Se va a presentar cómo quedaría el modelo de la forma envolvente para CCR-INPUT, con entradas y salidas no discrecionales.

Al ser un modelo orientado a la entrada, no se van a realizar modificaciones en las salidas, por lo tanto, para las salida no haremos distinciones en las restricciones. Si fuese un modelo orientado a la salida pasaría lo mismo con las entradas.

Se diferencia entre entradas no discrecionales y discrecionales, ahora se tendrán dos tipos de restricciones una para cada tipo de entrada. Las entradas no discrecionales no se ven afectadas por la variable θ_J y las holguras maximizadas en la función objetivo únicamente se encuentran en los conjuntos discrecionales. Así para las entradas que no se pueden variar no se hace ningún tipo de proyección ni radial ni rectangular.

$$Min:\ \theta_J - \varepsilon \left[\sum_{k \in O_D}^{s} h_k^+ + \sum_{i \in O_D}^{m} h_i^- \right]$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = \theta_J x_{iJ} - h_i^- \qquad \forall i \in I_D$$

$$\sum_{j=1}^{n} y_{kj}\lambda_j = y_{kJ} + h_k^+ \qquad k = 1,2,\ldots,s$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\lambda_j = x_{iJ} - h_i^- \qquad \forall i \in I_{ND}$$

$$\lambda_j, h_i^-, h_k^+ \geq 0$$

$$\theta_J \quad libre$$

5.1.7 Modelos con entradas y salidas no deseadas

Otro caso que se puede encontrar son las entradas o salidas no deseadas. Tal como se ha visto hasta ahora, se buscará la reducción de entradas (recursos), y el incremento de las salidas (producciones). Pero puede darse el caso que por la definición de algunas entradas o salidas se busque lo contrario, es decir aumento de ciertas entradas o reducción de salidas. Estas serían las entradas y salidas no deseadas.

Por ejemplo, si como unidades productivas se tiene diferentes modelos de automóviles y se quiere calcular la eficiencia, se puede tener como salida el tiempo que tardan en acelerar de 0 a 100 km/h, en este caso esta salida sería una salida no deseada ya que cuanto menor sea dicho tiempo mayor productividad estaría dando el automóvil.

Para tratar estas entradas y salidas no deseadas, está la opción en la que las salidas no deseadas serán tratadas como entradas, al igual que las entradas no deseadas que serán tratadas como salidas (Hailu y Veeman, 2001). Así, los modelos tradicionales con las tecnologías CRS y VRS se mantendrían tal cual, y lo único a cambiar serían las variables para tomar como entradas y como salidas.

5.2 GOAL PROGRAMMING & DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (GoDEA)

Relacionamos la programación por objetivos y el análisis envolvente de datos (GoDEA), que tiene como fin el establecimiento de objetivos y la asignación de recursos para problemas de planificación en niveles múltiples. El análisis envolvente de datos se ha utilizado para la evaluación de Unidades de Toma de Decisiones individuales, por ello se necesitan extensiones para aplicar los principios DEA al nivel organizacional global, sin perder las características atractivas del modelo DEA.

Este modelo se desarrolló originalmente como una ayuda para la reorganización de la asignación de fondos centrales a las autoridades locales en Grecia. Este modelo se utilizó para facilitar el desarrollo de un sistema de apoyo a la decisión de planificación financiera en las autoridades locales de Grecia. (Athanassopoulos, 1995).

Se considera como un instrumento de toma de decisiones grupales para los sistemas de producción divididos en subsistemas.

5.2.1. PLANIFICACIÓN MULTINIVEL BASADA EN OBJETIVOS

Los sistemas productivos que están divididos en subsistemas (por ejemplo, regiones dentro de un país), constituyen sistemas de planificación multinivel.

La gestión centralizada de los recursos se considera el proceso en el que una entidad superior (organización central) es responsable de la asignación y el control de los recursos asignados a las unidades individuales de toma de decisiones (DMU).

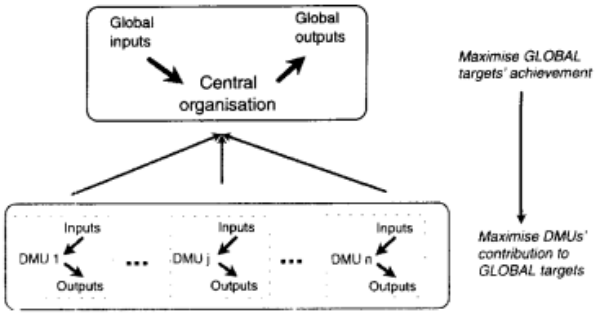

Figura 4. Esquema representación multinivel. Fuente: Athanassopoulos (1995).

Objetivos planificación multinivel:

- Maximizar los logros globales del sistema.
- Maximizar la contribución de unidades individuales a los objetivos mundiales (eficiencia).
- Maximizar la participación de cada unidad individual en los recursos asignados.

Por tanto, tendremos una organización central o entidad superior que será la responsable de alcanzar los objetivos globales de entradas/salidas. Las DMU's individuales maximizarán su contribución a la consecución de los objetivos globales de la organización. Por tanto, la entidad superior será la que asigne los recursos globales y/o las salidas (producciones) que tendrá de cada DMU. Además cada DMU tendrá una serie de entradas y salidas las cuales no serán globales.

5.2.2. Modelo GoDEA

$$Min \left\{ \sum_{j=1}^{n} \sum_{i \epsilon I_C} \left(P_i^n \frac{n_i^j}{x_{ij}} + P_i^p \frac{p_i^j}{x_{ij}} \right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{r \epsilon O_C} \left(P_r^n \frac{n_r^j}{y_{rj}} + P_r^p \frac{p_r^j}{y_{rj}} \right), \sum_{i \epsilon I_V} \left(P_i^g \frac{d_i^+}{GX_i} \right) + \sum_{r \epsilon O_V} \left(P_r^g \frac{d_r^-}{GY_r} \right) \right\}$$

s.a.

Representación individual de las DMU's:

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^k y_{rj} - p_r^k + n_r^k = y_r^k, \;\; r \epsilon O_C, \;\; \forall k,$$

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^k x_{ij} - p_i^k + n_i^k = x_i^k, \;\; i \epsilon I_C, \;\; \forall k,$$

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^k y_{rj} \geq y_r^k, \;\; r \epsilon O_C, \;\; \forall k,$$

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^k x_{ij} \geq x_i^k, \;\; i \epsilon I_C, \;\; \forall k,$$

Objetivos globales:

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^1 x_{ij} + \ldots + \sum_{j=1}^{n} \delta_j^n x_{ij} - \; d_i^+ = GX_i \;\; \forall \, i \epsilon I_V,$$

$$\sum_{j=1}^{n} \delta_j^1 y_{rj} + \ldots + \sum_{j=1}^{n} \delta_j^n y_{rj} + d_r^- = GY_r \;\; \forall \, r \epsilon O_V,$$

$$\delta_j^k, n_i^j, n_r^j, p_i^j, p_r^j, d_i, d_r \geq 0,$$

Donde:

n_i^j, p_i^j son las variables de desviaciones negativas y positivas de la entrada i de la DMU j.

n_r^j, p_r^j son las variables de desviaciones negativas y positivas de la salida r de la DMU j.

d_i, d_r son las variables de desviaciones positivas y negativas del objetivo global de la entrada i o la salida r.

P_i^n, P_i^p, preferencias en la minimización positiva/negativa de la desviación de la entrada i.

P_r^n, P_r^p, preferencias en la minimización positiva/negativa de la desviación de la entrada i.

P_i^g, P_r^g, preferencias relativas a los objetivos globales de la entrada i o salida r.

GX_i, GY_r, son los objetivos globales de la entrada i o salida r.

x_{ij}, y_{rj}, son la entrada i o salida r correspondiente a la DMU j.

De primera vista se pueden ver los diferentes conjuntos de restricciones divididos entre los objetivos

globales y la representación individual de cada DMU. Se puede ver la diferencia entre el conjunto de salidas o entradas tradicionales (discrecionales) I_C, O_C, las que se han visto hasta ahora y que se encentran en la representación individual de cada DMU, y las globales, I_V, O_V, que serán las entradas o salidas que tienen objetivos globales, es decir objetivo de la Entidad Superior.

La función objetivo de GoDEA contiene dos partes:

- Una parte global (se buscará el cumplimiento de los objetivos globales):

$$Min\left\{\sum_{i\in I_V}\left(P_i^g\frac{d_i^+}{GX_i}\right)+\sum_{r\in O_V}\left(P_r^g\frac{d_r^-}{GY_r}\right)\right\}$$

- Una parte individual DEA (se buscará el resultado más parecido al actual):

$$Min\left\{\sum_{j=1}^{n}\sum_{i\in I_C}\left(P_i^n\frac{n_i^j}{x_{ij}}+P_i^p\frac{p_i^j}{x_{ij}}\right)+\sum_{j=1}^{n}\sum_{r\in O_C}\left(P_r^n\frac{n_r^j}{y_{rj}}+P_r^p\frac{p_r^j}{y_{rj}}\right),\right\}$$

Las prioridades utilizadas en la función objetivo (P_i^n,P_i^p, P_r^n,P_r^p, P_i^g, P_r^g) reflejan la penalización por unidad de desviación de las desviaciones respecto de la entrada o salida. Utilizando estas prioridades se puede establecer una estimación de cumplimientos de los objetivos individuales, con el propósito de un mayor apoyo a el cumplimiento de objetivos globales.

La presencia de las variables de desviación bidireccional (n_i^j, p_i^j, n_r^j, p_r^j) (tanto positivas como negativas para cada entrada o salida) implica que el problema puede resolverse por debajo o por encima de los valores de entrada/salida observados de unidades individuales. Esto es un cambio fundamental respecto a los modelos básicos DEA que asumen únicamente la disminución de entradas o el aumento de salidas. El modelo GoDEA, de esta manera, da la oportunidad de más escenarios posibles adquiriendo la posibilidad de, por ejemplo, aumentar las salidas producidas por una DMU, aumentando los recursos producidos.

6 EFICIENCIA DE LOS PAÍSES DE LA UE FRENTE AL SUMINSTRO DE VACUNAS COVID-19

6.1. INTRODUCCIÓN

Se van a aplicar dos modelos diferentes para llevar a cabo el análisis de eficiencia en la administración de vacunas de los Estados miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19.

El primero de ellos es un modelo básico de Análisis Envolvente de Datos, el modelo BCC-INPUT. Este modelo utiliza como tecnología los Retornos de Escala Variables (VRS), y tiene orientación de entrada. Gracias a la tecnología VRS, habrá una mayor cantidad de países eficientes debido a que los países serían comparados únicamente con los de su tamaño. No tendría sentido utilizar para este problema la tecnología CRS. Si se comparasen los países con todos los que están en el estudio, se estarían comparando países con, por ejemplo, mucho mayor poder económico (PIB) que otros, lo que se traduce en una mayor capacidad de reacción frente a la COVID-19. Cómo se verá en la presentación de los datos, se dispone de varias salidas no deseadas y que trataremos como entradas. Por ello, se elige la orientación de entrada, porque se quiere reducir al máximo estas salidas no deseadas, y por ende, los recursos propios.

Con el modelo BCC-INPUT, se evaluará la eficiencia relativa a la gestión individual de cada país del COVID-19. Teniendo en cuenta, tanto las entradas (recursos) que se tenían tanto como dato de partida (previas al COVID-19), como durante. Y las salidas o resultados obtenidos referentes al COVID-19. Así, se conseguirá con el modelo una distinción entre países eficientes e ineficientes. De los países ineficientes se conocerá el grado de ineficiencia, al igual que cuáles deberían de ser las entradas y salidas no deseadas para que dichos países lleguen a ser eficientes.

El segundo modelo es el GoDEA, modelo híbrido de Análisis Envolvente de Datos con la programación por objetivos. Por tanto, tendremos las propiedades del Análisis Envolvente de Datos pero se podrá proponer objetivos que serán globales a todas las DMU's (países). En este modelo también se hará uso de los Retornos de Escala Variable como tecnología. Como objetivo del GoDEA, se buscará una reducción de las vacunas totales recibidas por todos los países, es decir, reducir el número de vacunas recibidas por la Unión Europea. Se hará una asignación de recursos.

Con el modelo GoDEA, se conseguirá saber si es posible una reducción total de vacunas, o hasta que

cantidad respecto del objetivo se puede llegar a cumplir. Se verán también qué países serán los que verían las vacunas recibidas reducidas y en qué cantidad. Además para los países que vean las vacunas reducidas, el modelo propone otras entradas o salidas para que estos sigan siendo eficientes. También se conocerá si para la reducción de vacunas se obtienen resultados semejantes ha si no la hubiera. Este modelo puede dar como solución valores tanto superiores en las entradas o salidas como inferiores. De este modo podría haber soluciones en las que se aumenten las entradas en pro de un aumento de las salidas. Aumenta las posibles soluciones respecto al modelo básico DEA BCC-INPUT.

Para el modelo GoDEA hay que realizar ciertas aclaraciones. Se va a explicar primero el funcionamiento de la adquisición de vacunas por parte de los Estados miembros de la Unión Europea, y a continuación se expondrán las suposiciones y argumentos.

Lo primero es decir que no ha habido ningún órgano que sea el responsable del reparto de vacunas a los diferentes países. El reparto de vacunas ha sido el siguiente, los Estados miembros indican en una fase temprana de la negociación con una empresa si están interesados en una vacuna en concreto y qué cantidad desean comprar. Una vez celebrado el contrato, las vacunas se asignan según una clave de distribución basada en el número de habitantes. De esta forma, los Estados miembros reciben vacunas en las mismas condiciones y al mismo precio, de forma proporcional.

Es posible ajustar las cantidades de vacunas entre Estados miembros en función de las necesidades de cada uno. Por ejemplo, un Estado miembro puede decidir no comprar vacunas adicionales entre las opciones negociadas, en cuyo caso otros Estados miembros pueden reclamar tales opciones y comprar más dosis de esa vacuna concreta.

Para el modelo GoDEA se necesita una organización central y superior a todos los países que sea la encargada de la asignación de recursos. En nuestro caso, los propios Estados tienen cierta capacidad de decisión sobre la no adquisición de vacunas o la adquisición de más vacunas de las correspondientes si hay opciones. Entonces en este análisis, se va a ver el caso en el que una Entidad Superior es la única encargada de realizar la asignación de recursos para el cumplimiento del objetivo de la reducción total de vacunas recibidas.

Se puede pensar que no tiene sentido una reducción de vacunas, ya que durante la COVID-19 siempre va a ser mejor recibir el mayor número de vacunas posibles. No obstante, como estudio si es interesante ver cómo se verá en las conclusiones.

6.2. DATOS

Los datos usados para resolver los modelos planteados están recopilados desde el inicio de la pandemia, hasta la semana 28 del 2021, es decir, hasta el 18 de julio de 2021 (72 semanas).

6.2.1. Unidades de producción

Tendremos 27 unidades productivas que serán los 27 países que corresponden a la Unión Europea.

Figura 5. Mapa Estados miembros de la Unión Europea. Fuente: Saber es práctico.

6.2.2. Entradas

Las entradas están clasificadas como no discrecionales, controlables (tradicionales) y globales (variables).

6.2.2.1. Entradas no discrecionales XF

- PIB (XF1)

El PIB es una entrada no discrecional, debido a que es un dato de partida para los países. A mayor PIB, mayor gasto podrá tener el país en sanidad y en las posibilidades a la hora de hacer frente a la COVID-19, por ello es una entrada, es decir, un recurso.

- Población (XF2)

Los resultados de la gestión de la COVID-19, dependerá mucho de la población de cada país, ya que a mayor población mayor posibilidad de tener más defunciones a priori, ocupación hospitalaria, UCI, etc.

- Número de casos (XF3)

Se podría haber interpretado como una salida, entendiendo que la gestión de los países se puede ver reflejada en el número total de casos positivos que ha tenido. Pese a esto, se entenderá como una entrada, ya que todos los países desconocían la COVID-19. La pandemia empezó apareciendo por Italia y por España, por tanto hay países que han tenido mayor tiempo de respuesta frente a esta, provocando ventajas respecto a otros en cuanto a las medidas a tomar o recursos disponibles en el tiempo, y por tanto un menor número de casos. Por ello, el número de casos positivos se tomará como una entrada, midiendo así la gravedad a la que ha tenido que hacer frente cada país, y como fija al entender que los países no han tenido capacidad para modificar el número de casos.

PAÍS	XF1	XF2	XF3
	PIB (en millones de €)	Población (en miles)	Nº de casos (en miles)
Austria	378,651	8,901	649
Bélgica	456,058	11,522	1,103
Bulgaria	68,472	6,951	423
Croacia	50,321	4,058	362
Chipre	21,525	888	92
Rep. Checa	21,516	10,694	1,671
Dinamarca	312,100	5,823	46
Estonia	26,832	1,329	132
Finlandia	237,753	5,525	101
Francia	2,286,195	67,320	5,910
Alemania	3,367,420	83,167	3,745
Grecia	165,495	10,719	457
Hungría	136,871	9,770	809
Irlanda	371,688	4,964	285
Italia	1,655,910	59,394	4,287
Letonia	29,569	1,908	138
Lituania	49,483	2,794	280
Luxemburgo	63,713	626	73
Malta	13,029	515	32
Holanda	798,486	17,408	1,810
Polonia	518,129	37,958	2,881
Portugal	200,050	10,296	931
Rumanía	219,576	19,329	1,082
Eslovaquia	92,020	5,458	776
España	1,121,310	47,333	4,100
Suecia	474,449	10,328	1,094
Eslovenia	46,759	2,096	258

Tabla 1. Entradas no discrecionales. Fuente: Elaboración propia (Eurostat, 2022)(Our World in Data, 2022).

6.2.2.2. Entradas tradicionales o controlables XC

- Número de test (XC1)

El número de test realizados es una entrada, porque el control de la pandemia y por ende el número de fallecidos, ocupación hospitalaria y UCI dependen en gran medida del número de test realizados. Detectar tempranamente los casos positivos hace que no se siga expandiendo el virus aislando a los

positivos, así como también poder tener un control temprano de los síntomas. Es controlable ya que los países tienen poder de decisión sobre el número de test que adquieren y realizan.

- Número de fallecimientos (XC2)

A mayor número de fallecidos indica una peor gestión de la COVID-19, así el número de fallecimientos es una salida no deseada, por ello se toma como una entrada. Lo mismo ocurre con la media de ocupación hospitalaria, y la media ocupación UCI.

- Media ocupación hospitalaria (XC3)

El control de la ocupación hospitalaria ha sido muy importante ya que los hospitales podían colapsar y no tener suficientes camas para todas las personas que necesitaban ingresar. Además de las personas que tenían que ingresar debido a la COVID-19, se suma las personas que debido a cualquier otro problema o enfermedad tenían que ingresar y por los pacientes de la COVID-19, se retrasaban muchas operaciones e ingresos.

- Media ocupación UCI (XC4)

Hay que controlar aún más la ocupación de la UCI, debido a que es la unidad de cuidados intensivos, para los hospitalizados que requieren un mayor cuidado.

PAÍS	XC1	XC2	XC3	XC4
	Nº de test (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI
Austria	61,898	13,113	739.73	213.4
Bélgica	16,549	3,326	1,958.13	460.69
Bulgaria	3,415	18,174	2,976.85	257.31
Croacia	2,217	8,238	854.541	78.66
Chipre	9,240	385	81.842	13.75
Rep. Checa	32,200	30,338	6,151.23	507.2
Dinamarca	37,025	1,018	210.785	39.24
Estonia	1,585	1,271	191.423	18.61
Finlandia	5,732	991	109.08	25.33
Francia	9,930	111,503	18,415.71	2,682.16
Alemania	66,596	91,362	7,481.72	2,242.67
Grecia	11,709	12,850	1,160.87	132.98
Hungría	5,806	30,015	2,650.25	227.65
Irlanda	5,879	5,018	340.203	56.23
Italia	74,793	127,867	15,195.88	1,575.94
Letonia	2,988	2,543	325.461	76.61
Lituania	4,048	4,404	635.613	56.35
Luxemburgo	3,202	820	81.105	16.11
Malta	1,041	420	32.001	5.05
Holanda	15,233	9,550	1,041.83	429.31
Polonia	18,660	75,215	9,825.83	747.12
Portugal	14,499	17,207	1,425.90	224.11
Rumanía	9,729	34,253	3,853.65	672.39
Eslovaquia	40,425	12,524	1,073.99	148.43
España	50,200	81,096	10,988.49	2,103.19
Suecia	10,812	14,646	1,238.23	210.42
Eslovenia	1,374	4,425	409.931	32.35

Tabla 2. Entradas tradicionales. Fuente: Elaboración propia (European Centre for Disease Prevention and Control, 2022. IHME, 2022)

6.2.2.3. Entradas globales

- Número de vacunas recibidas (XV1)

Única variable global, ya que el aumento o disminución de las vacunas recibidas por un país lleva consigo la disminución o aumento respectivamente de vacunas recibidas de uno o más países.

La vacunación es uno de los factores claves, con las vacunas se consigue reducir notablemente el número de contagios, así como la gravedad de los síntomas en caso de contraer la enfermedad.

PAÍS	XV1
	Nº vacunas recibidas (en miles)
Austria	9,539
Bélgica	13,480
Bulgaria	5,742
Croacia	3,984
Chipre	1,121
Rep. Checa	11,279
Dinamarca	7,544
Estonia	1,342
Finlandia	5,459
Francia	70,807
Alemania	95,375
Grecia	12,240
Hungría	3,984
Irlanda	5,873
Italia	65,678
Letonia	1,953
Lituania	5,134
Luxemburgo	742
Malta	724
Holanda	46,282
Polonia	40,832
Portugal	11,511
Rumanía	15,581
Eslovaquia	5,608
España	53,589
Suecia	10,298
Eslovenia	2,545

Tabla 3. Entrada global. Fuente: Elaboración propia (European Centre for Disease Prevention and Control, 2022).

Para el modelo BCC-INPUT, se tomará como una entrada tradicional.

6.2.3. Salidas

- Número total de vacunados (YC1)

Única salida del problema, debido a que las demás salidas son no deseadas. El número total de vacunados es fundamental, con este se puede ver cuantas personas se han podido vacunar teniendo

en cuenta las vacunas recibidas. Se toma el número total de vacunados como personas con las dos dosis recibidas.

PAÍS	YC1
	Nº total de vacunados (en miles)
Austria	3,945
Bélgica	5,275
Bulgaria	873
Croacia	136
Chipre	426
Rep. Checa	4,151
Dinamarca	2,555
Estonia	486
Finlandia	1,680
Francia	31,506
Alemania	36,507
Grecia	4,315
Hungría	1,361
Irlanda	2,338
Italia	26,116
Letonia	538
Lituania	1,227
Luxemburgo	258
Malta	340
Holanda	10,773
Polonia	1,860
Portugal	5,199
Rumanía	4,303
Eslovaquia	1,890
España	21,945
Suecia	4,627
Eslovenia	712

Tabla 4. Salida global. Fuente: Elaboración propia (European Centre for Disease Prevention and Control, 2022).

6.2.4. Variable adicional global

Además de las entradas y salidas, para el modelo GoDEA necesitaremos GXV1 (Número total de vacunas recibidas), que será la suma de las vacunas que han recibido todos los países.

Número total de vacunas recibidas (GXV1) = 508,245,947. Se reducirá este número que será el objetivo global del modelo, por lo tanto, GXV1 lo variaremos en función de cuanto queramos

disminuir el número total de vacunas recibidas. Se hará una reducción hasta el 85% y el 75%.

6.3. MODELO BÁSICO DEA

En este apartado se expone el modelo básico de Análisis Envolvente de Datos, que utiliza tecnología de Retornos de Escala Variables y orientación de entrada, el modelo BCC-INPUT.

Según los datos expuestos, el modelo resulta:

$$MIN\ \theta_J\ -\ \varepsilon(\sum_{i=1}^{i=4} hXC_i\ +\ hXV1\ +\ hYC1)$$

s.a:

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_j\ *\ XC_{i\ j}\ \leq\ \theta_J\ *\ XC_{i_J}\ -\ hXC_i \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_j\ *\ XV1_j\ \leq\ \theta_J\ *\ XV1_J\ -\ hXV1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_j\ *\ XF_{k\,j}\ \leq XF_{k_J} \quad \forall k \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_j\ *\ YC1_j\ = YC1_J\ +\ hYC1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_j = 1 \quad (5)$$

$$\lambda_j\ \geq\ 0\ \ \forall j \quad (6)$$

$$\theta_J\ \leq\ 1\ \ \forall j \quad (7)$$

$$hXC_i, hXV1, XC_i, XV1, hYC1, YC1\ \geq\ 0 \quad \forall i \quad (8)$$

$$\theta_J\ libre$$

$i = \{1,2,3,4\}$

$k = \{1,2,3\}$

hXV1, hYC1, hXC_i para $i = 1,2,3,4$ son las variables de holgura.

Los componentes del vector λ_j deben sumar 1, esto es lo que obliga que la proyección de una unidad se efectúe sobre las unidades más productivas de su tamaño. La eficiencia relativa de cada unidad será θ_J, que es la proporción de entradas actuales que deben utilizarse para conseguir la eficiencia, y λ_j son las componentes del vector de pesos asociados a la combinación lineal resultante.

No hace falta añadir una restricción que fuerce que el número de vacunados (YC1) multiplicado por 2 (doble pauta), sea menor o igual que el número de vacunas recibidas (XC1). Al resolver se cumple independientemente de poner o no la restricción. Lo mismo ocurrirá en el modelo GoDEA.

6.4. MODELO GoDEA

Además de los objetivos individuales de cada DMU, este modelo híbrido se basa en objetivos globales a todas las DMU, en este caso la reducción total de vacunas recibidas por todos los países. Por tanto, el modelo buscará la reducción de vacunas total, haciendo uso de las variables para que el cómputo global sea lo más eficiente posible, aparte de buscar la eficiencia para cada DMU.

El modelo queda definido como:

$$MIN \sum_{i=1}^{4}\left\{\sum_{j=1}^{j=27} PNXC_i * \frac{NXC_{i_j}}{XC_{i_j}} + PPXC_i * \frac{PXC_{i_j}}{XC_{i_j}}\right\} + \left\{\sum_{j=1}^{j=27} PNYC1 * \frac{NYC1_j}{YC1_j} + PPYC1 * \frac{PYC1_j}{YC1_j}\right\} + \left\{PXV1 * \frac{DMASXV1}{GXV1}\right\}$$

s.a.:

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_{j,r} * XC_{i_j} - PXC_{i_r} + NXC_{i_r} = XC_{i_r} \quad \forall r \forall i \qquad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_{j,r} * YC1_j - PYC1_r + NYC1_r = YC1_r \quad \forall r \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_{j,r} * XF_{k_j} \leq XF_{k_r} \quad \forall r \forall k \qquad (3)$$

$$\sum_{r=1}^{27}\sum_{j=1}^{27} \lambda_{j,r} * XV1_j - DMASXV1 = GXV1 \qquad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{27} \lambda_{j,r} = 0 \quad \forall r \qquad (5)$$

$i = \{1,2,3,4\}$

$k = \{1,2,3\}$

XC_{ij} es la entrada controlable i correspondiente a la DMU j. PXC_{ir} y NXC_{ir} son variables de desviación positiva y negativa de la entrada i, para la DMU r. Igual para las entradas las fijas (XF_k), la global (XV1), y la salida controlable (YC1).

GXV1 es el objetivo global de la entrada XV1, es decir en nuestro caso es el número total de vacunas recibidas por todos los países. Que será el 85% y el 75% del total. DMASXV1, es la desviación del objetivo global GXV1.

Todas las restricciones son para cualquier DMU r.

Añadimos la restricción número 5, para, comparar cada DMU únicamente con las de su tamaño (tecnología VRS).

Ponderaremos las desviaciones con pesos que serán $PNXC_i$ Y $PPXC_i1$ los pesos para la desviación negativa y positiva respectivamente para la entrada controlable i. Igualmente se tiene para YC1. Para la desviación del objetivo global se tiene PXV1.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Primero se van a ver los resultados obtenidos con el modelo BCC-INPUT (modelo DEA con tecnología VRS con orientación de entrada). Ambos modelos se resuelven con el paquete de optimización LINGO 19.0 (herramienta diseñada para construir y resolver modelos de optimización lineales, no lineales (convexos y no convexos/globales), cuadráticos, con restricciones cuadráticas, cónicos de segundo orden, semidefinidos, estocásticos y enteros de forma más rápida, sencilla y eficiente.

7.1. RESULTADOS MODELO DEA

Se obtienen los valores de θ_J que indican cuáles son los países eficientes e ineficientes, y los valores que deben de tomar las variables de entrada correspondientes a los países ineficientes para que lleguen a ser eficientes, es decir, la proyección de las unidades ineficientes sobre la frontera eficiente.

Se presenta primero la clasificación obtenida entre países eficientes e ineficientes.

7.1.1 Clasificación países eficientes e ineficientes

En la siguiente tabla vemos los valores obtenidos de θ_J.

PAÍS	θ
Austria	1
Bélgica	1
Bulgaria	0.511
Croacia	1
Chipre	1
Rep. Checa	0.849
Dinamarca	1
Estonia	0.825
Finlandia	1
Francia	1
Alemania	1
Grecia	1
Hungría	0.754
Irlanda	1
Italia	1
Letonia	0.596
Lituania	0.788
Luxemburgo	0.976
Malta	1
Holanda	1
Polonia	1
Portugal	1
Rumanía	0.944
Eslovaquia	0.743
España	1
Suecia	1
Eslovenia	1

Tabla 5. Valores obtenidos de θ_J. Fuente: Elaboración propia.

Los países que son eficientes son aquellos que tienen el valor de θ_J igual a uno. Por tanto, tenemos: Austria, Bélgica, Croacia, Chipre, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Malta, Holanda, Polonia, Portugal, España, Suecia y Eslovenia como unidades eficientes.

Se puede ver en la siguiente representación las unidades de producción ordenadas de mayor a menor θ_J.

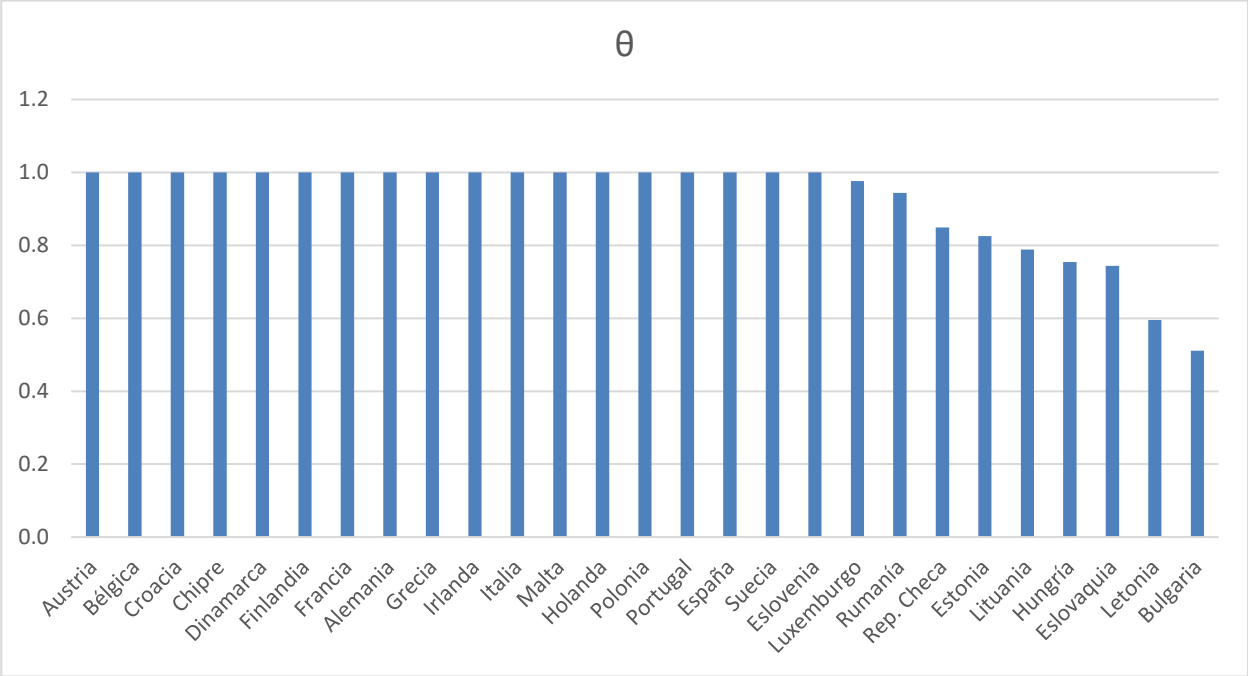

Figura 6. Países ordenados según θ_J. Fuente: Elaboración propia.

Los países ineficientes ($\theta_J < 1$), ordenados respectivamente de mayor a menor cercanía a la eficiencia: Luxemburgo, Rumanía, República Checa, Estonia, Lituania, Hungría, Eslovaquia, Letonia y Bulgaria.

Con la clasificación hecha, vemos hasta cuanto propone el modelo que habría que reducir los recursos y qué recursos habría que reducir para que los países ineficientes lleguen a ser eficientes.

7.1.2 Proyección unidades ineficientes sobre frontera eficiente

Para una mejor observación, se presenta primero los datos de las variables tradicionales de entrada de los países ineficientes. A continuación, la proyección de estos sobre la frontera y por último el porcentaje de decremento de los valores iniciales.

PAÍS	Nº de test (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº vacunas recibidas (en miles)
Bulgaria	3,415	18,174	2,977	257	5,742
Rep. Checa	32,200	30,338	6,151	507	11,279
Estonia	1,585	1,271	191	19	1,342
Hungría	5,806	30,015	2,650	228	3,984
Letonia	2,988	2,543	325	77	1,953
Lituania	4,048	4,404	636	56	5,134
Luxemburgo	3,202	820	81	16	742
Rumanía	9,729	34,253	3,854	672	15,581
Eslovaquia	40,425	12,524	1,074	148	5,608

Tabla 6. Entradas tradicionales datos iniciales países ineficientes. Fuente: Elaboración propia.

PAÍS	Nº de test (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº vacunas recibidas (en miles)
Bulgaria	1,746	1,565	154	30	2,936
Rep. Checa	11,998	10,484	1,237	228	9,578
Estonia	1,308	790	62	14	1,107
Hungría	3,368	3,808	319	54	3,004
Letonia	1,589	1,103	89	14	1,163
Lituania	3,190	3,471	320	38	3,405
Luxemburgo	1,041	420	32	5	724
Rumanía	9,187	12,156	1,119	189	13,163
Eslovaquia	5,198	5,738	475	76	4,170

Tabla 7. Entradas tradicionales solución según modelo BCC-INPUT . Fuente: Elaboración propia.

Presentados los valores de entradas controlables como datos, así como los que el modelo propone para que los países sean eficientes, se puede calcular el porcentaje de decremento de estas entradas.

PAÍS	Nº de test	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº vacunas recibidas
Bulgaria	48.87%	91.39%	94.81%	88.39%	48.87%
Rep. Checa	62.74%	65.44%	79.89%	55.06%	15.08%
Estonia	17.49%	37.83%	67.43%	24.29%	17.49%
Hungría	41.99%	87.31%	87.95%	76.30%	24.60%
Letonia	46.82%	56.64%	72.75%	81.78%	40.45%
Lituania	21.19%	21.19%	49.69%	31.99%	33.67%
Luxemburgo	67.48%	48.78%	60.54%	68.65%	2.39%
Rumanía	5.57%	64.51%	70.96%	71.85%	15.52%
Eslovaquia	87.14%	54.18%	55.75%	48.98%	25.65%

Tabla 8. Porcentaje decremento entradas tradicionales. Fuente: Elaboración propia.

De estas unidades productivas, Luxemburgo es la que más cerca está de la eficiencia, mientras que Bulgaria es la que es más ineficiente. De Bulgaria podemos ver que, para su proyección sobre la frontera eficiente, necesitaríamos una reducción de algo más de la mitad del número de test realizados y del número de vacunas recibidas (51,13%). Podemos ver con todos los datos referentes a Bulgaria, que de un total de 5741720 de vacunas recibidas, el número total de vacunados con la pauta completa es de 873226 de personas, es decir, que solo han usado de las vacunas recibidas un total de 1746452 de vacunas para la pauta completa, cuando países como Finlandia, que ha recibido un número de vacunas similar (5458635), tiene un total de 1679689 de personas vacunadas con pauta completa, es decir casi el doble que los que tiene Bulgaria habiendo recibido menos vacunas.

Letonia está muy cerca en cuanto al grado de ineficiencia de Bulgaria, con θ igual a 0.59, mientras que Bulgaria tiene θ igual a 0.51. Podemos comparar la gestión de Letonia con la de Croacia ya que son de tamaños similares, para así entender la ineficiencia de Letonia. En la Tabla 12 y Tabla 13 podemos ver los datos que teníamos de Letonia respecto a Croacia en cuanto a porcentajes.

PAÍS	PIB	Población	Nº de casos	Nº de test	Nº de fallecimientos
Diferencia Letonia - Croacia	136.07%	171.30%	116.97%	154.02%	220.61%

Tabla 9. Diferencia datos de Letonia respecto Croacia (1). Fuente: Elaboración propia.

PAÍS	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº vacunados	Nº vacunas recibidas
Diferencia Letonia - Croacia	348.36%	327.12%	64.17%	144.12%

Tabla 10. Diferencia datos de Letonia respecto Croacia (2). Fuente: Elaboración propia.

Como podemos ver la diferencia es de tan solo 36.07% más de PIB, 71.3% de Población, y 16.97% en Número de casos de Letonia respecto a Croacia. Habiendo realizado 54.02% más de test y tiene 248.36% más de Ocupación media hospitalaria, 227.12% más de Ocupación media de UCI y 120.61% más de fallecidos. Con estas proporciones podemos ver que no concuerda la gestión que ha tenido pese a tener unos recursos similares, la gran diferencia existente en los fallecidos, ocupación hospitalaria y UCI. Además podemos ver que ha recibido 44.12% más de vacunas, pero el número de vacunados total ha sido de 64.17% menos.

Luxemburgo, como hemos dicho es el país que más cerca está de la eficiencia con θ igual a 0.97. Es de los países de menor tamaño, con una población total de 626,108 personas, el segundo con menor población de los estudiados solo por detrás de Malta, que tiene una población de 514,564 personas. Según el modelo tomado, las unidades se van a comparar con las de su mismo tamaño, es por ello por lo que Luxemburgo se comparará con las de un tamaño similar como Malta. Teniendo en cuenta que Luxemburgo es ineficiente, Malta eficiente y comprobando los datos podemos ver que Luxemburgo está dominada por Malta. Es decir, los valores que deben de tomar las entradas para que Luxemburgo sea eficiente son los mismos valores que tenemos como dato de Malta.

Es la única unidad que está dominada por otra y que por tanto su proyección sobre la frontera eficiente es sobre Malta.

PAÍS	Nº de tests (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.
Luxemburgo	1,041	420	32.00
Malta	1,041	420	32.00

Tabla 11. Proyección de Luxemburgo sobre Malta. Fuente: Elaboración propia.

PAÍS	M. ocupación UCI	Nº vacunas recibidas (en miles)	θ
Luxemburgo	5.05	724	0.98
Malta	5.05	724	1

Tabla 12. Proyección de Luxemburgo sobre Malta. Fuente: Elaboración propia.

7.2. RESULTADOS MODELO GoDEA

Para resolver el modelo y así obtener resultados, hay que establecer el valor del objetivo global, es decir el objetivo del número de vacunas a recibir total que queremos (GXV1). Como dato el número total de vacunas recibidas por todos los países es 508,245,947. Se va a buscar una reducción del 15%, y del 25% por lo tanto GXV1 es igual a 432,009,055 y 381,184,460.3 vacunas recibidas respectivamente.

Además de GXV1, se proponen los pesos que van en la función objetivo con los que daremos preferencias a unas u otras desviaciones. Estos son iguales a 0.1 para las desviaciones positivas y negativas de las entradas, y desviaciones positivas y negativas de las salidas.

Para la desviación del objetivo global, el peso es de 1,000, para que tenga más preferencia y el modelo busque con prioridad cumplir dicho objetivo.

Así, se procede a exponer los resultados obtenidos:

- Solución reducción del 15% (Objetivo 432009055 vacunas totales recibidas):

PAÍS	Nº de test (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº total vacunados (en miles)	Nº vacunas recibidas (en miles)
Austria	61,897	13,113	740	213	3,945	9,539
Bélgica	16,548	3,326	1,958	461	5,275	13,480
Bulgaria	3,414	18,174	2,977	257	873	5,741
Croacia	2,217	8,238	855	79	1,360	3,984
Chipre	9,240	385	82	14	426	1,120
Rep. Checa	32,199	30,338	6,151	507	4,150	11,278
Dinamarca	37,025	1,018	211	39	2,555	7,544
Estonia	1,585	1,271	191	19	486	1,341
Finlandia	5,731	991	109	25	1,679	5,458
Francia	99,301	111,503	18,416	2,682	31,505	70,806
Alemania	66,595	53,775	7,482	1,286	15,036	35,351
Grecia	11,708	12,850	1,161	133	4,315	12,239
Hungría	5,806	30,015	2,650	228	1,360	3,984
Irlanda	5,878	5,018	340	56	2,338	5,873
Italia	74,792	127,867	15,196	1,576	26,115	65,678
Letonia	2,987	2,543	325	77	537	1,953
Lituania	4,047	4,404	636	56	1,227	5,133
Luxemburgo	3,202	820	81	16	258	742
Malta	1,041	420	32	5	339	724
Holanda	15,233	9,550	1,042	361	7,910	30,069
Polonia	18,660	75,215	9,826	747	1,859	40,832
Portugal	14,498	17,207	1,426	224	5,199	11,510
Rumanía	9,728	34,253	3,854	672	4,303	15,580
Eslovaquia	40,425	12,524	1,074	148	1,890	5,608
España	50,200	81,096	10,988	2,103	21,945	53,588
Suecia	10,811	14,646	1,238	210	4,626	10,297
Eslovenia	1,374	4,425	410	32	712	2,544

Tabla 13. Solución modelo GoDEA (15%). Fuente: Elaboración propia.

- Solución del 25% (Objetivo a 381184460,3 vacunas totales recibidas):

PAÍS	Nº de test (en miles)	Nº de fallecimientos	M. ocupación hosp.	M. ocupación UCI	Nº total vacunados (en miles)	Nº vacunas recibidas (en miles)
Austria	61,897	13,113	740	213	3,945	9,539
Bélgica	16,548	3,326	1,958	461	5,275	13,480
Bulgaria	3,414	18,174	2,977	257	873	5,741
Croacia	2,217	8,238	855	79	1,360	3,984
Chipre	9,240	385	82	14	426	1,120
Rep. Checa	32,199	30,338	6,151	507	4,150	11,278
Dinamarca	37,025	1,018	211	39	2,555	7,544
Estonia	1,585	1,271	191	19	486	1,341
Finlandia	5,731	991	109	25	1,679	5,458
Francia	99,301	111,503	18,416	2,682	31,505	70,806
Alemania	66,595	51,638	7,482	1,115	13,572	30,970
Grecia	11,708	12,850	1,161	133	4,315	12,239
Hungría	5,806	30,015	2,650	228	1,360	3,984
Irlanda	5,878	5,018	340	56	2,338	5,873
Italia	74,792	68,667	11,246	1,576	18,458	42,093
Letonia	2,987	2,543	325	77	537	1,953
Lituania	4,047	4,404	636	56	1,227	5,133
Luxemburgo	3,202	820	81	16	258	742
Malta	1,041	420	32	5	339	724
Holanda	15,233	9,550	1,042	286	4,486	11,484
Polonia	18,660	75,215	9,826	747	1,859	40,832
Portugal	14,498	17,207	1,426	224	5,199	11,510
Rumanía	9,728	34,253	3,854	672	4,303	15,580
Eslovaquia	40,425	12,524	1,074	148	1,890	5,608
España	50,200	77,905	10,778	1,934	20,419	49,314
Suecia	10,811	14,646	1,238	210	4,626	10,297
Eslovenia	1,374	4,425	410	32	712	2,544

Tabla 14. Solución modelo GoDEA (25%). Fuente: Elaboración propia.

En ambos casos se obtiene la reducción de vacunas objetivo. Esto es debido a cómo se han ponderado los pesos que se ha dado preferencia al cumplimiento del objetivo global en comparación con las desviaciones de las demás variables. Habrá países que reciban menos vacunas, que tengan menos recursos, pero será en pro del objetivo común.

Para poder ver con mayor facilidad cuáles han sido los cambios respecto a los datos iniciales vamos a compararlos. Para ello se va a ver la variación que ha existido entre los datos iniciales y la reducción total de vacunas en ambos casos (15% y 25%) ,tanto la diferencia de datos iniciales y los obtenidos al emplear el modelo, como el porcentaje de variación:

- Variación para el caso de reducción del 15% (Objetivo 432,009,055 vacunas totales recibidas):

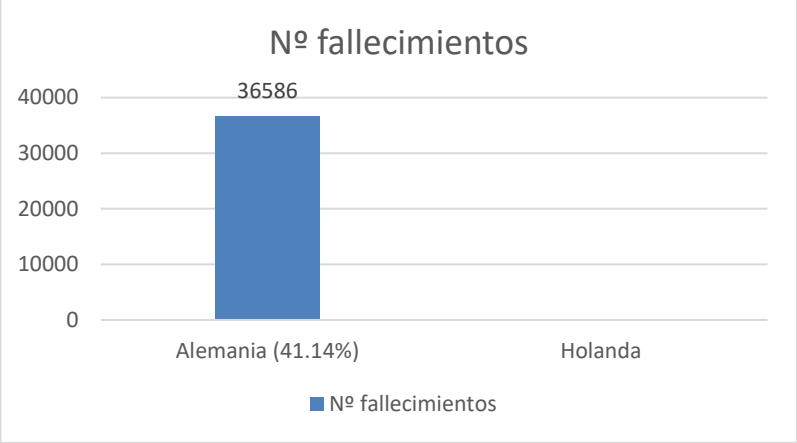

Figura 7. Variación solución GoDEA (15%)(1). Fuente: Elaboración propia.

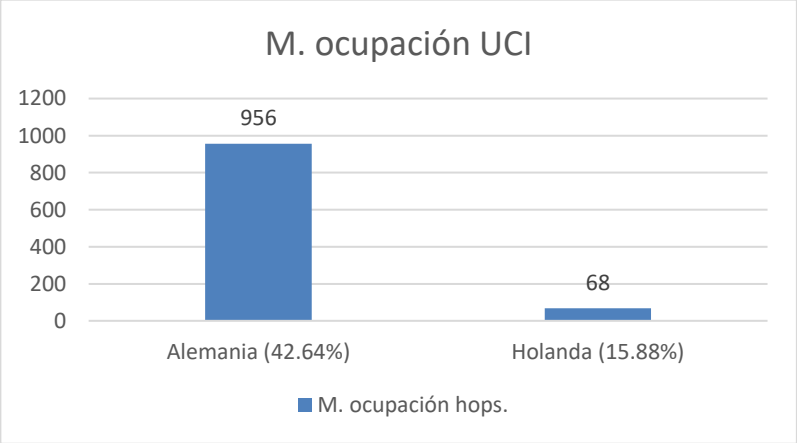

Figura 8. Variación solución GoDEA (15%)(2). Fuente: Elaboración propia.

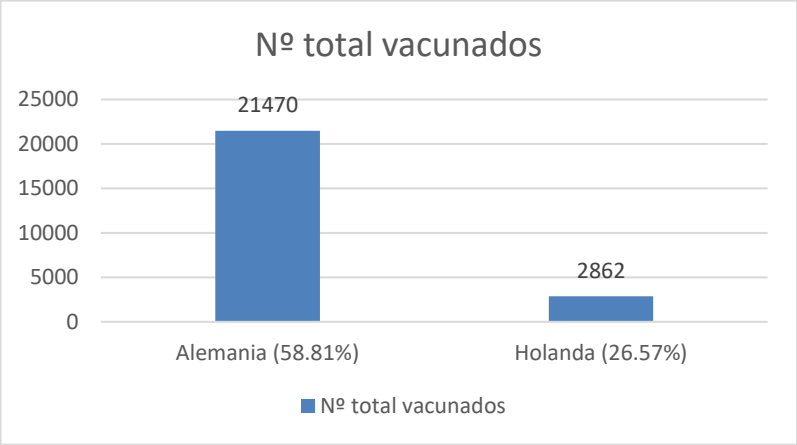

Figura 9. Variación solución GoDEA (15%)(3). Fuente: Elaboración propia.

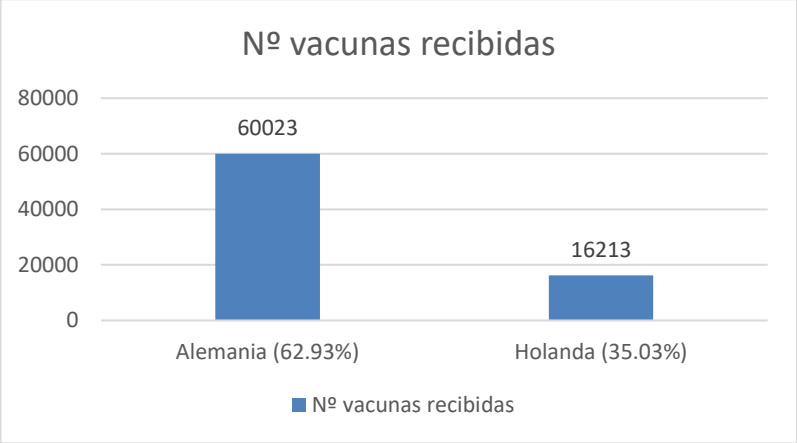

Figura 10. Variación solución GoDEA (15%)(4). Fuente: Elaboración propia.

- Variación para el caso de reducción del 25% (Objetivo 381184460,3 vacunas totales recibidas):

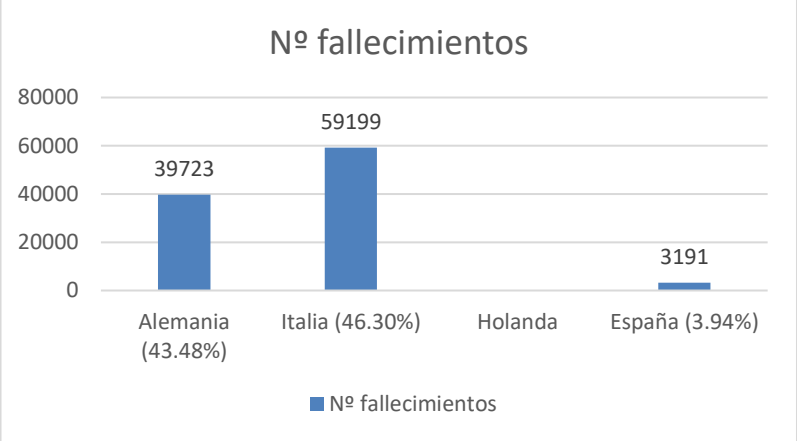

Figura 11. Variación solución GoDEA (25%)(1). Fuente: Elaboración propia.

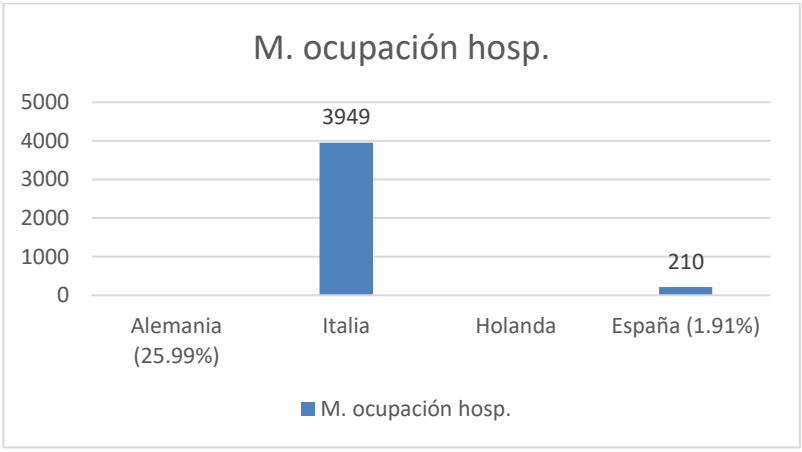

Figura 12. Variación solución GoDEA (25%)(2). Fuente: Elaboración propia.

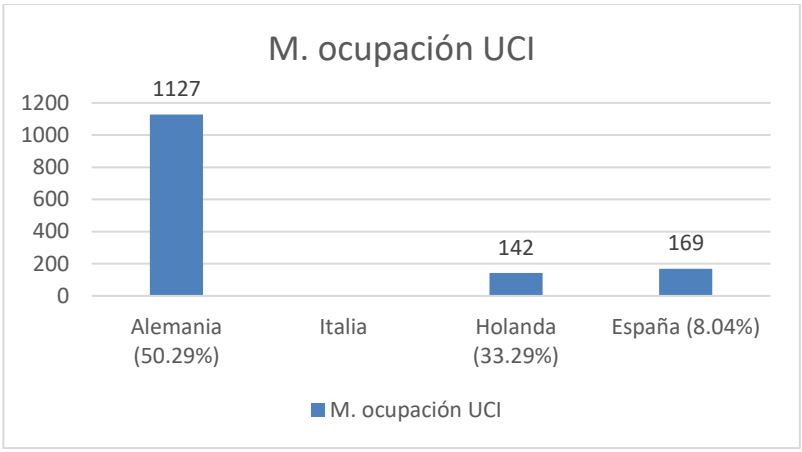

Figura 13. Variación solución GoDEA (25%)(2). Fuente: Elaboración propia.

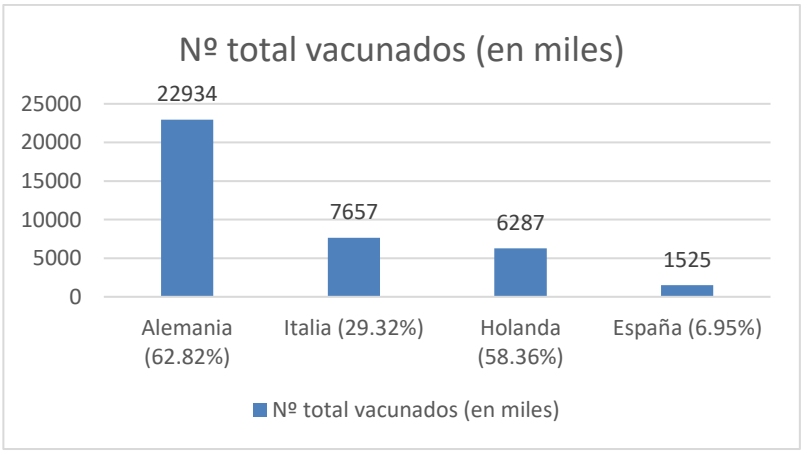

Figura 14. Variación solución GoDEA (25%)(4). Fuente: Elaboración propia.

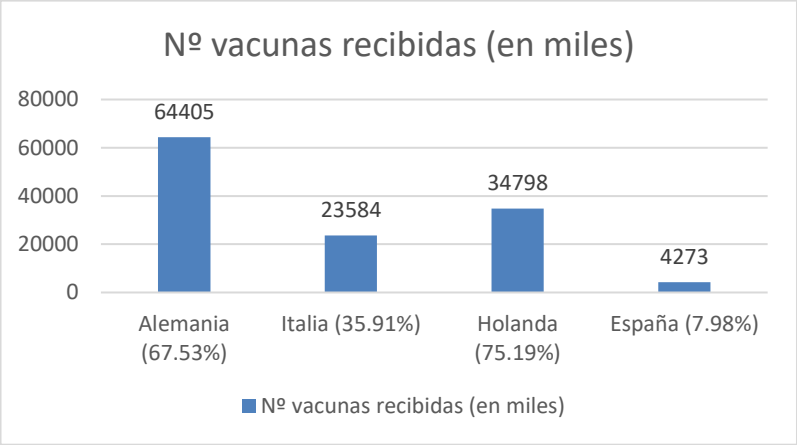

Figura 15. Variación solución GoDEA (25%)(5). Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la reducción del 15% puede verse que los países en los que desciende el número de vacunas recibidos son:

- Alemania: Descienden las vacunas en 60,023,809. Lo que supone una rebaja del 62.93%. Esto conlleva una reducción del número de vacunados de 21,470,484 personas, rebaja de 58.81%. Ha sido uno de los países que ha descendido el número de vacunas, y por tanto para proyectarse sobre la frontera eficiente tendría que descender la ocupación media UCI en 956 y el número de fallecimientos en 37586.
- Holanda: Descienden las vacunas en menor porcentaje (35.03%) 16,213,082 vacunas, al igual que el número de vacunados (26.57%) 2,862,940 personas, e igual que Alemania, tendría que descender la ocupación media UCI en 68 (15.88%).

En el caso de una reducción más significativa, caso del 25%, se observa que los países que anteriormente habían reducido sus vacunas, las seguirán reduciendo, pero se intensifica más esta reducción, además aparecen nuevos países, Italia y España, que tendrán que reducir sus vacunas para poder cumplir con el objetivo global:

- Alemania: Aumenta la reducción en un 4.6% las vacunas recibidas y 4.01% el número de vacunados, lo que sería un descenso total respecto a los datos iniciales de 64,405,045 y 22,934,728 respectivamente.
- Holanda: El aumento de reducción sería mucho mayor, 40.16% y 31.79% más en el porcentaje de rebaja de vacunas recibidas y de vacunados respectivamente. Esto se traduce en un descenso de 34,798,164 y 6,287,362 vacunas recibidas y vacunados.
- España: Tendría poco descenso de las vacunas recibidas y del número de vacunados, 4,273,923 (7.98%) y 1,525,352 (6.95%). Para proyectarse tendría que descender la

ocupación media UCI en 169 personas, la ocupación media hospitalaria en 210 personas y el número de fallecimientos en 3,191.

- Italia: Habría una mayor reducción de vacunas que para España. Nos encontramos con una reducción de 34,798,164 vacunas recibidas y 6,287,362 vacunados, que supone un porcentaje de descenso respecto a los datos iniciales de 75.19% (el mayor porcentaje de reducción), y 58.36% respectivamente. Como los anteriores, para alcanzar la eficiencia debería reducir la ocupación media en 3,949 (33.29%).

Para el caso de una reducción de 25%, son cuatro los países que deberían reducir sus vacunas, destacando Italia como el país que más reduciría las vacunas recibidas en porcentaje, seguido de Alemania. España sería de los cuatro países, el que menos tendría una rebaja respecto a los datos iniciales.

8 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de fin de grado era el de analizar la eficiencia en la administración de vacunas de los Estados miembros de la Unión Europea frente a la COVID-19. Es muy útil el uso del Análisis Envolvente de Datos (DEA) para medir la eficiencia en todos los campos, y por ello se puede llevar a cabo para medir la eficiencia de los países durante el COVID-19 como se ha hecho con el modelo básico DEA BCC. Este análisis no es el primero que se ha realizado para medir la eficiencia de distintos países en la situación de COVID. Existen ya trabajos de evaluación de eficiencia en India utilizando el Análisis Envolvente de Datos (Kumar y Aggarwalb, 2021), así como la evaluación de países a nivel internacional (Alves et al., 2022), y también se ha evaluado la eficiencia usando este mismo análisis de los sistemas de salud en Europa contra el COVID-19 (Lupu y Tiganasu, 2022).

Primero se ha hecho una breve introducción sobre la enfermedad del coronavirus, donde se ha conocido cuál es el origen, síntomas, letalidad, periodos de la enfermedad, diagnóstico, transmisión y variantes. Además, se ha visto cuál ha sido el desarrollo de las vacunas, cuál es el funcionamiento de cada una de las vacunas aprobadas en la Unión Europea, así como la evaluación y autorización de estas. También se ha conocido cómo y cuándo surgió el coronavirus en Europa, y cómo ha sido la respuesta de la Unión Europea. Se han presentado los modelos con los que se llevará a cabo el análisis de eficiencia, además de realizar una introducción y ver los modelos básicos del Análisis Envolvente de Datos.

Se han presentado los datos de partida y recursos recibidos de los veintisiete Estados miembros de la Unión Europea, referidos a el PIB, Población, Número de casos positivos, Número de test realizados, Número de vacunas recibidas, datos con los que cada país ha obtenido unos resultados. Estos resultados serán el Número de fallecidos, Ocupación media hospitalaria, Ocupación media UCI y Número de personas vacunadas con pauta completa.

Se recuerda que los países son los encargados de decidir si quieren o no vacunas y en qué cantidad dentro de las posibilidades y del número de vacunas que pueda adquirir la Unión Europea.

Para el Análisis Envolvente de Datos con el Modelo BCC-INPUT, no realizamos ninguna suposición. Se valora la eficiencia individual de cada país, es decir, se evalúa la gestión que han realizado.

Con los resultados del modelo a disposición, lo principal es saber cuáles son los países que son eficientes en la gestión y cuáles no. Así se obtiene:

- Países Eficientes: Austria, Bélgica, Croacia, Chipre, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Malta, Holanda, Polonia, Portugal, España, Suecia y Eslovenia.
- Países Ineficientes: Bulgaria, República Checa, Estonia, Hungría, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Rumania y Eslovaquia.

Sabiendo cuáles son eficientes y cuáles no, los países eficientes pueden servir de ejemplo para los países ineficientes. Estos últimos pueden fijarse en:

- Temas logísticos: Cómo se han distribuido las vacunas, EPI o test por todo el país. Cantidad lugares han adecuado para la vacunación y durante cuánto tiempo.
- Medidas sanitarias: En qué casos realizar test, en qué situaciones debe aislarse una persona y cuánto tiempo debe hacerlo.
- Medidas políticas: Cierre de fronteras, cierre de establecimientos, horario comercial, desplazamiento en el país o duración de estado de alarma.

Se están comparando los países unos a otros según el tamaño de los países. Teniendo esto en cuenta y comparando los datos, tenemos que para que Luxemburgo gestione de manera eficiente, tiene que proyectarse sobre la frontera sobre Malta. Parece evidente pensar que para mejorar la eficiencia de Luxemburgo deberá ver que ha realizado Malta diferente para obtener dichos resultados, y qué cantidad de recursos ha necesitado para ello.

Malta se justifica en la eficiencia debido a que aparece clasificada entre los primeros cinco países por su capacidad para resistir los efectos del COVID-19, el único país de la UE, que fue clasificado tan alto en el ranking de la agencia alemana Scope Ratings (Scope Ratings, 2020). La Organización Mundial de la Salud (OMS) señaló a Malta como "un país modelo que está mostrando el camino a seguir en los esfuerzos contra la propagación del COVID-19" (Gobierno de Malta, 2020). La estrategia de Malta fue identificar el mayor número de casos en una temprana etapa, aislarlos y rastrear sus contactos. Llegaron a realizar más de 1,000 testeos por día, siendo de los más elevados de Europa. Desde el 10 de marzo ya se prohibieron los vuelos desde y hasta Italia. Francia, Suiza, España y Alemania, países que estaban reportando más casos, fueron prohibidos al día siguiente (El Confidencial, 2020).

Luxemburgo siguió una estrategia similar a Malta, realizando 9,582.6 pruebas por cada 100,000 habitantes durante siete días (Gobierno del Gran Ducado de Luxemburgo, 2020). Haciendo uso de los datos recolectados, Luxemburgo realizó hasta el 18 de julio 3,202,324 pruebas (5,035 pruebas por mil habitantes), mientras que Malta realizó 1,041,418 (2,279 pruebas por mil habitantes).

Luxemburgo es el cuarto país de la UE que más pruebas realizó por mil habitantes, y Malta el sexto. Luxemburgo disponía de muchos más recursos que Malta, dispone de más de 75,000 euros de PIB per cápita, y esto puede verse en que ha podido realizar más del doble de pruebas por mil habitantes. Por tanto, la estrategia es similar pero Luxemburgo ha empleado muchos más recursos, y han obtenido resultados similares, así no es eficiente debido a que tienen el mismo tamaño.

Se tiene el caso de Letonia y Bulgaria, que son los países más ineficientes con diferencia, por ello, con estos análisis la conclusión es que son países que deberían de tomar cartas en el asunto, ver en qué han fallado respecto a la gestión de otros países y cómo podrían mejorar, tanto como para la presente pandemia como para estar preparados en las medidas a tomar.

Bulgaria únicamente tiene el 12.56% (país con porcentaje de vacunación más bajo). Y ha realizado únicamente 481 pruebas por mil habitantes (tercer país que menos pruebas ha realizado por habitantes) (ECDC, Base de datos). Tiene 2,613 de muertes confirmadas por millón de habitantes, siendo el tercer país con más muertes por habitantes. Datos demoledores que hacen que Bulgaria sea el país más ineficiente. Petar Markov, un destacado epidemiólogo de la London School of Hygiene and Tropical Medicine (LSHTM), de origen búlgaro, explica en declaraciones telefónicas a Efe, que la elevada mortalidad se debe al fuerte crecimiento del número de los contagiados, causado por la inacción del Gobierno en octubre y noviembre (La Vanguardia, 2020). Vladislav Punchev, periodista búlgaro dijo que Bulgaria, el país más pobre y corrupto de la Unión Europea (UE), tiene una de las mayores incidencias de mortalidad por la COVID-19, debido al mal estado de la sanidad pública y al retraso del Gobierno en aplicar medidas, por miedo a perder popularidad (La Vanguardia, 2020). Según diversas fuentes parece que el problema de esta ineficiencia radica en la inactividad del gobierno búlgaro, que en octubre existían multitud de llamamientos para declarar un nuevo confinamiento, el gobierno no lo declaraba por razones políticas. Y desde julio y durante semanas, se suman multitud de protestas por miles de personas reclamando la dimisión del Gobierno de Borisov, al que los ciudadanos acusan de corrupción y de conveniencia con la oligarquía económica (La Vanguardia, 2020).

El caso de Letonia como segundo peor país en cuanto a eficiencia según el modelo podríamos sumar a Lituania y Estonia que también son países ineficientes y que forman el grupo de los países bálticos. Tomaron medidas similares que pueden explicar la evaluación de eficiencia del modelo sobre estos países. En mayo de 2020, cuando otros países de la Unión Europea cerraban o habían cerrado ya las fronteras, los países bálticos suprimían las restricciones de viaje entre ellos para permitir la circulación de personas dentro de la región sin necesidad de autoaislarse. A esto se le llamaba la "burbuja viajera báltica". Finalmente la burbuja acabó estallando cuando en septiembre los casos

aumentaron y Letonia tuvo que restablecer la cuarentena de 14 días para los viajeros de países vecinos. (Álvarez, 2020)

Se recuerdan las dos suposiciones para el modelo GoDEA, que también nos servirá para tomar conclusiones a los resultados obtenidos con el modelo BCC-INPUT.

La primera suposición era la existencia de una Entidad Superior que gestionara el reparto de vacunas entre los diferentes países. Se hubiera mejorado la eficiencia del cómputo global, así como la de los países por individual. Conociendo cuáles están actuando de una manera eficiente y cuáles no, se podría dar prioridad a los países que están gestionando de manera eficiente haciendo un mayor reparto de vacunas a estos en vez de los que no las están gestionando eficientemente. Al comprar un paquete de vacunas, si se distribuyeran más a países como Austria, Bélgica… según lo analizado harán un mejor uso de estas que países como Letonia y Bulgaria. Se usarían muchas más vacunas que no se están usando, y algunos países eficientes podrían utilizar las vacunas antes que otros países que no van a utilizar hasta más adelante y que para ese tiempo habrá más vacunas disponibles. De esta manera, reduces las entradas de los países ineficientes, teniendo una salida de vacunación similar (similar debido a que la cifra de vacunas utilizadas es mucho menor que las disponibles para estos países).

De esta manera se reduce el malgasto de recursos de los países ineficientes, y se aumenta los recursos de los países que sí que están gestionando eficientemente, así los recursos se estarían gestionando mejor, y premiando a aquellos países que están gestionando bien, a parte que en términos de Unión Europea al hacerlo de esta manera como cómputo global y no por países tendríamos un mayor número de personas vacunadas como se ha dicho ya, que conllevaría menor número de fallecidos, menor cantidad de personas hospitalizadas o menor número de contagios.

La segunda suposición es la reducción del número de vacunas total, donde se consideraría el modelo GoDEA. Hemos realizado dos reducciones diferentes, primero una del 15% y otra del 25% de las vacunas totales.

Obteniendo que los países que reducirían sus vacunas serían Alemania (60,023,809), y Holanda (16,213,082) para el caso de una reducción de las vacunas totales del 15%. Y para el caso del 25 %, incrementaría el descenso de vacunas recibidas en Alemania (64,405,045) y Holanda (34,798,164), y aumentaría el número de países que verían reducidas sus vacunas que serían España (4,273,923) e Italia (23,584,354).

Este análisis sería de gran utilidad, ya que disponiendo de los datos hasta la fecha 18 de julio de 2021, podríamos suponer los datos de los próximos meses. Teniendo esto, si se compra un nuevo

paquete de vacunas, se puede suministrar tal como esté estipulado. Pero, se puede dar el caso en el que una vez hecho el reparto de una cantidad de vacunas, por la situación de pandemia se reduce finalmente esta cantidad. Gracias al modelo GoDEA, se puede ver qué países serían los que tendrían que reducir el número de vacunas, en qué cantidad y a parte el modelo daría cómo sería la proyección de estas unidades sobre las demás aprovechando las ventajas del modelo DEA.

La cantidad de vacunas en contrato se puede reducir o retrasar, debido a que las industrias farmacéuticas no pueden asegurar el número de vacunas, por tanto si existiera algún contratiempo, se recibirían menos vacunas de las esperadas (algo habitual en la situación provocada por la COVID-19).

REFERENCIAS Y SITIOS WEB

Álvarez, M. (2020) La Unión Europea y el COVID-19: Pandemia global, respuestas nacionales, ¿soluciones europeas?. ISBN 978-987-86-6607-5.

Alves M., Caldeira D., Cunha, D., Rui J. y Cunha, R. (2022) A network Data Envelopment Analysis to estimate nations' efficiency in the fight against SARS-CoV-2. Expert Systems with Applications, 210:118362.

Athanassopoulos., A.D. (1995) Goal programming & data envelopment analysis (GoDEA) for target-based multi-level planning: Allocating central grants to the Greek local authorities. *European Journal of Operational Research*, 87:3, pp. 535-550.

Charnes, A., Cooper, W. y Rhodes, E., (1978) Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2:6, pp. 429-444.

Farrell, M.J. (1957) The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 120, núm. 3, pp. 253-290.

Hailu, A. y Veeman, T. S., (2001) Non-Parametric Productivity Analysis with Undesirable Outputs: An Application to the Canadian Pulp and Paper Industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 83:3, pp. 605-616.

Kumar K., Sunil D. y Aggarwalb, A. (2021) Efficiency analysis in the management of COVID-19 pandemic in India based on data envelopment analysis. Current Research in Behavioral Sciences, 2:100063.

Lupu D. y Tiganasu R. (2022) COVID-19 and the efficiency of health systems in Europe, *Health Economics Review*, 12:14.

Ruiz J. (2022) Aplicación de la metodología DEA para el diseño personalizado de productos usando un enfoque multicriterio. *Proyecto Fin de Carrera*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. Universidad de Sevilla.

Taherinezhad A. y Alinezhad A. (2021) Nations performance evaluation during SARS-CoV-2 outbreak handling via data envelopment analysis and machine learning methods. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 10:1080.

Villa, G. (2022) Fundamentos del Análisis por Envoltura de Datos (DEA). *Apuntes de la asignatura Herramientas para la Toma de Decisiones*. Universidad de Sevilla.

An official website of the European Union https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/eurostat/web/main/help/faq/data-services, Último acceso julio, 2022.

COVID-19 Projections, 2022, The Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME).

https://covid19.healthdata.org/global?view=cumulative-deaths&tab=trend, Último acceso septiembre, 2022.

Data on COVID-19 vaccination in the EU/EEA, 2022, European Centre for Disease Prevention and Control.

https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/data-covid-19-vaccination-eu-eea, Último acceso diciembre, 2022.

Data on hospital and ICU admission rates and current occupancy for COVID-19, 2022, European Centre for Disease Prevention and Control.

https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/download-data-hospital-and-icu-admission-rates-and-current-occupancy-covid-19, Último acceso diciembre, 2022.

España, entre los países "apestados" internacionales por el coronavirus, El Confidencial, 2020. https://www.elconfidencial.com/mundo/europa/2020-03-11/espana-entre-los-paises-apestados-internacionales-por-el-coronavirus_2482303/, Último acceso noviembre, 2022.

Gobierno de Malta, 2020, Página informativa del COVID-19 n°4

https://www.gov.mt/en/Government/DOI/Press%20Releases/PublishingImages/Pages/2020

/March/15/pr200496/ISSUE04_ENG_15032020.pdf, Último acceso julio, 2022.

Información Científica-Técnica. Enfermedad por coronavirus, COVID-19, Ministerio de Sanidad, 2021.

https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/documentos/ITCoronavirus.pdf, Último acceso septiembre, 2022.

Luxembourg's ambitious testing strategy to tackle the pandemic, Gobierno del Gran Ducado de Luxemburgo, 2020. https://covid19.public.lu/fr/communications-officielles.gouvernement+en+actualites+toutes_actualites+articles+2020+07-juillet+16-maee-covid-test-strategy.html, Último acceso octubre, 2022.

Mala sanidad y Gobierno populista: el mortal cóctel de la covid en Bulgaria, La Vanguardia, 2020.

https://www.lavanguardia.com/vida/20201210/6111058/mala-sanidad-gobierno-populista-mortal-coctel-covid-bulgaria.html, Último acceso noviembre, 2022.

Origen del coronavirus SARS-CoV-2, 2020, Instituto de Salud Carlos III. https://www.isciii.es/InformacionCiudadanos/DivulgacionCulturaCientifica/DivulgacionISCIII/Paginas/Divulgacion/DivulgacionInformeOrigenCoronavirus.aspx, Último acceso septiembre, 2022.

Our World in Data. A project of the Global Change Data Lab, a non-profit organization based in the United Kingdom (Registered Charity Number 1186433).

https://ourworldindata.org/explorers/coronavirus-data-explorer, Último acceso julio, 2022.

Preguntas específicas sobre las vacunas de Pfizer, Moderna, AstraZeneca, Janssen y Novavax, 2021, Instituto de SaludGlobal Barcelona. https://www.isglobal.org/es/eficacia-de-las-vacunas-covid-19-aprobadas#novavax-eficacia, Último acceso noviembre, 2022.

Preguntas y respuestas sobre la transmisión de la COVID-19, 2021, Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted, Último acceso septiembre, 2022.

Preguntas y respuestas sobre la vacunación contra la COVID-19 en la UE, 2021, Comisión Europea. https://ec.europa.eu/info/live-work-travel-eu/coronavirus-response/safe-covid-19-vaccines-europeans/questions-and-answers-covid-19-vaccination-eu_es#negociaciones-sobre-vacunas, Último acceso noviembre, 2022.

Scope has completed a monitoring review for the Republic of Malta, 2020, Scope Ratings.

https://www.scoperatings.com/#!search/research/detail/164449EN, Último acceso en julio, 2022.

ANEXO: CÓDIGOS LINGO

MODELO DEA. BCC-INPUT

```
SETS:

!conjuntos primitivos;

ENTRADAC/1,2,3,4/:XCSOLR,HIC;
SALIDAC/1/:YCSOLR,HOC;
ENTRADAF/1,2,3/:;
!SALIDAF/1,2/:;
ENTRADAV/1/:XVSOLR,HIV;
!SALIDAV/1/:DMEN,GY;
!ENTRADANV/1,2/:VX;
!SALIDANV/1,2/:VY;


DMU/1..27/:LANDAR,TETA;


!conjuntos derivados;

ITERACION(DMU):;
DMU_ENTRADAC(DMU,ENTRADAC):XC,XCSOL;
DMU_SALIDAC(DMU,SALIDAC):YC,YCSOL;
DMU_ENTRADAF(DMU,ENTRADAF):XF;
!DMU_SALIDAF(DMU,SALIDAF):YF;
DMU_ENTRADAV(DMU,ENTRADAV):XV,XVSOL;
!DMU_SALIDAV(DMU,SALIDAV):YV,YVSOL;
!DMU_ENTRADANV(DMU,ENTRADANV):XNV,XNVSOL;
!DMU_SALIDANV(DMU,SALIDANV):YNV,YNVSOL;


DMU_ITERACION(DMU,ITERACION):LANDA;

ENDSETS

DATA:
!Importamos los datos desde una hoja excel;

XC,YC,XF,XV = @OLE ('C:\PROYECTO\CARLOS_VRS.xlsx','XC','YC','XF','XV');

!Exportamos los datos a una hoja excel;

@OLE ('C:\PROYECTO\CARLOS_VRS.xlsx','XCSOL','YCSOL','XVSOL','TETA')=
XCSOL,YCSOL,XVSOL,TETA;

ENDDATA

SUBMODEL TFG:

!Funcion objetivo;

MIN=  TETAR -
0.00001*(@SUM(ENTRADAC(I):HIC(I))+@SUM(ENTRADAV(I):HIV(I))+@SUM(SALIDAC(K):HO
C(K)));
```

```
!Restricciones;

@FOR (ENTRADAC(I):
      @SUM(DMU(J):
                          LANDAR(J)*XC(J,I)) <= TETAR*XC(R,I)-HIC(I));

@FOR (ENTRADAC(I):
      @SUM(DMU(J):      LANDAR(J)*XC(J,I)) = XCSOLR(I));

@FOR(ENTRADAV(I):
      @SUM(DMU(J):
                          LANDAR(J)*XV(J,I)) <= TETAR*XV(R,I)-HIV(I));
@FOR (ENTRADAV(I):
      @SUM(DMU(J):      LANDAR(J)*XV(J,I)) = XVSOLR(I));

@FOR (ENTRADAF(I):
      @SUM(DMU(J):      LANDAR(J)*XF(J,I)) <= XF(R,I));

@FOR(SALIDAC(K):
      @SUM(DMU(J):
                          LANDAR(J)*YC(J,K)) >= YC(R,K)+HOC(K));
@FOR (SALIDAC(K):
      @SUM(DMU(J):      LANDAR(J)*YC(J,K)) = YCSOLR(K));


@SUM(DMU(J):LANDAR(J))=1;

!XVSOLR(1)>=2*YCSOLR(1);

TETAR<=1;


ENDSUBMODEL

CALC:
@SET( 'TERSEO', 2);

@FOR (ITERACION(ITER):

R=ITER;

@SOLVE(TFG);

TETA(ITER)=TETAR;
@FOR(SALIDAC(K): YCSOL(ITER,K)=YCSOLR(K));
@FOR(ENTRADAC(I): XCSOL(ITER,I)=XCSOLR(I));
@FOR(ENTRADAV(I): XVSOL(ITER,I)=XVSOLR(I));


@FOR(DMU(J):LANDA(ITER,J)=LANDAR(J));

);

ENDCALC
```

MODELO GODEA

```
SETS:

!conjuntos primitivos;

ENTRADAC/1,2,3,4/:;
SALIDAC/1/:;
ENTRADAF/1,2,3/:;
!SALIDAF/1,2/:;
ENTRADAV/1/:DMAS,GX;
!SALIDAV/1/:DMEN,GY;
!ENTRADANV/1,2/:VX;
!SALIDANV/1,2/:VY;


DMU/1..27/:;


!conjuntos derivados;

ITERACION(DMU):;
DMU_ENTRADAC(DMU,ENTRADAC):XC,XCSOL,NIC,PIC;
DMU_SALIDAC(DMU,SALIDAC):YC,YCSOL,NOC,POC;
DMU_ENTRADAF(DMU,ENTRADAF):XF;
!DMU_SALIDAF(DMU,SALIDAF):YF;
DMU_ENTRADAV(DMU,ENTRADAV):XV,XVSOL;
!DMU_SALIDAV(DMU,SALIDAV):YV,YVSOL;
!DMU_ENTRADANV(DMU,ENTRADANV):XNV,XNVSOL;
!DMU_SALIDANV(DMU,SALIDANV):YNV,YNVSOL;


DMU_ITERACION(DMU,ITERACION):LANDA;

ENDSETS

DATA:
!Importamos los datos desde una hoja excel;

XC,YC,XF,XV,GX = @OLE ('C:\PROYECTO\CARLOS.xlsx','XC','YC','XF','XV','GX');

!Exportamos los datos a una hoja excel;

@OLE ('C:\PROYECTO\CARLOS.xlsx','XCSOL','YCSOL','XVSOL')= XCSOL,YCSOL,XVSOL;

ENDDATA


!Funcion objetivo;

MIN=
      @SUM(DMU(J):@SUM(ENTRADAC(I):1*NIC(J,I)/XC(J,I)+0.1*PIC(J,I)/XC(J,I)))+
@SUM(DMU(J):@SUM(SALIDAC(K):0.1*NOC(J,K)/YC(J,K)+0.1*POC(J,K)/YC(J,K)))
+@SUM(ENTRADAV(I):1000*DMAS(I)/GX(I));



!0.00000001*@SUM(ITERACION(R):@SUM(SALIDA(K):S(R,K)));

!Restricciones;
```

```
@FOR (ENTRADAC(I):
      @FOR (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*XC(J,I))-PIC(R,I)+NIC(R,I)=XC(R,I)));

@FOR (SALIDAC(K):
      @FOR (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*YC(J,K))-POC(R,K)+NOC(R,K)=YC(R,K)));

@FOR (ENTRADAF(I):
      @FOR (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*XF(J,I))<=XF(R,I)));

!@FOR (SALIDAF(K):
      @FOR (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*YF(J,K))>=YF(R,K)));

@FOR (ENTRADAV(I):
      @SUM (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*XV(J,I)))-DMAS(I)=GX(I));

!@FOR (SALIDAV(K):
      @SUM (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*YV(J,K)))+DMAS(K)=GY(K));


!@FOR (ENTRADANV(I):
      @SUM (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*XNV(J,I)))=VX(I));

!@FOR (SALIDANV(K):
      @SUM (ITERACION(R):
            @SUM(DMU(J):
                  LANDA(J,R)*YNV(J,K)))=VY(K));


@FOR (ITERACION(R):
@FOR (ENTRADAC(I):      XCSOL(R,I)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*XC(J,I))));

@FOR (ITERACION(R):
@FOR (SALIDAC(K):       YCSOL(R,K)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*YC(J,K))));

@FOR (ITERACION(R):
@FOR (ENTRADAV(I):      XVSOL(R,I)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*XV(J,I))));

!@FOR (ITERACION(R):
@FOR (SALIDAV(K):       YVSOL(R,K)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*YV(J,K))));

!@FOR (ITERACION(R):
@FOR (ENTRADANV(I):     XNVSOL(R,I)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*XNV(J,I))));

!@FOR (ITERACION(R):
@FOR (SALIDANV(K):      YNVSOL(R,K)=@SUM(DMU(J):LANDA(J,R)*YNV(J,K))));
```

```
@FOR (ITERACION(R):
@SUM (DMU(J):LANDA(J,R))=1);
```